

Hrsg: Gabriele Patitz | Gabriele Grassegger | Otto Wölbert

Natursteinbauwerke

Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen

Fraunhofer IRB  Verlag

THEISS

Regierungspräsidium Stuttgart • Landesamt für Denkmalpflege
Arbeitsheft 29

Hrsg: Gabriele Patitz | Gabriele Grassegger | Otto Wölbert
Natursteinbauwerke

Hrsg: Gabriele Patitz | Gabriele Grassegger | Otto Wölbert

Natursteinbauwerke

Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen

Die Autoren:

Rainer Barthel | Ronald Betzold | Stefan Brüggerhoff | Andreas Bruschke | Ralph Egermann
Harald Garrecht | Lothar Goretzki | Gabriele Grassegger | Hans Michael Hangleiter
Gottfried Hauff | Christoph Herm | Erwin Hornauer | Albert Kieferle | Helmut Kollmann
Peter Kozub | Reiner Krug | Till Läßle | Klaus Liehnert | Jörg Möser | Claudia Neuwald-Burg
Gabriele Patitz | Karin Petersen | Esther von Plehwe-Leisen | Peter Reiner | Tilman Riegler
Ralf Ruhnau | Hermann Schäfer | Georg Schmid | Eduard Schnell | Hans-Jürgen Schwarz
Erwin Schwing | Heiner Siedel | Michael Steiger | Sylvia Stürmer | Gustav Treulieb
Helmuth Venzmer | Eberhard Wendler | Wolfgang Werner | Otto Wölbert | Hans-Werner Zier

Regierungspräsidium Stuttgart • Landesamt für Denkmalpflege
Arbeitsheft 29

Fraunhofer IRB Verlag
Konrad Theiss Verlag

Herausgeber

Dr.-Ing. Gabriele Patitz
Ingenieurbüro IGP für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe

Prof. Dr. Gabriele Grassegger
Fakultät B: Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft
Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

Otto Wölbert
Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, FB Restaurierung
Berliner Straße 12, 73726 Esslingen am Neckar

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN: 978-3-8167-9196-6 (Print | Fraunhofer IRB Verlag)
ISBN: 978-3-8167-9197-3 (E-Book | Fraunhofer IRB Verlag)
ISBN: 978-3-8062-3036-9 (Print | Konrad Theiss Verlag)

Layout und Satz: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.
Umschlaggestaltung: Martin Kjer
Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH, Zwickau

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.
Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2015
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 7 11 9 70-25 00
Telefax +49 7 11 9 70-25 08
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

Konrad Theiss Verlag
Hindenburgstraße 40, 64295 Darmstadt
Telefon: +49 6151 3308-340
Telefax: +49 6151 3308-277
service@theiss.de
www.theiss.de

Gefördert vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg – Oberste Denkmalschutzbehörde,
mit freundlicher Unterstützung der Knödler-Decker Stiftung Stuttgart

Vorwort der Herausgeber

Im März 1985 fand in Bern die erste Tagung Natursteinsanierung statt und im März 2014 die 20. Tagung in Stuttgart. Wir können auf 20 Veranstaltungen zurückblicken, bei denen sich Fachleute vieler Berufs- und Tätigkeitsfelder aus Deutschland, Österreich und der Schweiz zum Erfahrungsaustausch getroffen haben. Es wurden neue Erkenntnisse, Geräte, Materialien, Ausführungstechniken und Verfahren aus der Forschung und Praxis präsentiert. Im Mittelpunkt standen immer Natursteine – in ganz unterschiedlicher Be- und Verarbeitung und in sehr unterschiedlichem Erhaltungszustand. Es handelte sich dabei um Bau- denkmale, um Skulpturen, um Ornamentik bis hin zu Ingenieurbauwerken. So vielfältig wie die Belastungen, die Probleme und die Schadensfälle an den meistens denkmalgeschützten Objekten waren und sind, so vielfältig sind die Spezialisierungsgebiete der sich austauschenden Fachleute. Bei der Tagung trafen sich Denkmalpfleger, Architekten, Ingenieure, Naturwissenschaftler wie Mineralogen, Geologen und Chemiker, Vertreter der Münsterbauhütten, Steinmetze, Bildhauer, Restauratoren, Baufirmen und Produkthersteller. Vertreter aus der Planung und Vorbereitung, der Forschung und Entwicklung, der Bauausführung und der Lehre und Ausbildung stellten aktuelle Themen und Arbeiten zur Diskussion. An denkmalgeschützten Objekten stand der schonende und behutsame Umgang mit der historischen Substanz im Fokus und auch da wurden verschiedene Sicht- und Herangehensweisen präsentiert und diskutiert.

Ein sehr intensiver Austausch an Fachwissen und handwerklichem Können erfolgte im Rahmen der Exkursionen. Seitdem die Tagung in Stuttgart stattfindet, wird die Vortragsveranstaltung durch Führungen und Präsentationen auf aktuellen Baustellen ergänzt. Münsterbauhütten konnten besichtigt und deren Arbeitsweisen dem breiten Fachpublikum vorgestellt werden.

Anlässlich des Jubiläums wollen wir als Veranstalter der Tagung mit diesem Arbeitsheft einen Bogen von der Baugeschichte, den Voruntersuchungen, den Materialwissenschaften bis hin zu den Ausführungen von Instandsetzungen an Natursteinbauwerken spannen. Erfahrene Kolleginnen und Kollegen haben wir gebeten, Aspekte ihres Wissens in einem kurzen Beitrag zusammenzustellen. Für ihre Mitarbeit, Anregungen und das Zustandekommen des vorliegenden Bandes möchten wir uns herzlich bedanken.

Die Aufsätze haben wir in sechs Themenschwerpunkten zusammengefasst.

Wichtige Grundlagen zur Bewertung der Standsicherheit von Natursteinbauwerken sind Methoden, Verfahren und Herangehensweisen bei den Voruntersuchungen zum Erfassen und Dokumentieren des Ist-Zustandes.

In ungeschützten Bereichen erfahren Natursteine sehr vielfältige Belastungen aus der Umwelt. Diese gilt es nicht nur zu kennen, auch ihre Auswirkungen auf Verwitterungsmechanismen müssen bei der Konservierung und Instandsetzung berücksichtigt werden. So wird in den Aufsätzen neben dem Einfluss von Salzen, Feuchtebelastungen und biologischem Bewuchs auch auf Analyse- und Bewertungsverfahren eingegangen.

Zahlreiche Praxisbeispiele stellen gängige Methoden der Schadensbegrenzung und Schadensbehebung sowie Instandsetzungsmaßnahmen wie Rissverpressungen, Vernadelungen, Reinigung und Entsalzung, Steinfestigung, Steinersatz und Steinerfüllungsmörtel vor. Zu Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen zählen ebenso die Techniken des Steinaustausches unter Berücksichtigung des heute vorhandenen Ersatzmaterials von Natursteinen.

Basis sämtlicher Bautätigkeiten, nicht nur der Natursteinarbeiten, sind eine solide Planung und Ausschreibung und ein realisierbares Zeitmanagement. Dem verantwortlichen Planer, meist ein Architekt, kommt hier eine besonders verantwortungsvolle Aufgabe zu. An denkmalgeschützten Objekten müssen zusätzlich die sich daraus ergebenden Zwänge, Forderungen und Wünsche im Einvernehmen mit allen Beteiligten und die technischen, wirtschaftlichen und bauzeitlichen Möglichkeiten berücksichtigt werden. Dieses Spannungsfeld ist nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit lösbar und erfordert gelegentlich auch unkonventionelle Lösungen.

Mit erfolgreicher Fertigstellung der Bauarbeiten ist die Aufgabe jedoch nicht abgeschlossen. Vielmehr sind insbesondere bei denkmalgeschützten Natursteinbauwerken eine regelmäßige Wartung und Pflege notwendig. Auch diese Thematik ist ein wichtiger Bestandteil des vorliegenden Arbeitsheftes.

Die bestehenden Natursteinbauwerke haben meist eine vergleichsweise lange Lebens- und Nutzungsdauer bereits hinter sich. Sie sollen zum einen möglichst im Original für die Zukunft erhalten und zum anderen ertüchtigt werden.

Mit dem vorliegenden Arbeitsheft wollen wir nicht nur die unterschiedlichen Aufgabenfelder vorstellen, sondern Ihnen als Leser auch Handwerkszeug, Ideen und Anregungen für Ihre praktische Arbeit geben.

Gabriele Patitz

Gabriele Grassegger

Otto Wölbert

Vorwort des Landesamtes für Denkmalpflege

Das Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart hat sich an den seit 2004 in Stuttgart stattfindenden jährlichen Tagungen zur Natursteinsanierung intensiv an Planung und Durchführung beteiligt und diese Veranstaltung samt den obligatorischen Exkursionen zu aktuellen Baustellen fachlich unterstützt. Über die Jahre hinweg hat sich die Natursteintagung zu einer festen Größe bei den Veranstaltungen für die Fachwelt herausgebildet, wie die konstant steigenden Teilnehmerzahlen eindrucksvoll belegen. Sie dient in ihrer Ausrichtung der Fort- und Weiterbildung von Denkmalpflegern und ihren zahlreichen Partnern in der Praxis. So ist es denn auch als Zeichen der Anerkennung dieser erfolgreichen Tagungsreihe zu verstehen, dass das Landesamt für Denkmalpflege die vorliegende Publikation in seiner bewährten und praxisorientierten Reihe der Arbeitshefte veröffentlicht.

Den Herausgebern ist es gelungen, Beiträge erfahrener und ausgewiesener Experten auf ihrem Gebiet zu einem überzeugenden Handbuch zusammenzutragen. Es zeigen sich darin die vielfältigen Anforderungen, die in der praktischen Denkmalpflege bei den Erhaltungsbemühungen bestehen. Im Mittelpunkt sämtlicher Beiträge steht der fachgerechte und erfolgreiche Erhalt unserer Bau- und Kunstdenkmale aus Natursteinen. Neben Erhaltungsmaßnahmen an alten Mauern und Skulpturen wird auch die Standsicherheit von Ingenieurbauten der Neuzeit behandelt. Erfolgreich spannt sich der Bogen von der Planung der Maßnahmen, über die vielfältigen naturwissenschaftlichen Untersuchungen und Forschungen bis hin zu den praktischen Umsetzungen der Konzepte.

Es wurden Beiträge der verschiedensten Fachdisziplinen zusammengestellt – von Planern, Forschern und Entwicklern, Technikern, Restauratoren und Handwerkern. Es beteiligten sich aber auch ausführende und produzierende Firmen. In toto zeigt sich einmal mehr, wie wichtig die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Bewältigung der anstehenden Aufgaben ist. Es wird zugleich deutlich, dass dieses Teamwork auf Augenhöhe eine äußerst wichtige Voraussetzung für den gemeinsamen Erfolg ist.

Das Landesamt für Denkmalpflege dankt allen Autoren, die mit ihren Beiträgen zum Gelingen dieser Publikation beigetragen haben. Darüber hinaus dankt es den Herausgeberinnen Frau Dr. Gabriele Patitz und Frau Prof. Dr. Gabriele Grassegger sowie dem Amtsrestaurator Otto Wölbert für ihr Engagement bei der Erstellung und Herausgabe des Jubiläumsbandes. Möge die Lektüre dieser Fachpublikation hilfreiche Anregungen und Ideen allen denen geben, die mit der schönen und wichtigen Aufgabe der Denkmal-erhaltung betraut sind.

Prof. Dr. Michael Goer
Landeskonservator

Inhalt

I	Naturstein am Bauwerk – Erfassen und Dokumentieren	11
	Neue Normen für Natursteinmauerwerk	11
	Methoden der Bauaufnahme	17
	Bestands- und Schadenskartierung an Natursteinbauwerken	25
	Bauradar, Ultraschall und Mikroseismik	33
	Chemische Analytik an geschädigten und konservierten Natursteinen als Voruntersuchung	41
	Von der bauhistorischen Voruntersuchung zum Maßnahmenkonzept	53
II	Putze, Mörtel und Fassungen auf Natursteinmauerwerk	59
	Typische Schäden an Außenputzen und Fugenmörteln und deren denkmalverträgliche Sanierung	59
	Antrags- und Vergussmassen für die Instandsetzung von römischem Ziegelmauerwerk	67
	Moderne Putze auf alten Untergründen	77
	Farben auf Naturstein	85
III	Standsicherheit von Natursteinmauerwerk	95
	Grundlagen für Standsicherheitsnachweise an bestehendem Natursteinmauerwerk	95
	Ingenieurtechnische Sicherung von Natursteinmauerwerk	103
	Bögen und Gewölbe – Bewerten und Instandsetzen	115
	Sanierung von Stützmauern – Statik und Verfahren	125
	Beispielhafte statische Sicherung von Natursteinwänden	131
IV	Schäden durch Feuchte, Salze und biologische Belastungen am Natursteinmauerwerk	137
	Verwitterungsschäden an Natursteinoberflächen – Ursachen und Schadensbilder	137
	Aufnahme und Transport von Feuchte in Natursteinen und Mauerwerk und deren Bedeutung	145
	2D-Feuchtestatus von Mauerwerken	153

Sinn und Notwendigkeit nachträglicher Fundamentabdichtung	163
Salzschäden an Bauwerken – Ursachen und Wirkungsmechanismen	169
Mikrobiologische Schädigungen an Naturstein und Vorgehensweisen zu deren Beseitigung	175
V Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an Natursteinen	183
Reinigung und Entsalzung von Bauwerksoberflächen – praxisgerechte Methoden	183
Natursteinaustausch – Hinweise zu Auswahl und Beschaffung von Ersatzmaterial	193
Techniken der Steinbearbeitung und des Steinaustausches	201
Chemie der Steinfestigung mit Kieselsäureestern	209
Restauratorische Steinfestigung mit Kieselsäureestern oder Kunstharzen	219
Injektion von Rissen, Spalten und Schalenhohlräumen an Steinskulpturen	227
Zeitmanagement bei der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen	239
Steinergänzungsmörtel	245
Hydrophobierung – Schaden oder Nutzen	251
Materialoptimierung und Materialentwicklung	259
VI Planen und Ausschreiben von Natursteinarbeiten	267
Die Rolle des Architekten bei der Planung und Durchführung steinrestauratorischer Arbeiten	267
Auswahlverfahren für die Vergabe von Leistungen in der Denkmalpflege	277
Strategien zur Schadensprävention, Wartung und Unterhalt von Baudenkmalen	283
Steinzentrum Wunsiedel – Restaurieren lernen	289
Normen, WTA-Merkblätter, Richtlinien und Technische Regeln	293
Autorenverzeichnis	297

Neue Normen für Natursteinmauerwerk

Reiner Krug

Im Zuge der Erstellung harmonisierter europäischer Normen wurde die bisherige nationale Norm DIN 1053-1 durch die europäische Normenreihe DIN EN 1996 ersetzt. Erstmals ist auch mit der DIN EN 771-6 eine Produktnorm für Mauersteine aus Naturstein erarbeitet worden, die die Anforderungen an die verwendeten Mauersteine enthält. Während für tragende Wände im Hochbau wesentliche Neuerungen, insbesondere hinsichtlich deren statischen Bemessung, zu berücksichtigen sind, ergeben sich für die Sanierung von historischen Gebäuden und für den Garten- und Landschaftsbau keine wesentlichen Änderungen. Die Auswirkungen der neuen europäischen Normen auf die Auswahl von Mauersteinen aus Naturstein und die Konstruktionsarten von Mauerwerk aus Naturstein für Bauwerke sowie im Garten- und Landschaftsbau werden beschrieben.

Schlagwörter: Normen, Naturstein, Mauerstein, Mauerwerk, Trockenmauer

1 Europäische Normen

1.1 DIN EN 1996-1-1 – Anhang NA.L

Im Nationalen Anhang NA.L des neuen Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – sind Definitionen und Anforderungen der jeweiligen Mauerwerksarten aus Naturstein enthalten:

Tragendes Mauerwerk

Tragendes Mauerwerk wird überwiegend im Hochbau und Ingenieurbau für die Herstellung von Bauwerken verwendet. Für tragendes Mauerwerk ist ein statischer Nachweis der Standsicherheit erforderlich. Neben dem Eigengewicht sind zusätzliche statische Lasten, beispielsweise aus Geschossdecken, Dächern oder Unterzügen, zu berücksichtigen. Entsprechend DIN EN 1996-1-1 ist tragendes Mauerwerk so herzustellen, dass neben der Eigenlast auch weitere Nutzlasten aufnehmbar sind. Tragendes Mauerwerk kann auch zur Gebäudeaussteifung herangezogen werden. Mauersteine für tragendes Mauerwerk müssen maßhaltige Natursteine nach DIN EN 771-6, Kategorie I sein.

Tragendes Mauerwerk im Sinne der DIN EN 1996-1-1 wird kaum noch aus Naturstein herge-

stellt. Im Regelfall werden lediglich einzelne Mauersteine (Vierungen) im Zuge der Sanierung ausgetauscht. Mauersteine, die auf traditionelle Weise oder in einer der Erhaltung des kulturellen Erbes entsprechenden Weise in einem nicht-industriellen Verfahren zur angemessenen Renovierung von Bauwerken hergestellt werden, benötigen keine Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung.

Schwergewichtsmauerwerk

Schwergewichtsmauerwerk wird überwiegend im Garten- und Landschaftsbau verwendet. Neben dem Eigengewicht werden freistehende Schwergewichtsmauern durch Wind und eventuell Anpralllasten, Stützwände zusätzlich durch Erddruck und eventuell hydrostatischen Wasserdruck belastet. Entsprechend DIN EN 1961-1-1 ist Schwergewichtsmauerwerk mit der jeweils erforderlichen Dicke so herzustellen, dass die einwirkenden Lasten aufnehmbar sind.

Schwergewichtsmauerwerk kann als Trockenmauerwerk oder mit vermörtelten Naturwerksteinen hergestellt werden. Es werden – mit Ausnahme der ausreichenden Frostwiderstandsfähigkeit – keine besonderen Anforderungen an die Mauersteine aus Naturstein gestellt.

Verblendmauerwerk

Verblendmauerwerk wird gleichzeitig mit der Hintermauerung im Verbund gemauert. Die Verblendsteine aus Naturstein müssen eine ausreichende Verzahnung mit der Hintermauerung aufweisen. Für die Ermittlung der zulässigen Beanspruchung des Gesamtmauerwerks ist der Baustoff (Mauerwerk, Beton) mit der niedrigsten zulässigen Beanspruchung maßgebend. Wird der Naturwerkstein zum tragenden Querschnitt hinzugerechnet, sind maßhaltige Natursteine nach DIN EN 771-6 zu verwenden.

Vorsatzschalen

Vorsatzschalen aus Naturstein sind in der Regel durch eine Luftschicht und Wärmedämmung von der tragenden Wand getrennt. Bei Ingenieurbauwerken wird die Verblendfuge zwischen der Vorsatzschale aus Naturstein und der tragenden Wand häufig mit Mörtel verfüllt. Zur tragenden Wand wird keine Verzahnung hergestellt. Vorsatzschalen müssen deshalb mit der tragenden Wand grundsätzlich mechanisch verankert werden. Es werden – mit Ausnahme der ausreichenden Frostwiderstandsfähigkeit – keine besonderen Anforderungen an die Natursteine gestellt.

Trockenmauerwerk

Trockenmauerwerk ist eine Sonderbauweise, bei der die Natursteine ohne Verwendung von Bindemittel (Mörtel) im Verband aufeinander geschichtet werden. Trockenmauerwerk ist grundsätzlich als Schwergewichtsmauer herzustellen. Für Trockenmauerwerk werden oftmals unbearbeitete Findlings-, Zyklopen- und Bruchsteine genutzt, für die es keine normativen Anforderungen gibt. Es werden – mit Ausnahme der ausreichenden Frostwiderstandsfähigkeit – keine besonderen Anforderungen an die Natursteine gestellt.

Grundsätze für Trockenmauern enthält das Merkblatt »Empfehlungen für Planung, Bau und Instandsetzung von Trockenmauer«, herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL).

Findlingsmauerwerk

Findlingsmauerwerk enthält wenig bzw. unbearbeitete Natursteine mit überwiegend rundlichen oder wilden Formen. Findlingsmauerwerk wird überwiegend als Trockenmauerwerk (= ohne Mörtelfugen) für freistehende Schwergewichtsmauer oder Stützmauer aus lokalen Natursteinen erstellt.



Bild 1
Findlingsmauerwerk

Bruchstein-Zyklopenmauerwerk

Bruchstein-Zyklopenmauerwerk enthält bruchraue, überwiegend polyedrisch geformte Natursteine. Es wird ebenfalls überwiegend als Trockenmauerwerk für freistehende Schwergewichtsmauer oder Stützmauer aus lokalen Natursteinen erstellt.



Bild 2
Bruchstein-Zyklopenmauerwerk

Zyklopenmauerwerk

Zyklopenmauerwerk enthält wenig bzw. hammerrecht bearbeitete Natursteine mit überwiegend polyedrischer Form. Zyklopenmauerwerk wird häufig

fig als Trockenmauerwerk oder mit vermörtelten Fugen als Schwergewichtsmauerwerk verwendet.



Bild 3

Zyklopenmauerwerk

Bruchstein-Schichtenmauerwerk

Bruchstein-Schichtenmauerwerk enthält wenig bearbeitete Bruchsteine, die mit nahezu horizontalen Lagerfugen im Verband verlegt werden. Die Lagerfuge des Bruchsteinmauerwerks ist in der Mauerdicke und in Abständen von höchstens 1,50 m auf einer Ebene auszugleichen.



Bild 4

Bruchstein-Schichtenmauerwerk

Schichtenmauerwerk

Schichtenmauerwerk besteht aus bearbeiteten Naturwerksteinen, die mit nahezu horizontalen Lagerfugen im Verband verlegt werden. Die Stein- und Schichthöhen dürfen variieren, jedoch sind die Lagerfugen im Mauerwerk in der ganzen Dicke in Abständen von höchstens 1,50 m auf einer Ebene auszugleichen. Während beim regelmäßigen Schichtenmauerwerk die Steinhöhen innerhalb einer Schicht immer gleich sind, können die Steinhöhen beim unregelmäßigen Schichtenmauerwerk in den Schichten in mäßigen Grenzen wechseln.

Bei Schichtenmauerwerk der Güteklasse N2 (Hammerrechtes Schichtenmauerwerk) sind die Lager- und Stoßflächen der Steine an der Maueransichts-

fläche mindestens 120 mm tief zu bearbeiten, so dass diese zueinander und zur Oberfläche ungefähr rechtwinklig stehen. Bei Schichtenmauerwerk der Güteklasse N3 sind die Lager- und Stoßflächen der Steine an der Maueransichtsfläche mindestens 150 mm tief zu bearbeiten, so dass diese zueinander und zur Oberfläche ungefähr rechtwinklig stehen. Die Fugendicke in der Sichtfläche darf nicht größer als 30 mm sein.

Schichtenmauerwerk findet insbesondere Anwendung bei Hochbauten als Mauerwerksfassaden sowie bei Brücken und Ingenieurbauten als Stützmauer- und Stropfeilerbekleidung. Die einzelnen Steine werden nach einem Versetzplan angefertigt, worin die Abmessungen genau festgelegt sind. Jedes Werkstück erhält eine Nummer entsprechend der Schicht und laufenden Nummerierung dieser Schicht. Der Versetzplan zeigt die Bruttomaße auf. Davon abgeleitete Maßlisten für die Fertigung zeigen die Nettoabmessung unter Berücksichtigung des Fugenabzuges.

Zur Erzielung eines lebhaften Fugenschnittes (Fugenschnitt) können die einzelnen Schichten beispielsweise im 5-cm-Sprung abgestuft werden. Eine Stoßfugenüberdeckung von mindestens 10 cm muss eingehalten werden.

Bei Gewölben, Kuppeln und dergleichen müssen die Lagerfugen über die ganze Gewölbedicke hindurchgehen (regelmäßiges Schichtenmauerwerk). Die Schichtsteine sind daher auf ihre ganze Tiefe in den Lagerfugen zu bearbeiten, während bei den Stoßflächen eine Bearbeitung auf 150 mm Tiefe genügt.



Bild 5

Schichtenmauerwerk (als Trockenmauer)

Quadermauerwerk

Quadermauerwerk zeigt Naturwerksteine, die in der ganzen Tiefe nach angegebenen Maßen bearbeitet und verfugt sind. Meistens handelt es sich hierbei um zumindest in den Lager- und Stoßfugen gesägten Naturstein. Die Oberflächenbearbeitung der Quadersteine ist beliebig. Quadermauerwerk kann für tragende Wände mit hohen Belastungen verwendet werden.



Bild 6
Quadermauerwerk

1.2 DIN EN 771-6 Mauersteine aus Naturstein

DIN EN 771-6 legt die Eigenschaften und Leistungsanforderungen an Mauersteine fest, die aus Naturstein mit einer Breite (Einbindetiefe) ≥ 80 mm hergestellt und vorwiegend als Normalmauersteine sowie Sicht- und Vormauersteine in tragenden oder nichttragenden Mauerwerksbauten verwendet werden.

Diese Mauersteine eignen sich für alle Arten von Schichtenmauerwerk oder unregelmäßigem Mauerwerk einschließlich einschaligen und zweischaligen Wänden, Trennwänden, Stützwänden und Schornsteinaußenmauerwerk. Sie können zum Brandschutz, Wärmeschutz, Schallschutz und Schalldämmung beitragen.

DIN EN 771-6 gilt ebenfalls für Mauersteine aus Naturstein mit einer nicht allseitig von Rechtecken begrenzten Form, Formsteine und Ergänzungssteine für den Innen- und Außenbereich.

Sie definiert die Anforderungen z. B. an Festigkeit, petrographische Zusammensetzung, Dichte, Poro-

sität, Maßgenauigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahme und Frostwiderstand und legt die Konformitätsbewertung des Produktes fest. Die Anforderungen an die Kennzeichnung der von dieser Europäischen Norm erfassten Produkte sind ebenfalls enthalten.

In DIN EN 771-6 werden zwei Arten von Mauersteinen unterschieden:

Mauersteine der Kategorie I

Das sind Mauersteine mit einer deklarierten Druckfestigkeit, wobei die Wahrscheinlichkeit des Nichterreichens dieser Festigkeit nicht über 5 % liegen darf. Die deklarierte Druckfestigkeit darf über den mittleren Wert oder den charakteristischen Wert ermittelt werden. Es ist ein 50%-Quantil ($p = 0,50$) für den Mittelwert bzw. ein 5%-Quantil ($p = 0,05$) für den charakteristischen Wert und ein Vertrauensniveau von 95 % anzuwenden. Die Konformitätsbescheinigung muss nach System 2+ (entsprechend Anhang ZA2 der DIN EN 771-6) erfolgen.

Mauersteine der Kategorie II

Das sind Mauersteine, die das Vertrauensniveau für Mauersteine der Kategorie I nicht erreichen. Die Konformitätsbescheinigung erfolgt nach System 4 (entsprechend Anhang ZA der DIN EN 771-6).

Neben den Angaben zu den Abmessungen sollten die Leistungserklärung und CE-Kennzeichnungen mindestens Angaben zur Druckfestigkeit, Rohdichte und Frostwiderstandsfähigkeit enthalten.

2 Konstruktionshinweise

In Deutschland gibt es keine bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Natursteinprodukte im Garten- und Landschaftsbau. Die harmonisierte Norm EN 771-6 ist weder in der Bauregelliste B Teil 1 noch in der Musterliste der technischen Baubestimmungen enthalten. Somit ist für solche Anwendungsfälle keine Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung erforderlich.

Tabelle 1

Grenzabmaße für Mauersteine aus Naturstein nach DIN EN 771-6

Maße	Maßhaltige Steine Gesägte Oberflächen			Quaderförm. Steine Behauene Oberflächen	Bruchsteine
	D1	D2	D3		
Länge	± 5 mm	± 2 mm	± 2 mm	± 15 mm	keine Anforderung
Breite	± 5 mm	± 2 mm	± 2 mm	keine Anforderung	keine Anforderung
Höhe	± 5 mm	± 2 mm	± 1 mm	± 15 mm	keine Anforderung
Ebenheit	0,5 % des Maßes der längsten Seite	0,3 % des Maßes der längsten Seite	0,3 % des Maßes der längsten Seite und ≤ ± 1 mm	± 1,5 % des Maßes der längsten Seite	keine Anforderung
Recht- winkligkeit	0,5 % des Maßes der längsten Seite	0,3 % des Maßes der längsten Seite	0,3 % des Maßes der längsten Seite	± 1,5 % des Maßes der längsten Seite	keine Anforderung
Plan- parallelität	keine Anforderung	keine Anforderung	≤ 1,0 mm	keine Anforderung	keine Anforderung

Für tragendes Mauerwerk und Schwergewichtsmauerwerk gelten nachstehende Verbandsregeln [Bautechnische Information BTI 1.1]:

- In den Maueransichtsflächen darf die Steinlänge das Fünffache der Steinhöhe nicht über- und die Steinhöhe nicht unterschreiten.
- Natursteinmauerwerk muss im ganzen Querschnitt handwerksgerecht sein.
- An der Vorder- und Rückfläche dürfen nirgends mehr als 3 Fugen zusammenstoßen.
- Stoßfugen dürfen nicht mehr als 2 Schichten durchgehen (bei Trockenmauerwerk in Ausnahmefällen auch 3 Schichten).
- Auf 2 Läufer- muss mindestens ein Binderstein kommen oder Läufer- und Binderschichten müssen einander abwechseln.
- Die Länge der Bindersteine muss mindestens das 1,5-fache der Steinhöhe und die Einbindetiefe in die Hintermauerung das 0,4-fache der Binderlänge, mindestens aber 12 cm betragen.
- Die Breite der Läufersteine (mit Ausnahme bei Verblend- und Vorsatzmauerwerk) muss mindestens der Steinhöhe entsprechen, jedoch mindestens 100 mm betragen.
- Die Überbindung der Stoßfugen bei orthogonalen Mauerwerksverbänden muss mindestens dem 0,4-fachen der Steinhöhe, bei Schichtenmauerwerk mindestens 100 mm, bei Quadermauerwerk mindestens 150 mm betragen.
- In der untersten Schicht und an Ecken sind die größten Steine (gegebenenfalls in Höhe von 2 Schichten) einzubauen.
- Unvermeidliche Zwischenräume im Inneren des Mauerwerks sind mit allseits von Mörtel umhüllten Steinresten auszufüllen. Entsprechendes gilt auch für breite Fugen in den Ansichtsflächen von Zyklopenmauerwerk, Bruchsteinmauerwerk und Schichtenmauerwerk.

Literatur und Quellen

[Bautechnische Information BTI 1.1.] Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V., Bautechnische Information BTI 1.1. Mauerwerk, 1996, DNV Würzburg

Methoden der Bauaufnahme

Es werden Vermessungsmethoden und neue Entwicklungen mit ihren Wirkprinzipien vorgestellt und ihre Eignung für konkrete Aufgabenstellungen für Bestandserfassungen und Dokumentationen eingeschätzt.

Andreas Bruschke

Schlagwörter: Bauaufnahme, Photogrammetrie, Bildauswertung, Tachymetrie, 3D-Scanner

Die Methoden der Bauaufnahme haben seit der klassischen Zeit enorme technologische Fortschritte erfahren und wurden durch gänzlich neue Verfahren erweitert. Bauaufnahme als Vermessung und maßstäblicher Aufzeichnung des Bestandes [Petzet, Mader, 1995] muss heute breiter diskutiert werden, insofern nicht nur Zeichnungen sondern auch Punktwolken, 3D-Oberflächen, Bildpläne und Orthofotos einzubeziehen sind. Nutzen und Wirtschaftlichkeit einer fachgerechten Bauaufnahme sind immer wieder überzeugend dargelegt [Schüller, 2005] und als unverzichtbar für die Werkplanung gefordert worden [Hädler, 2005]. »Ohne zuverlässige Pläne muss jedes Bauvorhaben scheitern« betont [Cramer, Breitling, 2007]. Maßstäbliche Bestandspläne sind Grundlage für das Verständnis bauhistorischer Entwicklung und räumlich-konstruktiver Zusammenhänge. Sie werden als Kartierungsgrundlage für baugeschichtliche Befunde, Materialeigenschaften, Schäden und zur Mengen-/Massenermittlung bzw. zur Abrechnungsgrundlage und Kostenkontrolle benötigt. Für Werkplanungen bei Sanierungen und Umbauten sind sie unverzichtbar.

Bauaufnahme ist die zweckgebundene Analyse des Bauwerkes unter Verwendung genauer und repro-

duzierbarer Vermessungsmethoden. Die Auswahl der richtigen Methode mit den richtigen Kosten und der richtigen Zeit erfordert die Beurteilung und Abwägung zwischen drei Schlüsselementen des Vermessungsprozesses:

- Selektion: Welche Informationen werden benötigt; durch wen und wie werden sie gewonnen?
- Messung: Welche Vermessungsmethode ist geeignet?
- Präsentation: Wie wird mit den Ergebnissen weitergearbeitet?

Nach [Measured and Drawn, 2009] sind dabei folgende Unterscheidungen zu treffen:

- direkte/indirekte Methoden: Werden die Messungen bei direkter Beobachtung am Objekt ausgeführt?
- grafisch/fotografisch: Sind die Ergebnisse selektierte Informationen in einer Zeichnung oder uninterpretierte Pixelgrafiken?
- 3D/2D: Wird mit dreidimensionalen Messergebnissen auch dreidimensional weitergearbeitet?

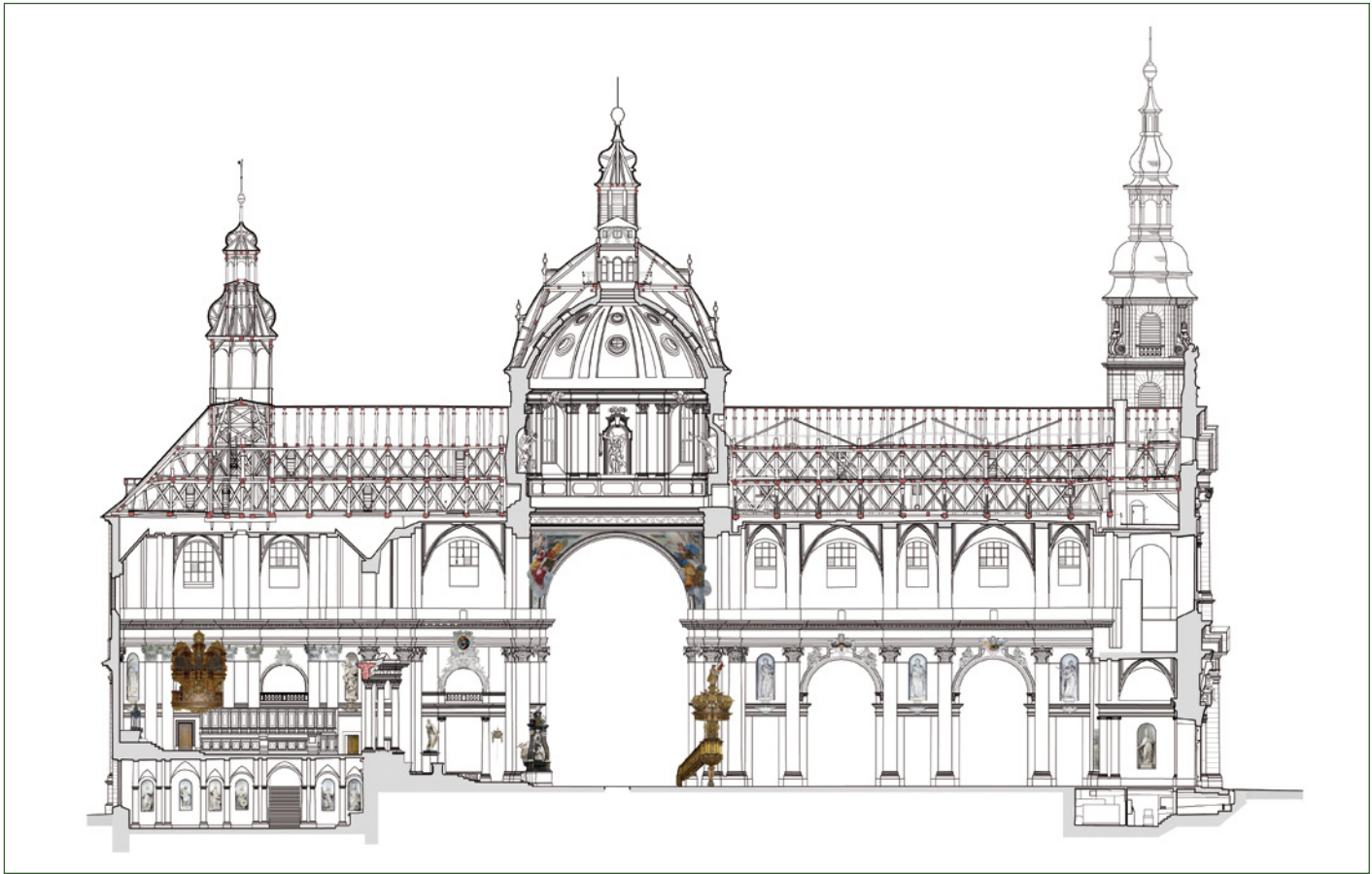


Bild 1 1 **Selektion**

Dom Fulda; Längsschnitt als Beispiel unterschiedlicher Darstellungstiefen und Genauigkeiten, überwiegend örtliche tachymetrische Vermessung, Darstellung von Ausstattungen durch entzerrte Bilder und Gewölbeausmalungen durch Orthofotos

Aufgrund der hohen technischen Anforderungen und der Hard- und Softwarevoraussetzungen werden heute Bauaufnahmen von mehr oder weniger spezialisierten Büros ausgeführt, womit der Definition des genauen Umfangs der Inhalte und benötigten Informationen eine entscheidende Rolle zukommt. Das wird häufig durch Anwendung von Genauigkeitsstufen nach [Eckstein, 2003] festgelegt. Dieses Konzept stammt aus den 80er Jahren und muss entsprechend der technischen Entwicklung und der äußerst vielfältigen sowie differenzierten Objektbedingungen und -eigenschaften überdacht werden.

Die Genauigkeitsstufen I und II lassen sich nicht nachverdichten oder »verbessern«. Bei Eingriffen in den Bestand eines Denkmals ist ein formgetreues Aufmaß mindestens der Genauigkeitsstufe III unverzichtbar (entspricht etwa der Informationsstufe II nach [DIN 1356-6]). Eine Bearbeitung kann nur in diesem Fall in mehreren zeitlich aufeinander

folgenden Phasen bzw. projektbegleitend geschehen = Nachverdichtung [Weferling, 2005]. Pauschale Vorgaben einer Genauigkeit sind für die Bauaufnahme eines konkreten Objektes nicht ausreichend. Die Anforderungen im Sinne einer maßlichen Genauigkeit sind relativ zur Bauteilgröße verschieden und stehen im Zusammenhang mit Maßtoleranzen im Bauwesen. Darstellungsgenauigkeit, -tiefe bzw. Informationsdichte sind nicht mit dem geometrischen Genauigkeitsbegriff gleichzusetzen. Sie sind individuell und differenziert festzulegen und stehen im Zusammenhang mit der konkreten Sanierungsaufgabe. Es können verschiedene Abschnitte (Bauteile, Ausstattungsteile) mit unterschiedlicher Informationsdichte aufgenommen werden. Standardspezifikationen berücksichtigen nicht die Besonderheiten eines konkreten Objektes (Bild 1). Es ist eine differenzierte Vorgehensweise und ein individuelles Anforderungskonzept notwendig.

Die Interaktion zwischen Vermesser und dem Objekt beeinflusst entscheidend die Informationen,

die am Denkmal erhalten und vermittelt werden. Direkte Methoden sind dabei im Vorteil. Zeichnerische Auswertungen sind immer Ergebnis einer bewussten Interpretation und Bewertung. Virtuelle Abbilder des Objektes sind nicht das Objekt selbst. Die daraus zu ziehenden Erkenntnisse sind nur so gut, wie es diese Abbilder ermöglichen. Sie ersetzen auch bei bester Qualität nicht die Auseinandersetzung mit dem Objekt.

2 Vermessungsmethoden

Eine stringente methodische Einteilung der Verfahren ist schwierig. Mit fortschreitender Entwicklung gibt es neue Technologien und Begriffe und immer mehr Überschneidungen. Das zeigt sich besonders bei der Gewinnung von 3D-Punktwolken durch Scanningmethoden und durch die Photogrammetrie. Bei der Gewinnung der Geometriedaten sind aber sowohl die Grundlagenmessung als auch reflektorlose Entfernungsmessung und die Bildaufnahme notwendig, die alle für den qualitativen Einsatz der verschiedenen Methoden von entscheidender Bedeutung sind.

2.1 Grundlagenmessung

Fortlaufende Aneinanderreihungen einzelner Messungen führen durch Fehlerfortpflanzung zu immer größer werdenden Spannungen und Differenzen. Letztlich können nicht direkt messbare Konstruktionsmaße wie Wand- und Deckenstärken kaum mehr sicher bestimmt werden. Oder die Lage vertikal übereinander liegender Bauteile wird nicht richtig erkannt, was im späteren Bauablauf zu großen Schwierigkeiten und Mehrkosten führen kann [Petzet, Mader, 1995], [Schuller, 2005], [Hädler, 2005]. Eine Bauaufnahme, die Grundlage für Werkplanungen ist, baut deshalb auf einem unabhängig vorab gemessenen Festpunktnetz mit höherer Genauigkeit auf. Heute ist die instrumentelle Messung von Polygonzügen mit dem Tachymeter Standard. Diese müssen zwingend als geschlossene Züge kontrolliert und ausgeglichen werden. Eine Mindestgenauigkeit von 2 mm/100 m ist der Standard.

2.2 Reflektorlose Entfernungsmessung

Der Einsatz von Tachymetern und Scannern hängt von der Reflexion des ausgesendeten Laserlichts auf der Oberfläche des Objektes ab. Die Art der Reflexion ist abhängig von der Oberflächenrauigkeit. Zum Beispiel liefern spiegelnde Oberflächen kein verwertbares Signal. Die Reflektanz hängt aber auch von der Entfernung und vom Einfallswinkel ab. Da der Messstrahl einen mit zunehmender Entfernung größeren Durchmesser hat (Spotgröße), wird die Entfernungsmessung auch durch die Zielgeometrie und den Einfallswinkel beeinflusst. Strecken auf eine Außenecke (Grat) werden deshalb systematisch zu lang, auf eine Innenecke (Kehle) zu kurz gemessen. Auch ein sehr schräger Einfallswinkel (Streiflicht) führt zu grob falschen Ergebnissen. Darauf muss mit entsprechender Messanordnung reagiert werden, indem Messpunkte vor den Ecken angezielt und diese dann verschnitten werden [Wiedemann, 2004]. Hier wird auch das Problem der von Laserscannern erzeugten Punktwolken deutlich. Bei automatischen Auswertungen entstehen geglättete bzw. gerundete »Ecken«, die aufwendig nachbearbeitet werden müssen.

2.3 Bildaufnahme

Fotos sind (näherungsweise) zentralperspektive Abbildungen. Dass Objektive teils deutlich von diesem einfachen mathematischen Modell abweichen, äußert sich als Verzeichnung durch sichtbar gekrümmte Abbildung eigentlich gerader Linien (z. B. Architekturkanten). Neben der Korrektur der Verzeichnung ist für photogrammetrische Auswertungen auch eine vollständige Kenntnis und Reproduzierbarkeit der gesamten Abbildungsgeometrie notwendig. Diese wird durch Kalibrierung bestimmt. Aus Fotos werden Messbilder. Bei der digitalen Fotografie ist die Anzahl der Sensorelemente das Maß für die geometrische Auflösung. Diese hat entscheidenden Einfluss auf die Planung der Aufnahmedispositionen. Die Überlegung beginnt beim gewünschten Maßstab für das Endergebnis,

in dem eine pixelfreie Betrachtung bzw. ein Ausdruck ohne Verpixelung möglich sein soll. Näherungsweise können folgende Verhältnisgrößen zwischen Abbildungsmaßstab und Pixelgröße am Objekt angenommen werden:

$$M 1:50 < 4 \text{ mm} / M 1:25 < 2 \text{ mm} / M 1:10 < 1 \text{ mm}$$

Aufnahmen sollten weitestgehend frontal zum Objekt erfolgen, um nicht nur eventuelle Verdeckungen zu vermeiden, sondern auch um einen gleichen Bildmaßstab zu erzielen. Starke Schrägaufnahmen haben eine ähnliche Wirkung auf Abstand und »Verzerrung« der Pixel wie auf Punktabstand (Objektauflösung) und Leuchtkreisdurchmesser von Laserscanneraufnahmen.

Die Qualitätsanforderungen an photogrammetrische Aufnahmen beschränken sich jedoch nicht nur auf geometrische Fragen. Sie umfassen den gesamten Komplex der Fotografie. Neben der optischen Abbildungsschärfe (Tiefenschärfe und Beugungsschärfe) sind Licht und Farbe weitere Komponenten qualitativ hochwertiger Aufnahmen.

Die Planung der Aufnahmedispositionen kann sehr flexibel erfolgen. Platzverhältnisse, Aufnahmeabstand und Objektiv sind aufeinander abzustimmen. Sofern es die Umstände zulassen, kommen Hochstative, Arbeitsbühnen, Hubschrauber und in letzter Zeit auch ferngesteuerte Multikopter zum Einsatz. Die Photogrammetrie ist das einzige Verfahren, dass nicht auf einem festen Gerätestandpunkt angewiesen und somit prädestiniert für die Vermessung hoher oder unzugänglicher Bauwerke ist.

2.4 Direkte Techniken

Cramer, Breiting [2007] stellt die Vorteile der örtlichen Vermessung und Auftragung der Arbeitsweise mit Aufmaßskizzen und deren Umsetzung im Büro gegenüber: »Das Vor-Ort-Prinzip stellt sicher, dass durch die Anschauung des Objektes Messfehler sofort erkannt werden. Im langsamen Fortschreiten der Zeichnung von dem übergeordneten Bezugsnetz bis zur Darstellung der Binnenstruktur und der Details bauen alle Schritte systematisch auf einander auf. Fehler werden sofort erkannt und lassen sich leicht zurückverfolgen.« Diese Vorteile gelten für das klassische Handaufmaß wie auch für

das tachymetrische Aufmaß mit dem angeschlossenen Notebook und dem Online-Zeichnen im CAD. Gegenüber den indirekten Methoden werden die Vorteile der örtlichen Vermessung noch deutlicher, nicht nur wegen häufig unvermeidlicher Lücken beim Scannen oder wegen Verdeckungen in photogrammetrischen Aufnahmen sondern insbesondere auch wegen des fehlenden Kontakts zum Objekt, den so nicht möglichen Beobachtungen bei vielleicht unterschiedlichem Licht, der Oberflächen und der Materialeigenschaften. Direkte Aufmaßtechniken liefern Bestandspläne aus »erster Hand«.

Handaufmaß

Das klassische Handaufmaß, aufbauend auf einem dichten Netz von Bezugslinien, sichert zweifelsohne den intensivsten Kontakt zum Objekt und damit die gründlichste Beobachtung der Formen und Befunde. Um das Aufmaß und die zu erfassenden Verformungen nachvollziehbar zu gestalten, werden alle gemessenen Maße angeschrieben. Detailformen bzw. Binnenstrukturen werden allerdings porträtierend gezeichnet. Damit werden verschiedene Inhalte nicht mit gleicher homogener Genauigkeit dargestellt. Aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen spielt heute das Handaufmaß nur noch eine geringe Rolle, z. B. bei der örtlichen Überprüfung und Ergänzung von tachymetrischen oder photogrammetrischen Auswertungen.

Theodolit und Tachymeter

Die klassischen geodätischen Instrumente sind der Theodolit bzw. das Tachymeter. Bei beiden Geräten werden Winkel bzw. Richtungen gemessen, getrennt als Horizontal- und als Vertikalwinkel registriert. Von zwei Standpunkten aus angemessene Ziele werden in einem räumlichen Dreieck dreidimensional bestimmt. Dieses als Vorwärtseinschneiden bezeichnete Verfahren wird neben der Bestimmung von photogrammetrischen Passpunkten dann eingesetzt, wenn die Entfernungsmessung mit Laser nicht funktioniert oder besondere Genauigkeiten gefordert sind.

Das wichtigste Werkzeug für die örtliche Vermessung von Bauwerken ist jedoch das Tachymeter.

Zur Streckenmessung wird ein in die Fernrothroptik integrierter Laser genutzt. Bei dem Impulslaufzeitverfahren wird ein Laserpuls ausgesendet, der von der Oberfläche des angezielten Punktes reflektiert wird. Aus der Zeitdifferenz zum registrierten Rücksignal wird die Strecke berechnet. Der Laser dient auch als »Zeiger«. Mit ihm kann der zu messende Punkt angezielt werden, ohne das Fernrohr mit dem Fadenkreuz zu benutzen.

Jeder aufzunehmende Punkt wird automatisch mit den Koordinatendifferenzen zum Standpunkt Δx , Δy , Δz gespeichert. Das Tachymeter funktioniert also praktisch als »3D-Maus«, mit der in sehr rascher Geschwindigkeit die in der Umgebung zu messenden Punkte mit dem »Zeiger« angezielt und deren Koordinaten sofort gespeichert werden. Während ein Scanner »wahllos« ein Punktraster erzeugt, werden mit dem Tachymeter bewusst und überlegt die notwendigen Punkte ausgewählt und gemessen.

Die Praktikabilität dieser Arbeitsweise vollendet sich aber erst dann, wenn die gemessenen Punkte online in den »Kartiertisch« CAD übertragen und somit die Bauaufnahmezeichnungen traditionell vor Ort fertiggestellt werden.

2.5 Indirekte Techniken

Als indirekte Techniken gelten alle bildbasierenden und Abtastverfahren, also Photogrammetrie und Scanning. Da Informationen und Erkenntnisse nur aus »zweiter Hand«, aus den Bildern bzw. Punktwolken gewonnen werden, liegt der Schwerpunkt auf der Planung und Realisierung optimaler Bedingungen für die örtliche technische Aufnahme.

Bildentzerrung

Durch die Verwendung von Digitalaufnahmen und der Verfügbarkeit anwenderfreundlicher Programme hat sich die Bildentzerrung als einfaches Verfahren sehr verbreitet. Grundsätzlich ist sie jedoch nur für ebene Oberflächen geeignet, die keine Vor- und Rücksprünge aufweisen und die zudem nicht gekrümmt oder verformt sein dürfen. Planparallele Fotografien werden durch die Beseitigung projek-

tiver Verzerrungen in Folge schräger oder geneigter Aufnahmen erzeugt. Diese Entzerrung geschieht durch Einpassen auf in der Rissebene liegender, gewöhnlich geodätisch gemessener Punkte. Perspektivische Verzerrungen durch nicht in der Ebene liegende Bauteile bleiben erhalten (Umklappungen), führen zu Maßstabsfehlern und können nur durch die Entzerrung auf entsprechend weitere Ebenen verringert werden. Die Montage benachbarter Bilder führt an diesen Stellen zu Sprüngen oder Lücken.

Unter Mosaikbildung ist die Montage mehrerer entzerrter Bilder zu einem Bildplan zu verstehen. Die Bilder müssen dabei sowohl geometrisch zusammenpassen als auch radiometrisch, das heißt in Helligkeit, Kontrast und Farbzusammensetzung. Dabei werden die unterschiedlichen Bildparameter anhand der Histogramme in mehrfach abgedeckten Bereichen angeglichen [Wiedemann, 2004]. Wichtig ist deshalb, dass die Aufnahmen im Original-RAW-Format vorliegen.

Orthofotos

Orthofotos als wirklich orthogonale und im Gegensatz zu Entzerrungen in allen Teilen maßstabsgerechte Abbildung auf eine Rissebene und damit mit einer Plandarstellung vergleichbar, können nur auf der Grundlage dreidimensionaler Oberflächenmodelle erzeugt werden. Die 3D-Oberflächen sind durch sukzessive Vermessung von Bauteilkanten und Flächenbildung oder als Dreiecksvermaschung von Punktwolken erzeugt worden, die im Ergebnis von Scan-Verfahren bzw. der fotogrammetrischen SfM-Methode gewonnen wurden.

Die geometrische Qualität der Orthofotos hängt von der Dichte der Punktwolke und der Größe der durch die Vermaschung entstandenen Dreiecke ab. Die Vermaschung führt auf jeden Fall zur Glättung von Bauteil- und Konturkanten. Die 3D-Oberflächen müssen gegebenenfalls nachmodelliert werden.

Aus colorierten Punktwolken von Laserscannern direkt erzeugte Orthofotos sind technisch gesehen ebenfalls ein maßstabsgerechtes Pixelbild, jedoch dem fotografisch erzeugten Orthofoto nicht vergleichbar. Deshalb sind zur Texturierung von aus

Scan-Verfahren gewonnenen 3D-Oberflächen externe Aufnahmen erforderlich. Die beim Scannen nicht erfassten Bereiche werden als Löcher sichtbar.

Orthofotos sind durch den in allen Teilen gesicherten Maßstab und bei hoher Bildqualität eine entscheidende Interpretationshilfe, können in CAD-Pläne eingefügt bzw. hinterlegt und soweit nötig hochgezeichnet werden.

Matching-Verfahren

Automatisierte Verfahren der Bildauswertung ermöglichen die dreidimensionale Rekonstruktion der aufgenommenen Oberflächen. Sie stammen aus dem Bereich Computer Vision (maschinelle Wahrnehmung von Bildinhalten), setzen größere Rechnerleistung voraus und haben unter dem Begriff Structure-from-Motion (SfM) in der Architektur- und Archäologiedokumentation Einzug gehalten. Dabei wird mit »Motion« ausgedrückt, dass bei einer Serie sich stark überlappender Bilder zwischen den Bildern eine Bewegung stattgefunden hat. In diesem Sinne kann SfM auch unter Mehrbildphotogrammetrie eingeordnet werden. Die automatische Identifizierung von Referenzpunkten aus dem Vergleich von Texturmerkmalen ist die Grundlage für die gegenseitige Orientierung der Aufnahmen und der anschließenden Berechnung. Das Ergebnis ist zuerst eine Punktwolke in der Dichte und Genauigkeit der Auflösung der verwendeten Bilder bzw. die daraus berechnete texturierte 3D-Oberfläche.

Da die maschinelle Bilderkennung eine wahrnehmbare Textur voraussetzt, sind dieser Methode bei glatt schwarzen oder weißen bzw. spiegelnden Oberflächen Grenzen gesetzt. Das Verfahren ist durch flexible Aufnahmedispositionen vielseitig einsetzbar, wie die Photogrammetrie grundsätzlich. Durch Aufnahmen von Arbeitsbühnen, Hubschraubern und Multikoptern, durch beliebige Aufnahmeabstände in Kombination mit variablen Objektbrennweiten stellt diese Technologie für geeignete Objekte nicht nur eine Alternative zu 3D-Scannern dar, sondern erschließt neue Aufgabenfelder. Das einzige Aufnahmegerät ist die Digitalkamera –

preiswert im Vergleich zu den 3D-Scannern – und verwendbar ohne Stativ von den Aufnahmeplattformen aus.

Mehrbildphotogrammetrie

Jede 3D-Vermessung aus Bildern setzt mindestens zwei oder mehrere räumlich getrennte Aufnahmen voraus. Das zuerst von Meydenbauer für die photogrammetrische Vermessung von Architektur entwickelte Einschnideverfahren geht von zwei konvergenten Aufnahmen aus, deren Standpunkte und Aufnahmerichtungen eingemessen wurden. Damit ist es mathematisch direkt mit dem geodätischen Vorwärtseinschneiden vergleichbar, der Punktbestimmung in räumlichen Dreiecken aus Richtungsbündeln. Identische Punkte werden in mindestens zwei Bildern nacheinander angemessen und so die 3D-Koordinaten des Objektpunktes bestimmt. Werden weitere Bilder hinzugefügt, kann ein Bildverband aufgebaut und als photogrammetrische Triangulation gerechnet werden. Für den gesamten Bildverband ist nur eine minimale Anzahl von gut verteilten Passpunkten erforderlich. Es lassen sich somit Fassadenbereiche erfassen, die nicht einsehbar sind. Sie werden von entsprechenden Plattformen aus aufgenommen und durch photogrammetrische Triangulation in das Gesamtsystem eingebunden.

Während die Messung nach dem Einschnideverfahren eben nur für in verschiedenen Bildern eindeutig identifizierbare Punkte möglich ist, kann bei Stereoaufnahmen ganz anders verfahren werden. Mit der Stereophotogrammetrie besteht in besonderer Weise die Möglichkeit, Oberflächen linientreu räumlich exakt zu vermessen. Durch die Aufnahme von zwei Messbildern mit parallelen Aufnahmeachsen und deren anschließender stereoskopischer Auswertung entsteht für den Betrachter ein virtuelles Modell der Oberfläche. Durch die dreidimensionale Führung einer Messmarke auf diesem räumlichen Modell werden zu messenden Linien praktisch on-line beim »Abfahren« des Kurvenverlaufes mit einer bei keinem anderen Verfahren erreichbaren Punktdichte und Geschwindigkeit registriert. Die Stereoauswertung wird standardmäßig

für steingerechte Auswertungen und Darstellung von Natursteinfassaden mit Maßwerk eingesetzt.

3D-Scanner

Es werden Triangulations-, Phasenlaufzeit- und Impulslaufzeitverfahren unterschieden. Bei Scannern mit Triangulationsverfahren (Streifenscanner) sind Laserpuls und Empfangssensor seitlich in einem festen Abstand angeordnet. Aus dem gemessenen Winkel zwischen ausgesendetem und empfangenem Laserpuls werden die Punktkoordinaten bestimmt. Diese Scanner sind nur für kurze Distanzen bis ca. 2 m einsetzbar, erreichen aber Genauigkeiten bis 0,1 mm. Beim Phasenlaufzeitverfahren wird kontinuierlich ein modulierte Laserlicht ausgesendet und permanent mit der Phasenlage der Modulationswelle des reflektierten Lichts verglichen. Die Phasenlage ist proportional der Entfernung eines Reststücks einer Wellenlänge. Zur Klärung der Eindeutigkeit müssen verschiedene Modulationswellen genutzt werden. Das Verfahren ist extrem schnell.

Das Abtasten des Objektes geschieht durch gleichmäßige systematische Ablenkung des Messstrahls durch zwei rotierende Spiegel oder Prismen in regelmäßigen horizontalen und vertikalen Schritten, häufig im Vollkreis oder in einem gewählten Ausschnitt. Neben der Genauigkeit der Streckenmessung ist die Schrittweite/Abtastrate ein weiteres Genauigkeitskriterium des Systems. Die Schrittweite (Winkelauflösung) ist immer gleich, folglich nimmt die Objektauflösung (der Abstand benachbarter Punkte) mit zunehmender Entfernung ab. Der Einfallswinkel auf die Objektoberfläche hat nicht nur Einfluss auf die Größe der Leuchteilipse, sondern auch auf die Objektauflösung. Der Punkt-Abstand vergrößert sich bei einem Einfallswinkel von 45° um 40 %, bei 60° schon um 100 %. Also ist bei der Planung der Aufnahmestandpunkte ähnlich vorzugehen wie bei der Bildaufnahme. Neben eventuellen Verschattungen ist zu berücksichtigen, welcher Auftreffwinkel maximal noch möglich ist. Da der Scanner fest am Boden stehen muss, ist der Aufnahmebereich nach oben wegen des immer steileren Einfallswinkels begrenzt.

3 Präsentation

Aus technischer Sicht können die Ergebnisse der Vermessungen sehr vielseitig sein: direkt oder indirekt gemessene Punkte bzw. Linien, 2D- oder 3D-Koordinaten, Punktwolken, 3D-Flächen, Vektorgrafik oder Pixel. In aller Regel wird mit zweidimensionalen Grafiken gearbeitet.

Wenn dreidimensional gemessen wird, ist die Erwartungshaltung groß, auch Ergebnisse dreidimensional zu bekommen. Anwendungen und Rahmenbedingungen für sogenannte Drahtmodelle, Punktwolken oder 3D-Oberflächen als Ergebnis von Dreiecksvermaschungen sind bisher nicht allgemeingültig erfasst. Die Grenze zwischen 3D-Visualisierungen und Virtual-Reality ist offen. Die Schwierigkeit besteht weniger in der Festlegung von Datenformaten als in der Möglichkeit einer eindeutigen Definition der für einen bestimmten Zweck benötigten Aussageschärfe, der Bestimmung von Detaillierungsgrad/Auflösung bzw. der Generalisierung durch Reduktion auf das Wesentliche.

4 Vermessungskonzepte

Die verschiedenen Verfahren können nicht pauschal verglichen oder gar in wirtschaftlicher Hinsicht bewertet werden. Eine Abwägung ist ausschließlich aufgabenspezifisch und objektkonkret unter Berücksichtigung der jeweiligen technologischen Rahmenbedingungen möglich. Da jedes Denkmal ein Unikat ist, entzieht es sich einer schematischen Vorgehensweise. Das individuelle Vermessungskonzept stellt eine eigene schöpferische Leistung dar und ist erster Baustein des denkmalpflegerischen Projektmanagements [Fuchsberger, 2005]. Es stellt sicher, welche Informationen alle an der Planung beteiligten Fachdisziplinen benötigen, definiert die Genauigkeitsanforderungen, die entsprechend der örtlichen Situation zu integrierenden Techniken, deren konkreten Einsatzbedingungen und legt Kontrollmechanismen fest, die objektiv vergleichbare Ergebnisse ermöglichen [Measured and Drawn, 2009], [Metric Survey Specification, 2000].

Literatur und Quellen

- [Petzet, Mader, 1995] Petzet, M., Mader, G., (1995):
Praktische Denkmalpflege. Verlag W. Kohlhammer,
Köln 2. Auflage
- [Schuller, 2005] Schuller, M., (2005): Building Archaeology. In: Bauaufnahme in der Denkmalpflege, Andreas Bruschke (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag
- [Hädler, 2004] Hädler, E., (2004): Sanierungsvoruntersuchung und Bauforschung als Teil des Planungsprozesses. In: Architekten in der Denkmalpflege, Horst Thomas (Hrsg.), Rudolf Müller Verlag, Köln
- [Cramer, Breitling, 2007] Cramer, J., Breitling, St., (2007):
Architektur im Bestand – Planung Entwurf Ausführung. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin
- [Measured and Drawn, 2009] Measured and Drawn, (2009): Techniques and practice for the metric survey of historic buildings. Published by English Heritage, 2. Ausgabe
- [Eckstein, 2003] Eckstein, G., (2003): Empfehlungen für Baudokumentationen. Arbeitsheft 7, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Konrad Theiss Verlag Stuttgart, aktuelle Auflage
- [Bruschke, 2014] Bruschke, A., (2014): Hoher Dom zu Fulda und Porta Nigra in Trier: Was können heutige Bauaufnahmefethoden leisten und sind die »Genauigkeitsstufen« noch zeitgemäß? In Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart, Patitz, Grassegger, Wölbert (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart
- [Weferling, 2005] Weferling, U., (2005): Randbedingungen und Anwendungspotentiale moderner Bauaufnahmefethoden – ein Plädoyer für eine mehrstufige, projektbegleitende Bauaufnahme. In: Bauaufnahme in der Denkmalpflege, Andreas Bruschke (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag
- [Wiedemann, 2004] Wiedemann, A., (2004): Handbuch Bauwerksvermessung, Geodäsie-Photogrammetrie-Laserscanning. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin
- [Fuchsberger, 2005] Fuchsberger, H., (2005): Qualitätssicherung in der Bestandsaufnahme – das Beispiel Schöndorfer Platz in Hallein. In: Bauaufnahme in der Denkmalpflege, Andreas Bruschke (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag
- [Metric Survey Specification, 2000] Metric Survey Specification for English Heritage. Published by English Heritage, 2000

Bestands- und Schadenskartierung an Natursteinbauwerken

Die Bestands- und Schadenskartierung ist eine flächendeckende und zerstörungsfreie Aufnahme historischer Bauwerke oder Objekte. Sie ist bei jedem geplanten Eingriff eine notwendige Grundlage für einen geordneten Bauablauf mit transparenten Entscheidungen und Überschaubarkeit bei den Kosten. Durch logische Strukturierung wird hierbei eine objektive Aussage über den Zustand des Bauteiles oder Gebäudes angestrebt und die Bewertungen werden durch ein detailliertes Schadensglossar nachvollziehbar.

Hermann Schäfer

Schlagwörter: Kartierung, Bestandserfassung, Schadenserfassung, Maßnahmenplanung, Schadenstypen, Kartierungssoftware

1 Grundlagen der Kartierung

»Kartierung« bezeichnet eine systematische und vollflächige Erfassung von Befunden und deren grafische Darstellungen. Ziel der Kartierung ist die Erfassung des Objektes mit exakten, objektiven und nachprüfbareren Aussagen. Eine gewisse Subjektivität ist einer Kartierung jedoch immer zueigen, die Systematik und ein ausführliches Glossar machen die Kartierung aber nachvollziehbar. Im Gegensatz zur Kartierung ist die Dokumentation ein Beleg über tatsächlich durchgeführte Maßnahmen und wird zeitnah nach einer Instandsetzungskampagne von den Ausführenden erstellt.

Die Kartierung gliedert sich grob in folgende Bereiche:

- Aufnahme des Bestandes
- Aufnahme des Zustandes (Schadenskartierung)

Die Bedarfsplanung ist keine Kartierung im strengen Definitionssinn, der Maßnahmenplan zur Instandsetzung ist jedoch meist Hauptziel des Auftraggebers einer Kartierung. Die Darstellung des Bedarfs folgt aus der Kartierung unter Berücksichtigung der Techniken und Methoden zur Instandsetzung und Konservierung. Auf dieser Grundlage können Massen ermittelt und die Leistungsver-

zeichnisse erstellt werden. Die Kartierung kann Fragen zur Schadensdynamik beantworten und bildet zudem auch eine Grundlage für die Bauforschung.

1.1 Bestandsaufnahme

Unter die Bestandsaufnahme fallen die Materialkartierung und die lithologische Kartierung, die Kartierung von Merkmalen am Objekt wie z. B. Oberflächenbearbeitung, Zeichen und Inschriften sowie Farbfassungen und der gesamte Bereich der Oberflächenbeläge. Auch Verluste wie z. B. das Fehlen einer Kreuzblume oder einer Figur fallen ebenfalls in den Bereich der Bestandsaufnahme.

1.2 Schadenskartierung

Die Schadenskartierung beschreibt den Zustand eines Bauteiles oder eines Bauabschnittes in Bezug auf seinen Schädigungsgrad und die Art seiner Schädigung sowie deren Begleitumstände. Die Schadenskartierung bezieht sich auf die reine Erscheinungsform der Schäden. Vermutungen, z. B. über Schadensursachen sind nicht Gegenstand der Kartierung, können aber in einem gesonderten

Textanhang getroffen, durch die Kartierung untermauert und diskutiert werden. Dadurch behält die Schadenskartierung auch dann ihre Gültigkeit, wenn neue Erkenntnisse zu den Schadenprozessen vorliegen.

Der Schaden an einem Natursteinbauwerk weist in der Regel eine hohe Komplexität auf. Um dem Ziel einer weitestgehend objektiven Schadensbeschreibung nahe zu kommen, wurden in der Vergangenheit verschiedene Kategorisierungen entwickelt [Fitzner, Kownatzki, 1995], [Eickelberg et al., 1990]. Die Phänomene werden hierbei nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aufgenommen. In der praktischen Durchführung hat sich bewährt, einen Schaden durch sein akutes Schadensbild, den aufgetretenen Substanzverlust und die Intensität des Gesamtschadens zu beschreiben.

Akutes Schadensbild

Unter akutem Schadensbild wird ein noch im Prozess befindlicher Schaden, z. B. Absanden, Schuppenbildung, Schalenbildung verstanden. Somit sind Fehlstellen, z. B. durch mechanische Beschädigung kein »akuter« Schaden. Beschreibungen der einzelnen Schadensformen finden sich in verschiedenen Musterglossaren [Grassegger, 1997], [Simon et al., 2010], [Fitzner, Kownatzki, 1995], es ist aber unumgänglich, objektspezifisch ein spezielles Schadensglossar anzufertigen. Hierbei werden exemplarisch die Schäden in Bildform dargestellt und die Ausprägung wie auch die Begleitumstände und der vermutete Entstehungsmechanismus wird beschrieben. Das Glossar kann ergänzt werden durch die Aufführung der beabsichtigten Maßnahmen zur Instandsetzung.

Schadensintensität

Mit der Beurteilung der Intensität eines Schadens wird die Gesamt-Wirktiefe der Schädigung erfasst. Das Maß des Substanzverlustes alleine ist hier noch nicht hinreichend aussagekräftig, wie das Beispiel des Schadensbildes »Schalenbildung« oder die Problematik des Gesamtverlustes eines Bauelementes zeigt. Im ersten Fall liegt ein akuter Schaden ohne Substanzverlust vor, im zweiten Fall ein reiner Substanzverlust ohne akuten Schaden. Die Beurteilung der Schadensintensität wird sich auch an der Bedeutung des betreffenden Bauteiles für das gesamte Objekt orientieren und sie sollte zudem mit der Notwendigkeit und Dringlichkeit von Maßnahmen zur Erhaltung korrelieren [Fitzner, Kownatzki, 1995]. Eine messtechnische Erfassung der Schadenstiefe ist nur an Referenzstellen möglich, etwa durch Bohrwiderstandsmessung, Ultraschall oder Bauradar. Eine flächendeckende Kartierung der Schadensintensität stützt sich somit immer auf die Erfahrung des Ausführenden und bleibt mit einem subjektiven Faktor behaftet.

Substanzverlust

In der Kategorie Substanzverlust wird die Auswirkung des akuten Schadens auf den Bestand beschrieben. Eine Differenzierung erfolgt durch die Angabe der Menge und der Art des Substanzverlustes. Die Verlustmenge kann bei einer flächenbezogenen Kartierung in »cm-Verlusttiefe« angegeben werden. Die Art des Verlustes wird verbal beschrieben, z. B. reliefartig, Schalenverlust.

Diese drei Kartierungsmerkmale eines Schadens (Tabelle 1) geben schon jedes für sich bereits Auskunft auf verschiedene Fragestellungen. Der Plan

Tabelle 1

Differenzierung der Schadenskartierung

Akutes Schadensbild	Schadensintensität	Substanzverlust
Schadenstypus	Wirktiefe des Schadens	Rückwitterungstiefe, Verlustmenge
Konkretisierung der Bezeichnungen im Schadensglossar	Schätzung der Zone mit Verlust oder abweichenden Eigenschaften	evtl. weitere Differenzierung in »Verlusttiefe« und »Verlустаusprägung«
z. B. Absanden, Abschuppen, Schalenbildung	z. B. Nummerierung verbale Beschreibung: gering, deutlich, stark	Verlusttiefe in mm; Ausprägung z. B. reliefartig, Schalenverlust

der Schadensarten (akutes Schadensbild) gibt grobe Hinweise auf die Art der anzuwendenden Instandsetzungstechniken und ermöglicht eine verfeinerte Suche nach den Schadensursachen. Der Plan der Schadensintensität zeigt die Schadensschwerpunkte, ermöglicht eine grobe Abschätzung des notwendigen Aufwandes und führt zu einer sinnvollen Aufteilung in eventuelle Bauabschnitte. Der Plan des Substanzverlustes ergänzt die beiden vorhergehenden Kartierungen. Hierdurch wird die Entscheidung über die Auswahl der jeweiligen Instandsetzungstechniken nachvollziehbar.

Problematik von Anlagerungen

Bei fest anhaftenden Schmutz oder Verkrustungen ist eine direkte Beurteilung der Steinoberfläche nicht möglich. Aufgrund der Kenntnis der Entstehungsmechanismen der Krustenbildung und der Wirkung von Krusten auf die Steinoberflächen kann jedoch von einer Schädigung des Steingefüges an solchen Stellen ausgegangen und stichprobenartig überprüft werden. Bei entsprechendem Befund bietet es sich somit an, z. B. fest sitzenden Krusten als Schadensmerkmal zu kartieren.

1.3 Maßnahmenplanung

Ein Maßnahmenplan, der sämtliche projektierte Arbeiten an einem Objekt darstellt, wird schnell unübersichtlich. Daher werden die für die einzelnen Gewerke vorgesehenen Arbeiten in gewerkebezogenen Maßnahmenplänen zusammengestellt. In diesen Plänen sind zusätzlich diejenigen Arbeiten der anderen Gewerke darzustellen, welche Auswirkungen auf das betreffende Gewerk haben. So ist z. B. ein geplanter Steinaustausch für das Gewerk »Reinigung« insofern interessant, als an diesen Steinen keine Reinigungen durchgeführt werden müssen.

2 Genauigkeit der Erfassung

2.1 Zugang zum Objekt

Eine Kartierung fußt auf einem direkten haptischen Zugang zu allen wesentlichen Teilen des Objekts.

Im Einzelfall ist abzuwägen, ob das später notwendige Arbeitsgerüst bereits für die Kartierung errichtet wird oder ob zunächst ein einfaches Untersuchungsgerüst gestellt wird. Ist eine Instandsetzungsmaßnahme zeitlich noch nicht festgelegt und eine Gerüststellung unverhältnismäßig aufwendig, so ist die Kartierung von einer Hubarbeitsbühne aus zu erwägen. Hierbei ist zwar die bessere Zugänglichkeit, z. B. von Gesimsuntersichten vorteilhaft und durch das Fehlen des Gerüstrasters die Übersichtlichkeit besser, allerdings muss innerhalb eines durch den Aufstellungspunkt eingeschränkten Abschnittes sofort die komplette Kartierung bis hin zur Maßnahmenfestlegung durchgeführt werden. Die Aufnahme vor Ort findet somit unter einem hohen Zeitdruck statt.

Wenn all diese Hilfsmittel nicht zur Verfügung stehen, muss eine Distanzkartierung vom Boden aus durchgeführt werden. Auch mit Unterstützung durch ein Spektiv oder Fernglas auf einem Stativ ist wegen fehlender haptischer Möglichkeiten hierbei ein hoher Unsicherheitsfaktor anzusetzen. Die Tatsache, dass von einem festen Standort aus gearbeitet werden muss und somit meist nur eine einzige Perspektive zur Verfügung steht, trägt weiter zur Unsicherheit bei. Distanzkartierungen bieten sich an, wenn kleinere, unzugängliche Lücken ergänzt werden müssen und vergleichbare Situationen an anderer Stelle zugänglich sind. Die Art des Zugangs zum Objekt muss in der Kartierung eindeutig vermerkt sein.

2.2 Planbasis, Kartierungsgrundlage

Als Grundlage für die Kartierung dienen möglichst lückenlose zeichnerische oder fotografische Ansichten bzw. Abwicklungen des Objektes. Prinzipiell geeignet sind zweidimensionale Darstellungen, die maßstäblich und frei von Verzerrungen sind. Die Genauigkeitsstufe [Eckstein, 1999] der Kartierungsgrundlage muss der beabsichtigten Kartierungstiefe angepasst sein. Verdeckte Flächen sollten aus einer anderen Perspektive abgebildet werden. Da hierbei häufig auch die Übersichtlichkeit leidet, ist zu prüfen, ob die Information nicht auch anderweitig, z. B. durch einen in der Hauptansicht eingefügten Text oder durch grafische Symbole dargestellt werden kann. Der Mehrauf-

wand für eine gesonderte Darstellung verdeckter Flächen ist jedoch immer gegen den möglichen Zugewinn an Informationen abzuwägen.

Vektorzeichnungen können bei weitgehend ebenen Objekten aus Einbildentzerrungen, bei stärker zerklüfteten Bauwerken als Stereophotogrammetrie erstellt werden. Schon mit der Auswertung einer Einbildentzerrung kann, evtl. durch Ergänzungen im Handaufmaß, eine exakt orthogonale Darstellung erzielt werden. Die Stereophotogrammetrie ermöglicht darüber hinaus die orthogonale Darstellung komplexer Geometrien und das Anlegen von Schnitten in verschiedenen Ebenen.

Fotografische Ansichten sind auch bei weitgehend ebenen Flächen nur mit Einschränkungen geeignet. Wichtig ist eine gute Durchzeichnung der Schattenbereiche und ein allgemein eher niedriger Kontrastumfang. Die perspektivischen Verzerrungen lassen sich durch spezielle Software zwar in definierten Ebenen korrigieren, aber es entstehen z. B. bei Schrägaufnahme von tiefen Fensterlaibungen unterschiedliche Flächengrößen. Auch sind Übergänge verschiedener Ebenen an Gesimsen immer problembehaftet. Die Berücksichtigung dieser Details erfordert schon bei der Aufnahme einen hohen Aufwand und sollte im Vorfeld der Erstellung mit dem Ausführenden abgestimmt werden.

Bei der späteren Verarbeitung sind Vektorzeichnungen den Pixelbildern oder Scans als Kartierungsgrundlage wegen der geringeren Datenmenge und der somit höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit deutlich überlegen.

Durch den Fortschritt der Technik bestehen zunehmend wirtschaftliche Möglichkeiten, aus dreidimensionalen Erfassungen z. B. mit Laserscannern, zweidimensionale Abbildungen zu gewinnen. Die hierbei erzielten fotografieähnlichen Ansichten sind zwar exakte orthogonale Projektionen, ihre Detailgenauigkeit reicht jedoch heute noch nicht an die guter Digitalfotografien heran. Neben der Detailtreue muss auch die absolut erzielbare Maßgenauigkeit beachtet und mit den klassischen Bauaufnahmetechniken verglichen werden. Wegen der Aufnahmedauer im Minutenbereich ist ein fester Standpunkt notwendig und somit entfällt die Möglichkeit, bei den Aufnahmen Hubarbeitsbühnen

oder Hubschrauber einzusetzen und es müssen insbesondere bei großen Bauwerkshöhen Lücken aufgrund von Abschattungen in Kauf genommen werden.

2.3 Kartierungstiefe

Die Zielsetzung der Kartierung bestimmt die Wahl der Genauigkeitsstufe, in der eine Schadenserfassung durchgeführt wird. Im [WTA-Merkblatt 3-10-97/D] sind drei prinzipiell unterschiedliche Genauigkeitsstufen in der Kartierung definiert. In der höchsten Genauigkeitsstufe »detailorientiert« wird ein Schaden in seiner tatsächlichen Ausdehnung dargestellt. Bei den weiteren Abstufungen werden die pauschal klassifizierten Schäden einer größeren Einheit zugeordnet. In der Stufe »quaderorientiert« ist diese Einheit der ganze Steinquader; in der Stufe »bereichsorientiert« ist es ein ganzer Bauwerksbereich, der mehrere Steinquader umfassen kann.

Genauigkeitsstufe »detailorientiert«

In der höchsten Genauigkeitsstufe werden die Schäden lagegenau abgegrenzt innerhalb des Steinblockes dargestellt. Die Angaben über Schadensart und Schadensintensität können noch mit Angaben zur Rückwitterungsart und -tiefe ergänzt werden. Den jeweiligen Schäden sind individuell die restauratorischen und handwerklichen Maßnahmen zur Instandsetzung zugeordnet. Bei Bedarf wird auch der Zustand der Verfugung kartiert und Maßnahmen hierzu festgelegt.

Als Kartierungsgrundlage ist eine verformungsgerechte Bauaufnahme im Maßstab mind. 1:20 notwendig. Dies ist vorzugsweise eine photogrammetrische Auswertung mit doppellinigen Fugen und vollständiger Darstellung der Profillinien. Bei Einbildentzerrung müssen verschiedene Ebenen getrennt entzerrt werden, Übergangsbereiche wie z. B. Gesimse werden entweder orthogonal in kleinen Abschnitten fotografiert eingearbeitet oder durch Handaufmaß grafisch ergänzt.

Für detailgenaue Kartierungen ist ein dauerhafter Zugang zu allen Gebäudeteilen über Gerüste not-

wendig. Evtl. können kleine Bereiche, deren Erschließung unverhältnismäßig aufwändig wäre, zunächst als Distanzkartierung ausgeführt und nach dem endgültigen Einrücken ergänzt werden.

Eine detailgenaue Schadenskartierung eignet sich für hochwertige Objekte mit großem Anteil an Originalsubstanz und dort, wo umfangreiche Instandsetzungen anstehen, die tief in den Bestand eingreifen. Sie ist ebenfalls gut zu verwenden bei einer geplanten Langzeitüberwachung durch ein umfangreiches Monitoring.

Genauigkeitsstufe quaderorientiert

Jedem Steinblock der Fassade wird ein Schadensmerkmal zugewiesen ohne Aussage darüber, an welcher Stelle des Steines dieser Schaden liegt. Die Gewichtung eines Schadens erfolgt dann nicht nur nach dessen Intensität, sondern berücksichtigt auch den Anteil, den die Schadensstelle am gesamten Stein einnimmt. Somit muss die Unschärfe in Kauf genommen werden, dass ein intensiver Schaden auf einer kleinen Fläche letztendlich nur zu einer Klassifikation des Gesamtsteines als »gering geschädigt« führen kann. Eine gewisse Differenzierung kann durch die Definitionen eines »untergeordneten Schadenbildes« erfolgen.

Als Kartierungsgrundlage muss eine steingerecht Ansicht der Fassade vorliegen. Bei einer photogrammetrischen Auswertung im Maßstab 1:50 genügt eine einlinige Fugendarstellung. Bei Fotografien sollten diese maßstäblich und perspektivisch entzerrt sein. Historische Baupläne müssen meist mit dem tatsächlichen Fugenschnitt ergänzt und auf ihre Aktualität bzw. Maßgenauigkeit überprüft werden.

Als Zugang zum Objekt ist ein Gerüst vorteilhaft, evtl. genügt aber auch eine Hubarbeitsbühne. Eine quaderorientierte Kartierung eignet sich für einfach strukturierte Fassaden und Mauern. Sie ermöglicht einen guten Schadensüberblick und lässt mit Einschränkungen auch Rückschlüsse auf Schadensursachen zu. Aufgrund der Kartierung alleine ist jedoch keine Aussage über eine notwendige Maßnahmen zur Instandsetzung möglich. Es werden aber die getroffenen Maßnahmen nachvollziehbar.

Genauigkeitsstufe »bereichsorientiert«

Die Schäden an einer Fassade werden in Abschnitten erfasst, wobei innerhalb der Abschnitte keine weitere Differenzierung mehr stattfindet. Eine Bestandskartierung kann nur grob erfolgen, z. B. durch eine Einteilung in Mauerwerkstypen oder Gesteinstypen. Schäden werden vorwiegend durch eine Differenzierung der Schadensintensität dargestellt, eventuell noch durch Begleiterscheinungen wie Verschmutzung, Bewuchs oder Salzausblühungen. Ein Maßnahmenplan beinhaltet hier eine grobe Differenzierung, z. B. in »handwerkliche Maßnahmen« und »restauratorische Maßnahmen«, evtl. noch ergänzt durch getrennte Ausweisung von Steinerneuerungen. Als Kartierungsgrundlage genügen unmaßstäbliche Skizzen, historische, auch evtl. nicht steingerechte Fassadenpläne oder weitgehend orthogonal aufgenommene Fotografien.

Eine bereichsorientierte Kartierung ermöglicht einen groben Überblick über den Schadens- und Maßnahmenumfang und dient zum groben Abschätzen eines Instandsetzungsbedarfs. Eventuell können Bauabschnitte eingeteilt werden, eine Kostenschätzung ist nur sehr überschlägig möglich.

3 Durchführung der Kartierung

3.1 Hilfsmittel für die Kartierung

Da die Schadenskartierung vorwiegend eine Beurteilung nach Augenschein ist, beschränken sich die hierfür notwendigen Werkzeuge vorwiegend auf solche, die ihn verbessern bzw. erweitern oder der Quantifizierung des Augenscheins dienen. Eine mögliche Beeinträchtigung des Objektes durch nicht zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden muss gegen den Zugewinn an Informationen unter Berücksichtigung der kunsthistorischen Bedeutung des Objektes abgewogen werden. Reinigungsbürsten und Schaber können z. B. verwendet werden, um störenden Bewuchs auf steinsichtigen, unfassten Gesimsen zu entfernen. Bei vermuteten Farb- oder Putzbefunden an solchen Stellen ist jedoch eine schonendere Untersuchungsart zu wählen.

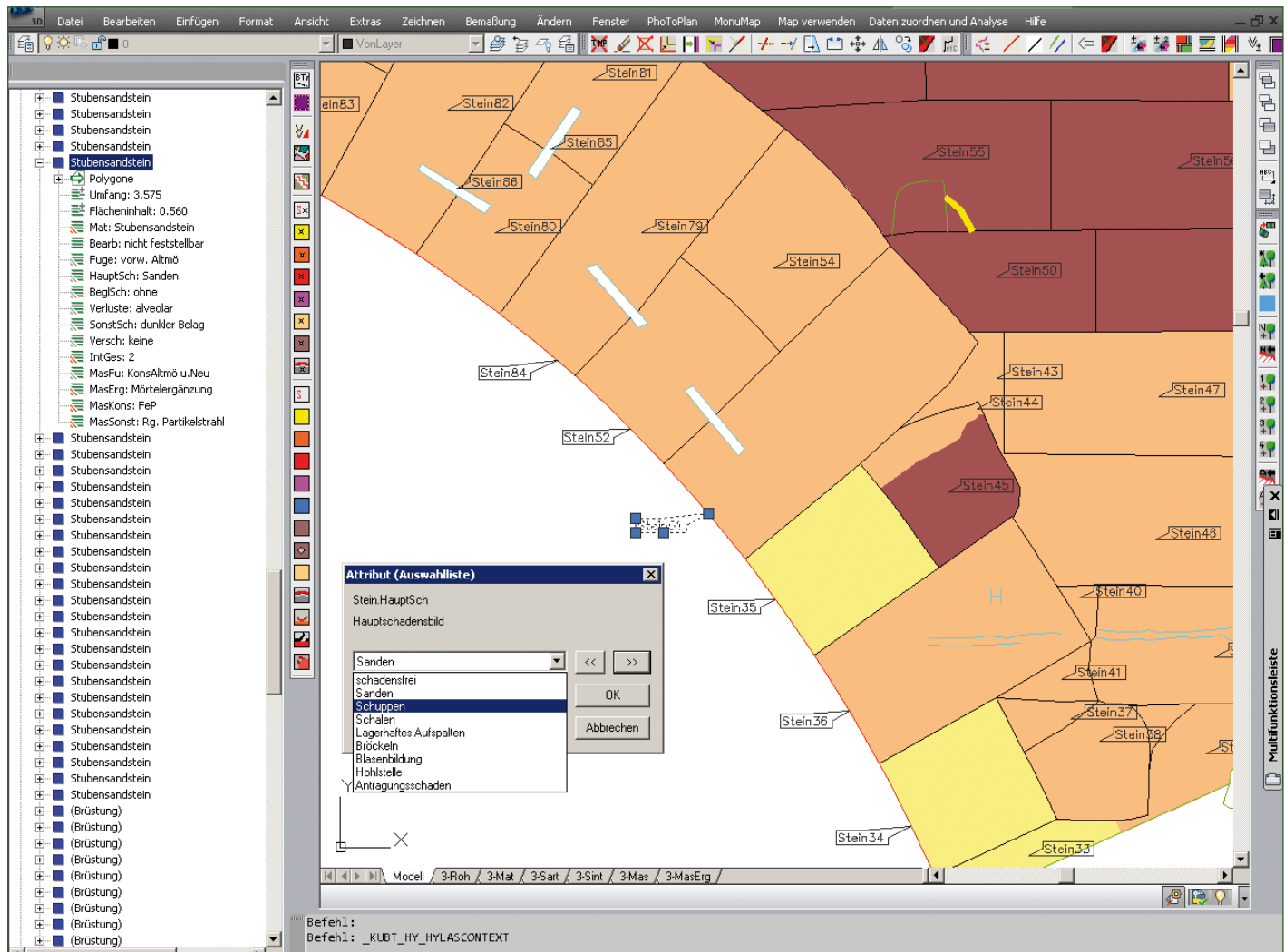


Bild 1 Vektorbasierte Kartierung mit Software »MonuMap« [www.kubit.de/CAD]

Die einem Schadensbild zugeordnete Schadensintensität soll Auskunft über die Wirtiefe eines Schadens geben. Oft ist noch Substanz vorhanden, jedoch die Kornbindung des Steines geschwächt und der Augenschein ergibt somit keine direkte Auskunft über die Schadentiefe. Bei Schadensstellen, wo die Festigkeit kontinuierlich zur Oberfläche hin abnimmt, kann punktuell durch eine Kratzprobe die Schadentiefe abgeschätzt und anhand der oberflächlichen Erscheinung verallgemeinert werden. Eine objektivere Prüfung sind hier die Bohrwiderstandsmessung [Leonhardt et al., 1991], [Wendler, Sattler, 1996], [Pfefferkorn, 2014], Ultraschall-Laufzeitmessung oder Bauradaraufnahmen. Andere Schadensbilder, bei denen der Festigkeitsverlust nicht im oberflächennahen Bereich des Steines liegt, sind durch Kratzproben nicht zu bewerten. In diesen Fällen muss ebenfalls eine verfeinerte Diagnosetechnik angewendet werden.

Schalenbildungen beispielsweise sind optisch schwer zu lokalisieren, wenn nicht bereits deutliche Hervorwölbungen der Oberfläche oder Schalenverluste aufgetreten sind. Jedoch können sie durch ihren dumpfen Klang beim Abklopfen z. B. mit einem Eisen oder Bleiklopfer [Loeffel et al., 2014], gut detektiert werden. Aber auch diese Technik findet ihre Grenzen z. B. bei dicken Schalen, die durch eine harte Mörtelfuge eingespannt sind oder wenn relativ dünne Steine plattenartig verbaut sind.

3.2 Analoge – digitale Aufnahme

Die klassische Vorgehensweise bei einer Kartierung ist die Verzeichnung der Befunde mit Stift auf Papiausdrucken. Mit entsprechender Ausstattung ist es heute auch möglich, die Kartierungsbefunde direkt vor Ort digital in die Zeichnung

einzutragen. Die technischen Anforderungen sind hier ein für den Außenbereich geeignetes Notebook mit leistungsfähigem Prozessor, einem kontrastreichen, sonnenlichttauglichem Display und möglichst großem Arbeitsspeicher. Der umklappbare Bildschirm benötigt zum exakten Zeichnen mit einem Stift eine Digitizer-Oberfläche. Ein einfaches Touchscreen-Display reicht hier nicht aus.

Bei der klassischen Vorgehensweise hat sich bewährt, einen Maßstab zu wählen, der um etwa die Hälfte größer ist als der später beabsichtigte Ausgabemaßstab. Somit können unter den erschwerten Umständen auf einem Gerüst oder einer Hubarbeitsbühne dennoch hinreichend detaillierte Aufzeichnungen angefertigt werden. Die digitale Umsetzung der Kartierungsaufzeichnungen ist dann von der Aufnahme der Befunde entkoppelt und findet im Büro statt. Dem Nachteil, dass die eindeutige Lesbarkeit der Unterlage mit zunehmendem zeitlichem Abstand und besonders bei am Bauwerk vorgenommenen Korrekturen rapide abnimmt, steht der Vorteil gegenüber, dass mit der Papierkartierung ein klassisches Primärdokument entsteht, dessen Lesbarkeit unabhängig von Software und der Crash-Anfälligkeit digitaler Daten ist.

Die Verwendung einer angepassten Kartierungssoftware erleichtert das Eintragen der Befunde (Bild 1). Bei Datenbank-basierenden Programmen erfolgt die Erstellung eines Datensatzes, der mit einem Zeichnungselement zur genauen Lokalisation des Befundes im Kartierungsplan verknüpft ist. Hierbei wird ermöglicht, direkt in der CAD-Umgebung eine Datenbank zu konfigurieren und Beziehungen zwischen den vektoriellen Zeichnungselementen und den Datensätzen herzustellen. Die Hierarchie der Kartierung ist in der Strukturdefinition abgebildet und beim Erstellen bzw. Zuordnen der Zeichnungselemente werden die Kartierungsinhalte abgefragt. Für die Visualisierung der Befunde steht die gesamte Palette der CAD-Elemente zur Verfügung.

Der Vorteil dieser datenbankgestützten Kartierung liegt darin, dass die grafische Darstellung der Befunde losgelöst ist von deren Erfassung und auch später festgelegt oder nachträglich verändert oder angepasst werden kann. Somit besteht die Möglichkeit, die Visualisierung an verschiedene Frage-

stellungen einfach, schnell und effektiv anzupassen.

4 Visualisierung der Befunde und Planausgabe

»Empfehlungen für eine einheitliche Darstellung der Verwitterungsformen und ihrer Intensitäten mittels Farben und Signaturen können nicht gegeben werden« [Kownatzki, 1997]. Daran hat sich nichts geändert. Grobe Anhaltspunkte können allgemeine Richtpunkte sein [Wangerin, Stannek, 1997]. Die unterschiedlichen Schadensausprägungen an verschiedenen Bauwerken erfordern aber eine individuell angepasste Darstellungsweise für eine gute Lesbarkeit und hohe Aussagekraft der Kartierung. Die grafischen Möglichkeiten von Farbabstufungen, der Schraffurtechnik und der Anwendung von Linientypen und Symbolen müssen hierfür möglichst weitgehend ausgenutzt werden.

Kartierungspläne werden digital und als Papierausdruck übergeben. Nach Vorgabe der Denkmalämter [Arbeitsblatt Bauforschung, 2009] sollen digitale Unterlagen immer in einem allgemein lesbaren Format vorgelegt werden. Geeignet ist hier das PDF-Dateiformat. Da an diesen Dateien keine Änderungen mehr möglich sind, fixieren sie den Abgabestatus des Dokumentes und dienen somit auch zur Beweissicherung des Übergabestatus. Zusätzlich ist jedoch eine Ausgabe im Ursprungsformat, also z. B. AutoCAD-DWG, sinnvoll, die vom Auftraggeber oder von ausführenden Firmen für Aufmaß, Abrechnung oder Langzeitüberwachung unter Rückgriff auf Kartierungsdaten weiterverarbeitet werden kann. Durch die Erweiterung der Strukturdefinition der Kartierungssoftware wird der Vorteil einer digitalen Kartierung dann in vollem Umfang nutzbar. Parallel zur digitalen Ausgabe muss die Kartierung aus Gründen der Archivsicherheit immer auch als farbiger Papierplan erstellt werden. Die Verwendung dauerhafter Pigmenttinten und säurefreien Papiers ist Voraussetzung für hohe Dauerhaftigkeit der Pläne. Es empfehlen sich Fine-Art Papiere, deren Verwendung aber aus Kostengründen und wegen der großen Papierstärke (>180 g/qm) auf besondere Objekte beschränkt bleiben wird.

Literatur und Quellen

- [Fitzner, Kownatzki, 1995] Fitzner, H., Kownatzki, R., (1995): Verwitterungsformen, Klassifizierung und Kartierung, Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung 1, Ernst und Sohn, Berlin
- [Eickelberg et al., 1990] Eickelberg, S., Herrpich, S., Zallmanzig, J. (1990): Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme – Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte, Bautenschutz und Bausanierung. Sonderheft, Verlag Rudolf Müller, Köln
- [Grassegger, 1997] Grassegger, G., (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalen. In: Kiesow, G., Kiesewetter, A. (Hrsg.): Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, S. 433–488, Ebner Verlag, Ulm
- [Simon et al., 2010] Simon, S., Petzet, M., Ziesemer, J., (1997): ICOMOS, Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Michael Imhof Verlag, Petersberg
- [Eckstein, 1999] Eckstein, G., (1999): Empfehlungen für die Baudokumentation. Arbeitsheft 7 des LDA Baden-Württemberg, Theiss Verlag, Stuttgart
- [Leonhardt et al., 1989] Leonhardt, H., Lucas, R., Kießl, K., (1989): Handgerät zur vereinfachten Vor-Ort-Bestimmung bauphysikalischer Kennwerte von Gesteinsoberflächen. In: Snethlage (Hrsg.): Jahresbericht ans dem Forschungsprogramm Steinerfall-Steinkonservierung, Bd. 1, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1991
- [Wendler, Sattler, 1996] Wendler, E., Sattler, L., (1996): Bohrwiderstandsmessung als zerstörungsgarmes Prüfverfahren. In: Werkstoffwissenschaft und Bauinstandsetzen, Reportsband zum 4. Intern. Kolloquium Technische Akademie, Esslingen 17. bis 19.12.1996, Bd. 1, Freiburg, S. 145–154
- [Pfefferkorn, 2005] Pfefferkorn, S., (2005): Beurteilung von Verwitterungserscheinungen an Natursteinoberflächen mit dem Bohrwiderstand-Messverfahren. In: Siegesmund, Auras, M., Snethlage, R. (Hrsg.): Stein – Zerfall und Konservierung, S. 155–164, Edition Leipzig
- [Loeffel et al., 2014] Loeffel, A., Schläppi, Ch., Völkle, P., (2014): Baupflege am Berner Münster. In: Naturstein-sanierung Stuttgart 2014, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S. 93
- [Kownatzki, 1997] Kownatzki, R., (1997): Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren. Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 22
- [Wangerin, Stanek, 1997] Wangerin, G., Stanek, N., (1997): Bestandsaufnahme, Dokumentation und Ausschreibung. In: Kiesow, G., Kiesewetter, A. (Hrsg.): Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, S. 491–539, Ebner Verlag Ulm

Bauradar, Ultraschall und Mikroseismik

Erkundung und Bewertung von Natursteinmauerwerk

Bauradar und Ultraschall sowie Mikroseismik werden seit Jahren erfolgreich für zerstörungsfreie Erkundungen an Bauteilen, Skulpturen oder Mauerwerk aus Natursteinen eingesetzt. Praxisbeispiele stellen die Verfahren Bauradar, Ultraschall und Mikroseismik vor und zeigen typische Messdaten und deren Interpretation. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Erkundung von Mauerwerk zum Wandaufbau wie Ein- oder Mehrschaligkeit, Zustand der Innenfüllung, Lokalisierung von Hohlräumen, Bestimmung von Bauteilabmessungen, Bestimmung von Steineinbindetiefen, Suche nach metallischen Verbindungsmitteln wie Steinklammern, Dübeln und Ankern. Auch die Beurteilung des Verwitterungszustandes von Kalksteinsäulen lässt sich z. B. damit bestimmen.

Gabriele Patitz

Schlagwörter: Mauerwerksaufbau, Stützwände, Säulen, Steineinbindetiefen, Steinklammern, Hohlräume, Verwitterung, Bauradar, Ultraschall, Mikroseismik

1 Einsatz zerstörungsfreier Verfahren an Natursteinbauwerken

Zerstörungsfreie Verfahren aus der Geophysik haben sich im Bauwesen seit Jahren etabliert und deren Einsatz gehört insbesondere an Denkmälern zum Stand der Technik bzw. Stand des Wissens. Diese Verfahren ergänzen die herkömmlichen Methoden zur Erfassung und Bewertung der Bausubstanz [WTA-Merkblatt, 1999]. Es muss dabei allerdings berücksichtigt werden, dass es sich um indirekte Erkundungsverfahren handelt, bei denen zunächst physikalische Kenngrößen wie Reflexionen, Wellengeschwindigkeiten und Absorptionen erfasst werden. Diese Messdaten müssen dann von erfahrenen Spezialisten aus der Geophysik und dem Bauwesen in interdisziplinärer Zusammenarbeit interpretiert, bewertet und in Bezug zu den bautypischen Informationen gesetzt werden.

Hauptsächlich kommt das Bauradar in der Praxis zur Anwendung. Damit sind mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand große Flächen zu erkunden. Ultraschall und Mikroseismik werden ergänzend für Fragen nach unterschiedlichen Materialfestig-

keiten, der Beurteilung von Verwitterungen oder der Risstiefenabschätzung in kleinen Bereichen oder Bauteilabschnitten herangezogen.

Nur im Bedarfsfall werden diese zerstörungsfreien Verfahren mit zerstörenden Methoden kombiniert. Das heißt, je nach Fragestellung kann es an den Objekten erforderlich sein, dass kalibrierende Kernbohrungen oder andere Bauteilöffnungen ergänzend durchgeführt werden. Dies erfolgt dann aber an gezielt ausgewählten Stellen und in der Anzahl auf ein Minimum reduziert.

Standardlösungen für den Einsatz dieser Technik gibt es nicht. Bei jedem Bauwerk oder Bauteil müssen immer wieder die speziellen Randbedingungen und örtlichen Gegebenheiten analysiert und bewertet werden. Es ist immer ein objektbezogenes Untersuchungskonzept zu erarbeiten. Dabei sind in Abstimmung mit dem Auftraggeber oder Planer die Erkundungsziele, die örtlichen Gegebenheiten und die Erfolgchancen realistisch abzuklären. Nicht alle Fragestellungen können zuverlässig mit zerstörungsfreien Verfahren beantwortet werden. Hier liegt es in der Verantwortung der Spezialisten, die diese Technik einsetzen, die Erfolgchancen und Grenzen realistisch abzuschätzen.

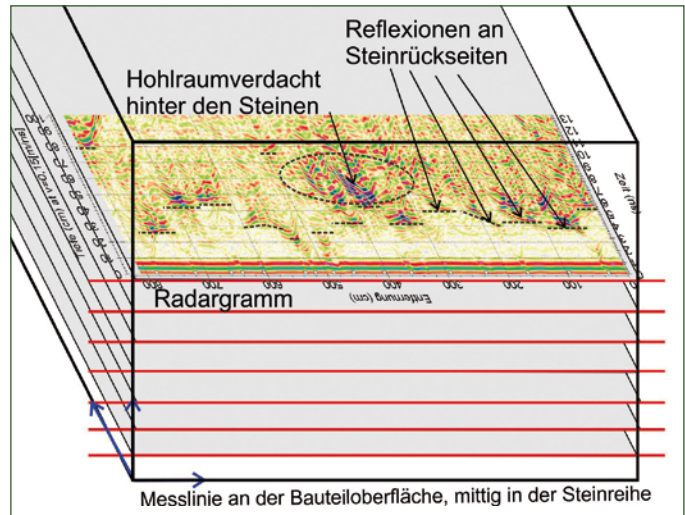


Bild 1 1.1 Verfahrensbeschreibung Bauradar

Einsatz eines Radarsensors

Bild 2

Radargramm zur Bestimmung von Steineinbindetiefen

Mit Radarsensoren werden elektromagnetische Wellen in die Bauteile eingebracht (Bild 1). Zur gängigsten Messanordnung gehört die Reflexionsanordnung, da hier die Bauteile nur von einer Seite zugänglich sein müssen. Mit der Wahl der Sensoren und dem Abstand der Messprofile werden die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen der Messdaten bestimmt. Leistungsfähige und flexible Technik steht heute zur Verfügung. Prinzipiell bestimmt aber die Zugänglichkeit zum Untersuchungsbereich den Messfortschritt. Eine sehr schnelle Datenaufnahme erfolgt dann, wenn der Einsatz eines Hubsteigers möglich ist.

Die elektromagnetischen Wellen durchlaufen die Untersuchungsbereiche mit einer stoffspezifischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, die in Luft und trockenen Materialien sehr hoch ist und mit zunehmender Feuchtigkeit abnimmt. Durch Salze werden die elektromagnetischen Wellen absorbiert. Beim Übergang von einem Material in ein anderes mit abweichenden elektrischen Eigenschaften wird an der Grenzfläche ein Teil der einfallenden Wellen gebrochen und ein Teil reflektiert. Der Kontrast der elektrischen Eigenschaften benachbarter Materialien bestimmt das Reflexionsvermögen an den Trennflächen. Bei metallischen Einbauteilen kommt es zur Totalreflexion, was in den Radardaten durch sehr hohe Signalamplituden und typische Diffraktionen (Beugung) gut zu erkennen ist. An der Bauteiloberfläche werden die Reflexionen von den Sensoren aufgenommen und registriert.

Die Aufzeichnung der Radardaten erfolgt in Form von Radargrammen. Dabei handelt es sich je nach Verlauf des Messprofils an der Wand um einen horizontalen oder vertikalen Schnitt in das Bauteil. Die unterschiedlich hohen Reflexionsstärken an den Materialgrenzen werden farbcodiert wiedergegeben. Dabei sind hohe Reflexionsamplituden in Blau und Rot-Violett dargestellt, niedrige Reflexionsamplituden erscheinen in Gelb. Bild 2 zeigt ein solches Radargramm. An den Steinrückseiten treten Reflexionen aufgrund der Materialunterschiede zwischen Stein und Wandfüllung bzw. Hohlraumverdacht auf. Somit kann die Dicke der Steine und die Verzahnung von Mauerwerk mit der Innenfüllung ermittelt werden. Hohlräume (Übergang Stein zu Luft) verursachen hohe Reflexionsstärken.

Aus einer hinreichenden Anzahl paralleler Radargramme können Zeitscheiben (Bild 3) berechnet werden, eine grundrissähnliche Darstellung aller Reflexionen in einem ausgewählten Tiefenbereich des Bauteils. Die Lage dieses Tiefenbereichs richtet sich nach der Fragestellung, die zu beantworten ist. Zeitscheiben werden überwiegend für den Grenzbereich Außenwand - Innenfüllung mehrschaliger Wände berechnet, um hier Hohlräume und Schalenablösungen zu finden.

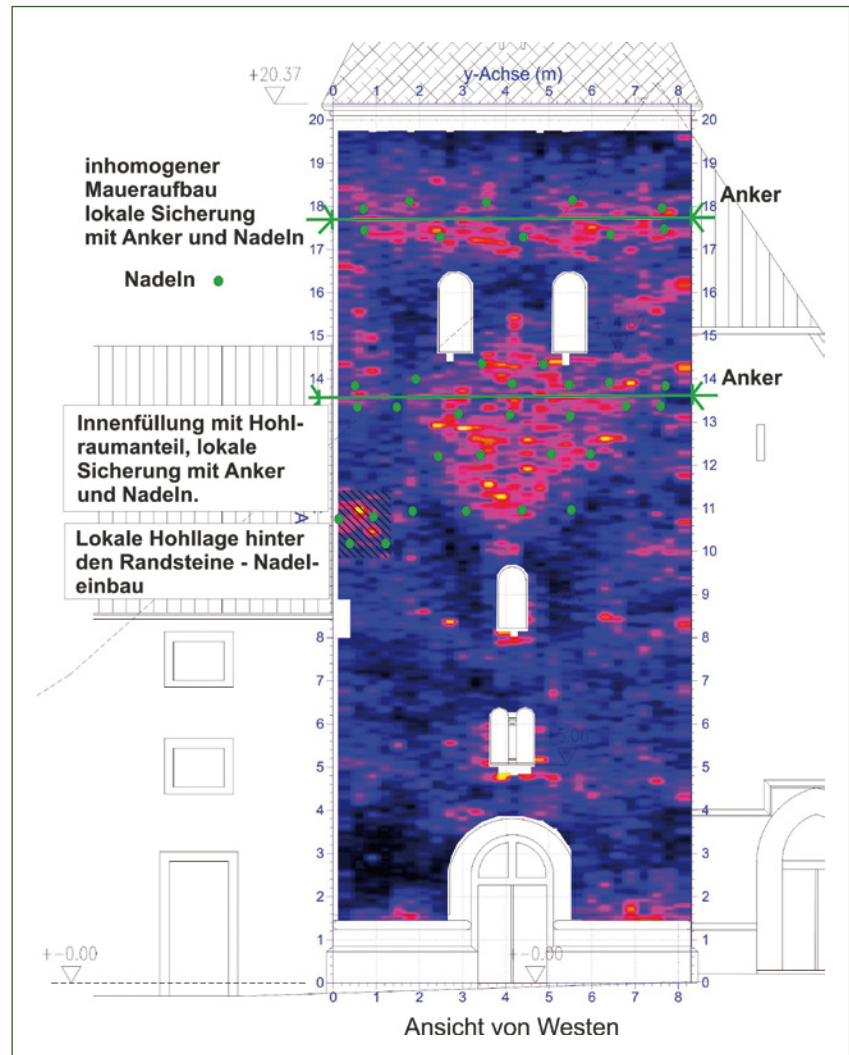
Die Grenzen der Reichweite mittels Bauradar werden bei altem Mauerwerk kaum erreicht. Müssen besonders dicke Mauern erkundet werden, kann es erforderlich sein, diese Wände mit entsprechenden Sensoren von zwei Seiten zu bearbeiten.

Das Radarverfahren hat sich in der Baupraxis als ein vielseitig und flexibel einsetzbares Untersuchungsverfahren etabliert. Je nach Fragestellung und Qualität der aufgezeichneten Daten müssen die Radardaten entsprechend verarbeitet werden. Der Zeitaufwand für die Auswertung hängt von der Datenqualität und dem gewünschten Auswerte- und Darstellungsumfang ab. Dieser Aufwand kann das drei- oder vierfache der Messzeit betragen. Bei manchen Projekten ist es ausreichend, neben einer Messdokumentation die Ergebnisse in einem Plan einzutragen und nur zu benennen. Die Datenaufnahme und -auswertung muss immer von qualifiziertem und erfahrenem Fachpersonal aus bautechnischer und geophysikalischer Sicht durchgeführt werden. Von der Sorgfalt der Arbeiten hängt die Qualität und Zuverlässigkeit der Ergebnisse ab [Patitz, 2009], [Patitz, 2012].

1.2 Untersuchungen zum Mauerwerksaufbau mit Bauradar

Strukturuntersuchungen wie Mauerwerksaufbau, Wand- und Gewölbedecken, Ein- oder Mehrschaligkeit, Hohlraumsuche erfolgen meist auf der Basis von Reflexionsmessungen. Unterschiedliche relative Dielektrizitätszahlen zwischen einer gemauerten Außenschale und einer hohlraumreichen Innenfüllung lassen erfolgreiche Messungen an mehrschaligem Mauerwerk zu. Ebenso können auf dieser Basis größere Hohlstellen und Schalenablösungen der Innenfüllung von den Außenschalen gefunden werden. Diese sind besonders deutlich in Zeitscheiben zu erkennen. Es wird hierbei die Stärke der Reflexionsamplituden betrachtet und interpretiert.

Die dargestellten Reflexionen in der Zeitscheibe im Bild 3 sind für einen Wandtiefenbereich von ca. 30 bis 70 cm berechnet worden. Dies entspricht hier etwa dem Grenzbereich zwischen äußerer Mauer- schale und Mauerkern (Innenfüllung). Rot dargestellt sind sehr hohe Reflexionsstärken, die durch den Materialkontrast zwischen Luft und Mauerwerk hervorgerufen werden. Somit lassen sich die schadhaften und instand zu setzenden Bereiche gut kartieren. Die blauen bis schwarzen Bereiche sind wenig reflektiv und können als homogenes und kompaktes Mauerwerk gelten. Vernadelt und



gesichert wurden an diesem Bauwerk nur die auffälligen Bereiche mit Hinweisen auf Schalenablösungen.

Bild 3
Darstellung der Radardaten als Zeitscheibe für den Grenzbereich Außenwand – Innenfüllung einer mehrschaligen Wand [Patitz, 2012 a]

1.3 Untersuchung von Stützmauern mit Bauradar

Bei Stützwänden muss zusätzlich zu den Abmessungen der Wandquerschnitte und dem Aufbau der Wände das Erdreich hinter der Wand erkundet werden. Ausspülungen und Hohlräume sind meist die Ursache für Ausbauchungen und Risse bis hin zum Totalversagen. Diese Hohlräume zeichnen sich beim Bauradar üblicherweise durch auffällige hohe Reflexionen im Vergleich zu den ungeschädigten Bereichen ab. Bei der Bewertung der Radardaten muss aber immer das Gesamtbauwerk und die Schadenssituation mit analysiert werden

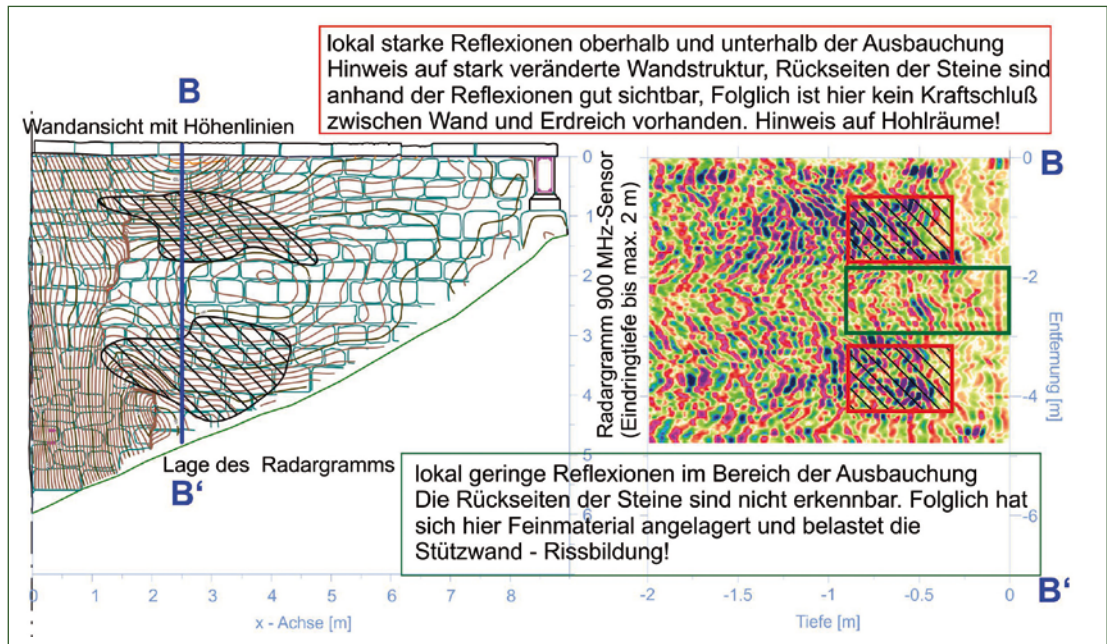


Bild 4
Radargramm an einer Stütz-
mauer, Materialanspülungen im
Bereich der Ausbauchung
[Bewer et al., 2014]

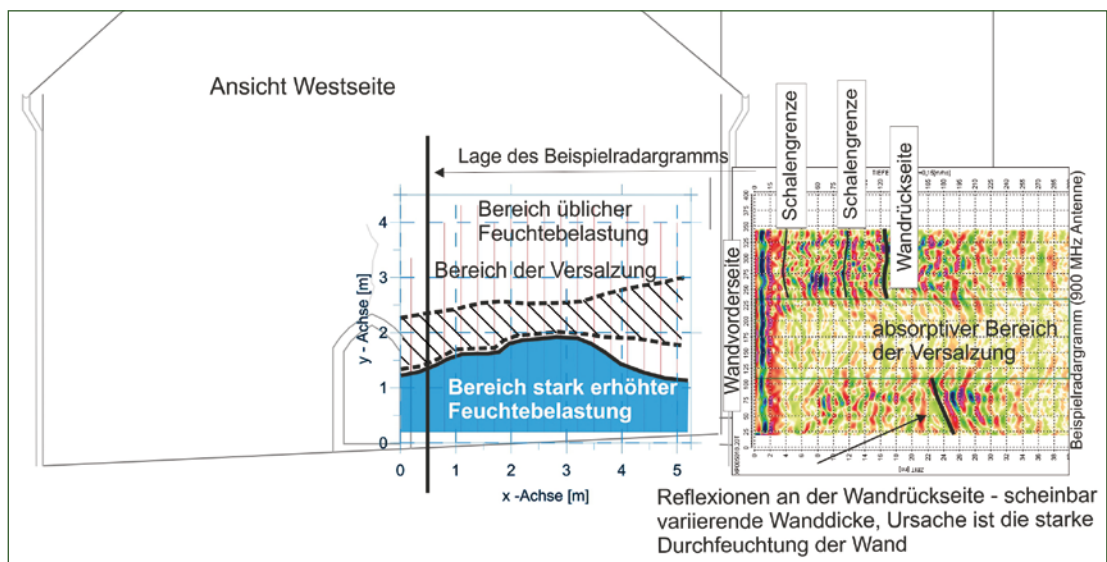


Bild 5
Radargramm an einer Wand mit
unterschiedlich hoher
Feuchte- und Salzbelastung
[Patitz, 2009]

[Patitz, 2012 b]. Bild 4 zeigt anhand der Reflexionen aus den Radardaten, dass die ursprünglich eingebrachte Dränageschicht aus großen Steinen nicht mehr wirksam ist. Im Bereich der Ausbauchung hat sich hinter der Wand Feinmaterial angesammelt und zur Rissbildung geführt. Gefährlich sind hier nicht die Hohlräume hinter den Steinen oberhalb und unterhalb der Ausbauchung, sondern die Bereiche mit dem angelagerten Feinmaterial bei der Ausbauchung [Patitz, 2012 a]. Im Bereich der Ausbauchung treten deutlich geringere Reflexionen auf.

1.4 Untersuchung zur Feuchte- und Salzbelastung mit Bauradar

Stark durchfeuchtete Bereiche können dadurch erfasst und beurteilt werden, dass im Vergleich zu normal feuchten Bereichen eine deutlich geringere Wellengeschwindigkeit der Radarwellen ermittelt wird. Bekannte Reflektoren wie z. B. Wandrückseiten zeichnen sich in feuchten Bereichen mit einer deutlich verlängerten Wellenlaufzeit in den Radargrammen ab, ohne dass die untersuchte Wand tatsächlich dicker ist (Bild 5). Für die quantitativen

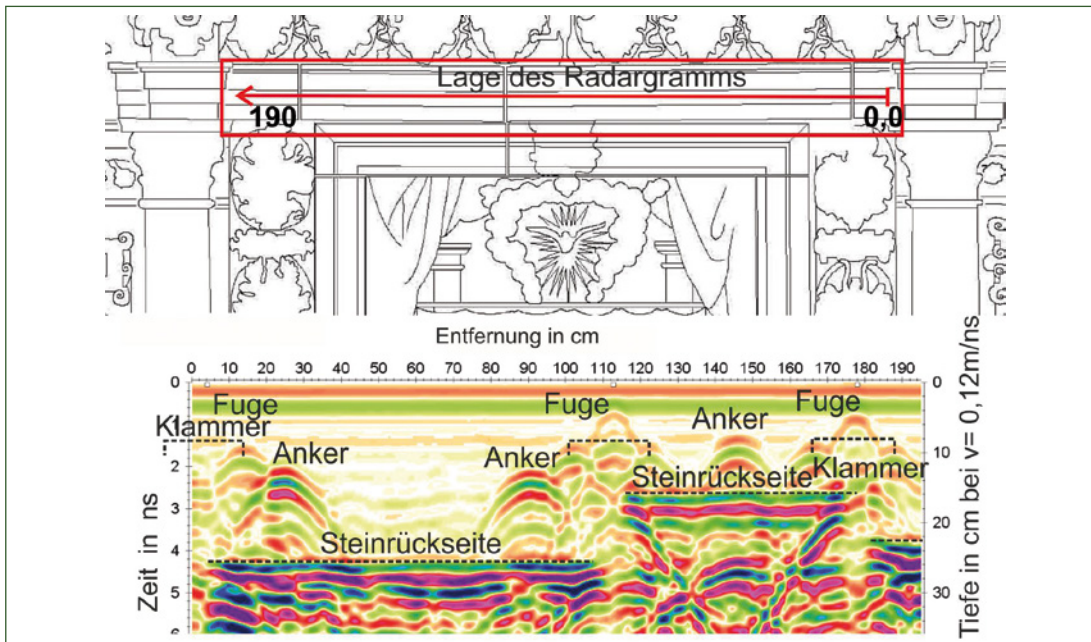


Bild 6
Typische Diffractionen an zahlreichen metallischen Klammern und Rückverankerungen in eine Kirchenwand

Angaben zum Feuchtegehalt in einem Bauteil sind jedoch herkömmliche Methoden der Probenentnahmen und Feuchtebestimmungen kostengünstiger. Mit dem Radarverfahren kann aber das flächige Ausmaß der Durchfeuchtung an einem Bauteil effektiv erfasst werden und als Basis für eine gezielte Feuchtegehaltsbestimmung und Ortung der Feuchtequellen dienen.

Gelöste Salze absorbieren aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit sehr stark die elektromagnetischen Wellen und in den Radargrammen zeichnen sich dadurch keinerlei Reflexionen ab. Folglich sind keine Strukturuntersuchungen in stark versalzten Bereichen möglich. Allerdings lässt sich dadurch das Ausmaß der Versalzungen in der untersuchten Fläche bestimmen (Bild 5). Zur Salzart- und Salzgehaltbestimmung sind auch hier wieder die herkömmlichen Verfahren der Probenentnahme und Labormethoden erforderlich [Patitz, 2012 a].

1.5 Ortung von Metallen mit Bauradar

An Metallen wie Steinklammern, Dübeln, Bewehrung oder auch Deckenträgern werden die elektromagnetischen Wellen total reflektiert. Beim senk-

rechten Überfahren dieser Materialien entstehen in den Radargrammen typische Diffractionen (Bild 6). Daran lassen sich die Tiefenlage und der Verlauf der Metalle im Bauteil bestimmen. Durchmesser und Korrosionszustand können allerdings nicht ermittelt werden.

2 Verfahrensbeschreibung Ultraschall und Mikroseismik

Diese Verfahren basieren auf der Anregung und Ausbreitung elastischer Wellen und können zur Feststellung und Beurteilung mechanischer Materialeigenschaften eingesetzt werden. Typische Fragestellungen sind z. B der Verwitterungszustand von Natursteinen, die Einordnung bezüglich der Festigkeit von Natursteinen, die Abschätzung von Verlauf und Tiefe von Rissen und die Position und Ausdehnung von Einlagerungen oder Inhomogenitäten innerhalb von Natursteinen.

Der Frequenzbereich liegt beim Ultraschall zwischen 20 kHz und 1 MHz (bei Naturstein), der bei der Mikroseismik zwischen 1 kHz und 10 kHz. Die Reichweite des Ultraschalls ist aufgrund seiner relativ hohen Frequenzen, kurzen Wellenlängen und damit einer höheren Absorption begrenzt. Je nach

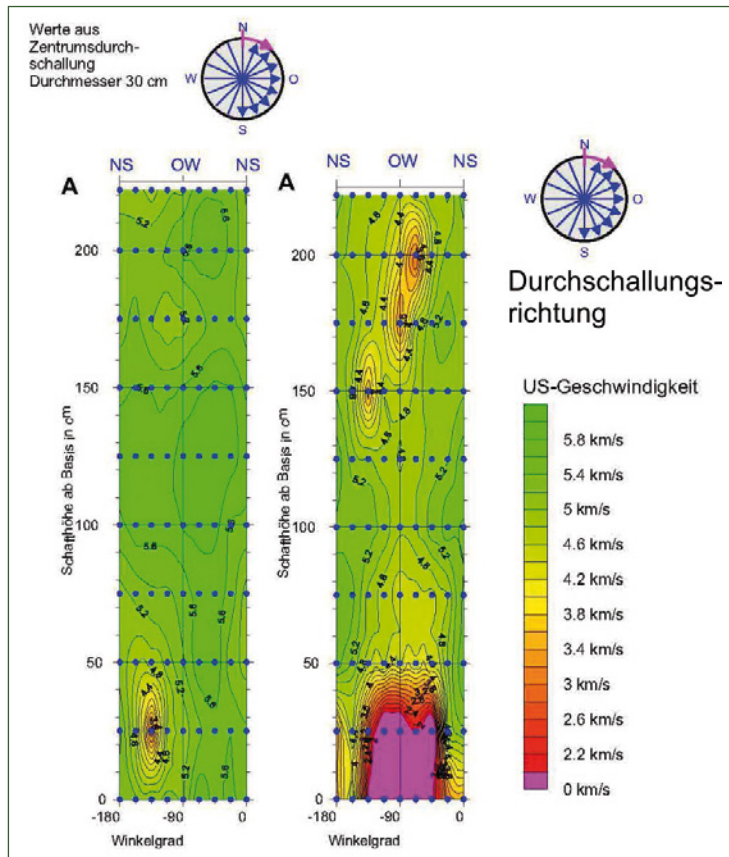


Bild 7
Ultraschallergebnisse bei der
Querdurchschallung von Säulen
[Patitz, 2009]

Bild 8
Querdurchschallung einer Säule
mit Ultraschall [Patitz, 2009]



Material können Bauteile ab einer Dicke von ca. 50 cm nicht mehr durchschallt werden. Die Mikro-seismik ist in der Reichweite für Bauteiluntersuchungen nahezu unbeschränkt und kommt als Alternative zum Ultraschallverfahren zur Anwendung.

Bei der impulsartigen Anregung der mechanischen Wellen durch Ultraschallsender oder mikroseismische Quellen wie Impulshammer bilden sich Oberflächen- und Raumwellen aus. Betrachtet und ausgewertet werden meistens die Laufzeiten der Raumwellen in Form von Kompressionswellen. Deren Fortpflanzung in einem Medium hängt von den mechanischen Baustoffeigenschaften ab, wozu u. a. die Druckfestigkeit und die Rohdichte zählen. Der Einsatz an Bauwerken und besonders an Skulpturen kann als weitgehend feuchte- und salzunabhängig beurteilt werden. Die Untersuchungsbereiche müssen meist von zwei gegenüber liegenden Stellen erreichbar sein. Elastische Wellen breiten sich nicht über eine Materiallücke (Hohlraum, Riss) aus. Dies bewirkt eine auffällig erhöhte Scheingeschwindigkeit im Vergleich zu ungeschädigten Bereichen und lässt somit Rückschlüsse auf Risse,

Hohlräume, Inhomogenitäten und Zerrüttungen z. B. aufgrund von Verwitterungen zu. Auch können sich mechanische Wellen nicht über einen großflächigen Hohlraum wie eine Schalenablösung hinweg ausbreiten. Deshalb liegen hier deren Anwendungsgrenzen und ergänzende Einsatzmöglichkeiten für das Bauradar.

Da mechanische Wellen bei ihrer Ausbreitung von den mechanischen Materialeigenschaften abhängig sind, eröffnet sich mit dem Ultraschall und der Mikroseismik die Möglichkeit, qualitative Aussagen insbesondere zur Druckfestigkeit zu treffen. Der erhaltene physikalische Messwert (Wellengeschwindigkeit) kann aber nicht direkt der Druckfestigkeit zugeordnet werden. Sollte eine möglichst genaue Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und der Wellengeschwindigkeit erforderlich sein, bedarf es jeweils materialbezogener Kalibrierkurven über zugehörige Materialproben und Labormethoden (zerstörende Eingriffe, Druckfestigkeitsprüfungen). Teilweise kann jedoch für eine Grobbeurteilung auf Literaturwerte zurück gegriffen werden [Patitz, 2012 a].

Mit speziellen Messanordnungen ist es möglich, die Tiefe einzelner Risse abzuschätzen. Diese Verfahren zur Risstiefenbestimmung gehen aber von einem offenen und sauberen Riss aus. Ist in einem Rissbereich eine Signalübertragung durch Kornkontakte aufgrund lockeren Materials möglich, ergeben sich Ungenauigkeiten bei der Risstiefenbestimmung. Dies kann bei keiner Messung ausgeschlossen werden. Die angegebenen Risstiefen können deshalb nur Richtwerte sein, was bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden muss [Patitz, 2012 a].

Im Bild 7 sind vergleichend die Durchschallungsergebnisse an zwei Kalksteinsäulen dargestellt. Anhand der Höhe der Wellengeschwindigkeit kann

je Messebene eine Beurteilung der Schädigung erfolgen und die Instandsetzungsarbeiten an die vorhandene Situation bezogen auf das Schadensmaß angepasst und auch deren Erfolg später kontrolliert werden. Grün markiert sind die ungeschädigten Bereiche mit kalksteintypischen hohen Wellengeschwindigkeiten. Rot markiert sind die schadhaften Bereiche, bei denen aufgrund von Schalenablösungen und Rissen keine Durchschallung möglich war. Gelb zeichnen sich Schichtungen im Kalkstein ab (Bild 7). Die untere Trommel der Säule 2 ist stark gerissen. Hier war keine Durchschallung möglich. Bild 8 zeigt die Durchschallung einer Säule mit Ultraschallgeräten [Patitz, 2009].

Literatur und Quellen

- [Bewer et al., 2014] Bewer, A., Patitz, G., Schuster, R., Wendler, E., Stürmer, S., (2014): Interdisziplinäre Bestandserfassung und Bewertung einer denkmalgeschützten Bogenbrücke aus Natursteinen mit Instandsetzungs- und Ertüchtigungskonzept. In: Tagungsband Natursteinsanierung Stuttgart 2014, Patitz, Grassegger, Wölbert (Hrsg.), Fraunhofer, IRB Verlag, S. 33–56
- [Patitz, 2009] Patitz G., (2009): Zerstörungsfreie Untersuchungen an altem Mauerwerk. 1. Auflage, Berlin, Beuth Verlag
- [Patitz, 2012 a] Patitz, G., (2012): Altes Mauerwerk zerstörungsarm mit Radar und Ultraschall erkunden und bewerten. In: Bauphysik-Kalender 2012, Ernst&Sohn Berlin, S. 203–245
- [Patitz, 2012 b] Patitz, G., (2012): Zerstörungsfreie Untersuchungen an Bauteilen aus altem Mauerwerk – Beispiele aus der Praxis. In: Tagungsband 4 Ingenieurbauwerke aus Natursteinmauerwerk, Verein Erhalten historischer Bauwerke e.V. (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, S. 33–45
- Bilder 2, 3, 4, 5, 6, 7 Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH Karlsruhe mit Änderungen durch Patitz, G.

Chemische Analytik an geschädigten und konservierten Natursteinen als Voruntersuchung

Von der Vielzahl der möglichen chemischen und physikalischen laborgebundenen Nachweismethoden werden die wichtigsten für Voruntersuchungen zur Bestimmung des Aufbaus und Schadenszustands von Gesteinen sowie Mauerwerken und ggf. vorhandener Polymere einer vorangegangenen Natursteinkonservierung beschrieben. Diese Informationen sind auch für eine Zweitsanierung wichtig, um den Einfluss der vorangehenden Konservierungen oder Behandlungen einschätzen zu können. Die Aussagekraft der Nachweismethoden wird an Beispielen gezeigt, bewertet und kritische Punkte benannt. Der Beitrag soll als technische Leitlinie verstanden werden, um aufzuzeigen, was als Vorarbeiten unbedingt erforderlich ist.

**Gabriele Grassegger
Stefan Brüggerhoff**

Schlagwörter: Labormethoden der Analytik, Natursteinkennwerte, Natursteincharakterisierung, Mineralogie und Chemie von Natursteinen, chemische Analytik, Nachweis von Salzen, Nachweis von Zersetzungsprodukten, Bewertung der Verfahren, Einsatzmöglichkeiten, Nachweisverfahren, Konservierungsstoffe, Nachweis von Konservierungsstoffen, Silicone, spektroskopische Analysenmethoden, Hydrophobierung, Festigung

Die Ausführungen dienen einem schnellen Überblick über die möglichen Verfahren und als Methodenerläuterung von Laboruntersuchungen an Natursteinmaterial, mit und ohne Vorbehandlung. Für welche Zwecke können sie eingesetzt werden und welche Aussagen für eine Sanierung sind möglich. Die Ausführungen umfassen nur die »gängigen« Labormethoden zur Materialcharakterisierung und sie sind sowohl zur Voruntersuchung wie auch zur Kontrolle des Erfolgs (Nachuntersuchung) einsetzbar. Bei jeder Untersuchung sollte vorher das Ziel klar definiert sein.

Es wird bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken, 1990. Es kann hier nur die Messvorgabe oder der wissenschaftlich-technische Kenntnisstand benannt werden und es wird in jedem Fall empfohlen, Details zur Praxis in der benannten Literatur nachzulesen z. B. [Snethlage, Pfanner, 2013] sowie speziell in den Bestimmungen und Normensammlungen von DIBT, DIN und CEN; hier besonders in der zusammenfassenden Europäischen Norm »Erhaltung des kulturellen Erbes – Leitfaden zur Charakterisierung von Naturstein in der Denkmalpflege« DIN EN 16515:2013-01.

1 Methodenüberblick und Aussagen

Die Verfahren, zunächst im anorganischen Bereich (Tabellen 1, 2, 4) und dann im Organikbereich (Kap. 3), werden nach Untersuchungszwecken gegliedert und anschließend bewertet. Die allgemeine Bewertungsskala reicht von »unbedingt erforderlich« bis »Zusatzmethode«. Die Aussage wird z. T. durch Messbeispiele illustriert, dies in Anlehnung und als Weiterentwicklung des WTA-Merkblattes 3-4-90, Kenndatenermittlung und Qualitätssiche-

2 Nachweisverfahren und ihre Aussagen – Bereich Anorganik

Es werden Methoden, ihre Aussagekraft und Wichtigkeit für Fragestellungen sowie ihre Vor- und Nachteile mit Beispielmessungen gezeigt. Einen guten Analytiküberblick liefert Schwedt [2008]. Auf diese diskutierten Verfahren wird in zahlreichen Untersuchungen als Methoden zurückgegriffen (z. B. [Grassegger, Ožbolt, Reinhardt, 2009]).

2.1 Erfassung der Gesteins- oder Mörtelzusammensetzung

An Natursteinen und Mörteln treten die in Tabelle 1 genannten Fragen und Schäden auf, die mit den vorgestellten Verfahren aufgeklärt werden können. Analog zum WTA-Merkblatt 3-4-90/D: Natursteinrestaurierung nach WTA X: Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Naturwerksteinbauten – wird eine Bewertungs-

skala verwendet:

xxxx = äußerst wichtig, muss immer erfolgen;

xxx = sehr wichtig für exakte Arbeit;

xx = wichtig;

x = geringer wichtig, aber oft wünschenswert;

o = kann für definierte Spezialaufgaben benötigt werden.

Tabelle 1

Gesteins- und Mörtelzusammensetzung – Untersuchungsmethoden, ihre Aussage und Bewertung

Methode	Aussage der Untersuchung	Gerät/Aufwand	Bewertung
Petrographische Untersuchung am Dünnschliff	An Gesteinen, Mörteln und anderen Werkstoffen werden die Gefüge (Ausbildung und Verwachsung der Minerale) und Texturen (übergeordnete Lagen) bestimmt. Fotodokumentation mit quantitativer Vermessung von Eigenschaften möglich.	Polarisationsoptisches Dünnschliff-Mikroskop (ggf. Bildauswertungsprogramme)	xxx xxx o
Petrographie-Gesteinsansprache	Benennung des Gesteins hinsichtlich Gruppenzugehörigkeit (Gesteinsansprache), Gefüge, Textur, erkennbarer Porosität, Farbe und ggf. Heterogenität	<ul style="list-style-type: none"> ■ Auge, Lupe ■ Säuren als Test auf Karbonate ■ Bruch- und Spaltverhalten Entsprechend des wissenschaftlichen und technischen Kenntnisstandes oder nach DIN EN 12407 (2007)	xxxx
Petrographische Untersuchung an Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) oder Ähnliches	Erfassung sehr feiner Strukturen und Gefüge bis ca. 10 nm Auflösung, stark verfahrensabhängig. Wenn mit Analytikzusatz sind auch sehr feine Punktanalysen der lokalen Chemie möglich	Rasterelektronenmikroskop, ESEM mit oder ohne Analytikzusatz (z. B. EDX, WDX) oder Ähnliches	xx (wichtig für hochauflösende Messungen)
Röntgenographische Bestimmung der Kristallstruktur der überwiegend anorganischen Mineralphasen	Messung der Kristallstruktur und somit zuverlässiger Nachweis aller kristallinen Verbindungen (meist Minerale) bis zur Nachweisgrenze. JCPDS-Datenbanken mit ca. 40 000 Substanzen, fortschreibend, vorhanden	Röntgendiffraktometer (XRD) verschiedene Verfahren, meist Mischproben als Pulver, Nachweisgrenze je nach Verfahren: 1–3 % der Substanzgemische, absolut ca. 50 µg (z. B. Quarz, Panalytical X'Pert)	xxx
Quantitativer Anteil der löslichen Anionen und Kationen	Bauschädliche Salze, d. h. leicht lösliche Anteile, hier Eigenlöslichkeit unter Wassereinfluss, z. B. Sulfat, Nitrat, Nitrit, Chlorid, Fluorid, Oxalat, Carbonsäuren etc. Häufigste Kationen K, Na, Ca, Li, Mg, Sr, alle löslichen Ionen möglich, am wässrigen Extrakt	Ionenchromatographie (IC), AAS o. a. (Atomabsorptionsspektroskopie) – Nachweise je nach Detektor und Geräteausstattung im µg/l-Bereich. Wegen der Repräsentanz i. d. R. ca. 0,5 g Substanz	xxxx
Zerstörungsfreie chemische Analyse	Jede halbquantitative chemische Analyse vor Ort möglich (Einschränkung bei den leichten Elementen) – gute Voruntersuchung an Proben und im Labor	z. B. durch offenen mobilen RFA-Detektor, z. B. RF-AIR	xx
Chemische Vollanalyse Genauigkeitsstufen: a. Hauptelement b. Hauptelemente mit Nebenelementen c. Spurenelemente	Chemische Vollanalyse, an Festkörpern, Pulvern oder Schmelzlingen im Labor	Röntgenfluoreszenz (RFA)-Spektrometer, je nach Verfahren und Matrix alle Elemente bis in den unteren ppm-Bereich nachweisbar.	xx x o
Gelöste Karbonationen, wichtig für die Bildung von Karbonatausblühungen, pH-Wert, Gesamtsalzberechnungen.	Karbonatnachweis in Lösung nach wässrigem Extrakt, HCO_3^- -Ion oder CO_2 gelöst oder Gesamtkarbonaterfassung (G). (G = kann nach XRD oder mikroskopischen Befunden auch abgeschätzt werden)	z. B. CO_2 -spezifische Detektoren. G = Scheibler-Verfahren, DTA/TG Differentielle Thermanalyse/ Thermogravimetrie	x, o

2.2 Beispielhafte Nachweisverfahren

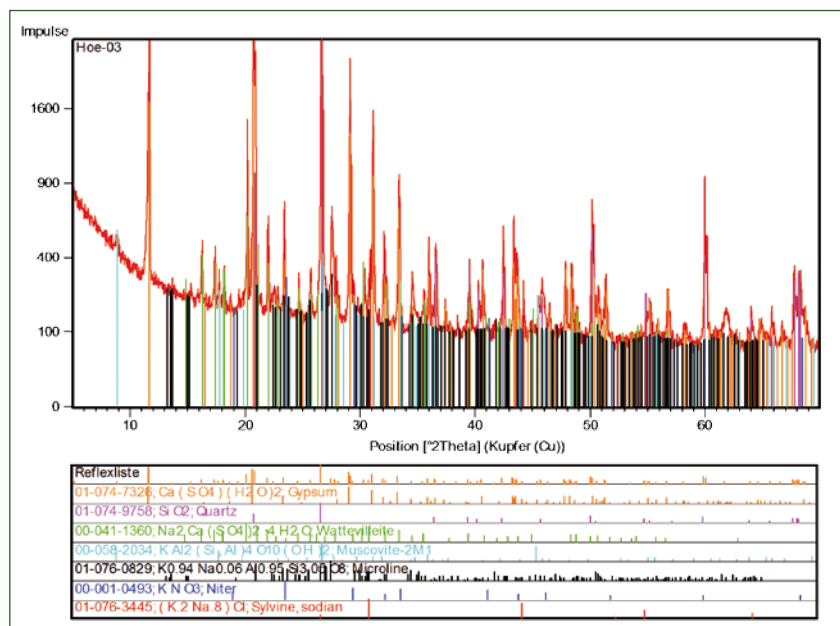
Es werden beispielhafte Spektren (erläuternd zu Tabellen 1, 3) von Fallstudien (Bilder 1–5) mit Erläuterung der Methode und Aussage gezeigt.

a) Röntgenbeugung an Pulverpräparaten (XRD)

Das Verfahren nutzt den Effekt, dass harte Röntgenstrahlung, hier meist Strahlung einer Kupfer-röntgenröhre, durch Filter als sogenannte monochromatische Strahlung ($\text{CuK}\alpha 1$) angewendet, tief in die Materie eindringt und an Kristallflächen gebeugt und rückgestrahlt wird. So entsteht ein Beugungsmuster, das typisch für den Kristallaufbau einer Substanz ist und die Gittergeometrie wiedergibt (Bild 1 und Tabelle 2). Die Zuordnung erfolgt über Berechnungsverfahren zur dreidimensionalen Kristallgeometrie, die aber bei bekannten Substanzen in einer internationalen Kartei katalogisiert sind [JCPDS] und als Spektrum verglichen wird [Massa, 2002], [Allmann, 2003].

Vorteile: Es können eine Vielzahl von kristallinen Substanzen parallel zuverlässig detektiert werden, insofern nicht zu viele Linienüberlagerungen vorliegen.

Nachteile: Es werden nur kristalline Substanzen bis zu einer Nachweisgrenze (von der Kristallinität abhängig) ca. 3% erfasst. Absolute Menge muss nachkalibriert werden. Nicht katalogisierte »unbekannte« Substanzen sind sehr schwierig und manchmal müssen zusätzlich chemische Analysen gemacht werden.



In Ergänzung zu dem XRD-Spektrum in Bild 1 wird eine typische Ergebnistabelle mit Formeln und Bewertung der Herkunft (Tabelle 2) gezeigt.

b) Ionenchromatographie – »Nachweis von bauschädlichen Salzen«

Ionenchromatographie (IC) ist das häufigste, schnelle Verfahren zum Nachweis von gelösten Ionen. Daneben gibt es viele andere Nachweisverfahren. Aus den Proben wird mit hochreinem Wasser ein hochverdünnter Extrakt hergestellt. Hiermit werden die leicht bis mittelschwerlöslichen Anteile aus dem Gestein oder Mörtel extrahiert, die meist typisch für Schadensprozesse und Belastungen

Bild 1

Röntgenspektrum einer zersetzten Natursteinprobe, roter Sandstein, mit Zersetzungsprodukten und mit Ausblühungen Gips, Kaliumnitrat, einem Natriumcalciumsulfat (Wattevilleit) und Kaliumchlorit, Minerale aus dem Gestein selbst (Tab. 2). (Röntgenbeugung an Pulverpräparat (XRD), Gerät X'Pert/Panalytical, Phasenzuordnung aktueller JCPDS-Katalog).

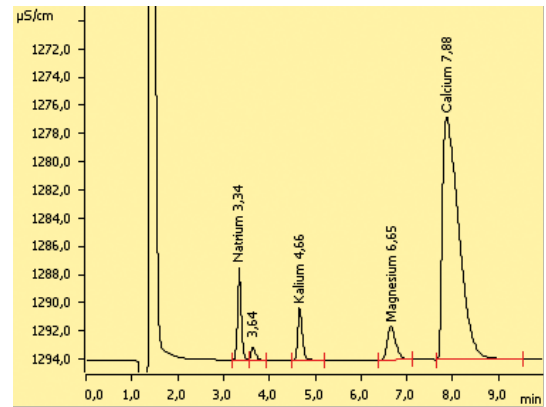
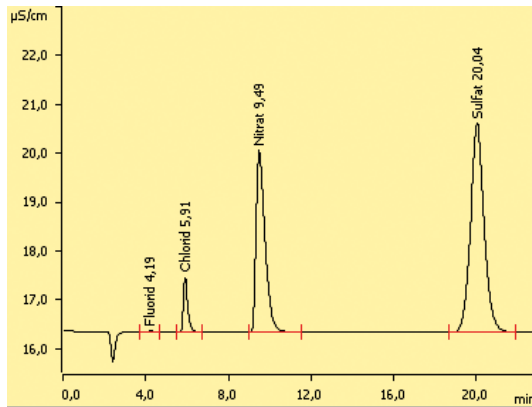
Tabelle 2

Typische Mineralphasen einer Sandsteinoberfläche mit Ausblühungen (Probe Hoe-03)

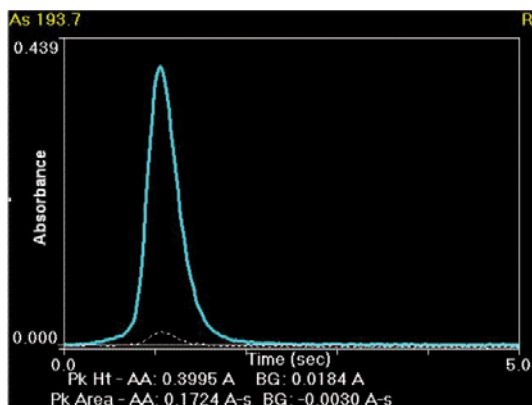
JCPDF-Nr.	Mineralname	Chemische Formel	Bewertung
01-074-9758	Quarz	SiO_2	Quarz, Hauptbestandteil des Sandsteins
01-074-7326	Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	Gips, Salzausblühung
00-041-1360	Wattevilleit	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$	Salzausblühung
00-058-2034	Muscovite-2M1	$\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Hellglimmer, Teil des Sandsteins
01-076-0829	Mikrokline	$\text{K}_{0.94}\text{Na}_{0.06}\text{Al}_{0.95}\text{Si}_{3.05}\text{O}_8$	Feldspat aus Gestein
00-001-0493	Niter, Nitrokalit	KNO_3	Salzausblühung, stark hygroskopisch
01-076-3445	Sylvinit, natriumhaltig	$\text{K}_{0.2}\text{Na}_{0.8}\text{Cl}$	Salzausblühung

Bild 2

a) Ionenchromatogramm (IC) Anionenbestimmung an der Probe HFT-NO-Fassade, Nachweis von F, Chlorid, Nitrat und Sulfat als IC-Spektrogramm.
b) Ionenchromatogramm Kationenbestimmung an der Probe der Basilika Weingarten BW-NT-GL 19 Ost rechts 0–1 cm. (Alles andere konnte ausgeschlossen werden). Ionenchromatographiespektrum für Anionen und Kationen, angegeben sind die typischen Retentionszeiten in Bruchteilen von Minuten (Gerät: Metrohm »883, Basic ICplus« mit LF-Detektor).

**Bild 3**

AAS-Spektrum, Atomabsorption aus dem atomisierten Zustand, »Hauptabsorptionslinie« für das Element Arsen bei 193,7 nm. Es wird die Peakhöhe und die Zeit für eine quantitative Aussage integriert (Modellspektrum Thermo-Fisher Scientific).



c) Atomabsorptionsspektroskopie – Nachweis von Elementen in Lösung

An Lösungen mit geringen Konzentrationen oder nach einem Aufschlussverfahren, wenn das ganze Gestein in Lösung gebracht wurde, können die Elemente nach dem spektralanalytischen Verfahren mittels AAS gemessen werden [Schwedt, 2008]. Dies erfolgt über eine Absorption der elementspezifischen Lampenstrahlung an einer atomisierten (verdampften) Probe. Jedes Element besitzt sein typisches Emissionsspektrum und Absorptionslinien (Bild 3).

Vorteile: Es liegt eine sehr hohe Genauigkeit und eine sehr tiefe Nachweisgrenze (meist im ppm bis ppb-Bereich) vor.

Nachteile: Bei nicht seriellen Geräten muss jedes Element nachgewiesen werden, d.h. man muss wissen, wonach man sucht und die Probe muss komplett aufgelöst werden.

d) Röntgenfluoreszenz – Elementanalytik an Festkörpern

Die Methode ermöglicht zerstörungsfreie Messungen am Festkörper. Durch eine harte Röntgenstrahlung wird in Stoffen ein charakteristisches Linienspektrum, die charakteristischen Röntgenlinien jedes Elementes durch Schalenübergänge erzeugt [JCPDS-Bibliothek], [Zschornak, 2007]. Diese Spektren sind quantitativ als Nachweis und Menge auswertbar. Die Nachweisgrenzen liegen bei Laborgeräten im meist unteren ppm-Bereich.

Vorteile: Keine Auflösung der Proben erforderlich,

sind. Sie gehen in die Lösung über und werden quantitativ über einen Wanderungsprozess in einer Trennsäule aufgespalten. Die Wanderung in der Trennsäule ist u. a. davon abhängig, wie stark und schnell ein Ion mit dem Säulenmaterial reagiert, so dass eine Trennung erfolgen kann. Die Komponenten des aufgespaltenen Gemisches erreichen so in unterschiedlicher Zeit einen Detektor, der die Konzentration in der Lösung über deren Leitfähigkeit misst. Dies wird über Eichungen als Peakflächenintegration quantitativ als Ionengehalt bestimmt und auf das Trockengewicht der Probe zurückgerechnet (Bilder 2a und b). (Die Geräte sind auf die erforderlichen Nachweise abgestimmt).

Vorteile: Es ist eine simultane Multielementmethode. Was nicht detektiert wurde kann auch ausgeschlossen werden.

Nachteile: Schwerlösliche Anteile werden nicht gelöst und erfasst. Es kann durch falsche Säulen oder gealterte Säulen zu Fehlmessungen kommen. Ergänzende Verfahren wären chemische Vollanalysen, die die gesamte Zusammensetzung erfassen.

d.h. Festkörperversfahren. Es kann eine Übersichts- bis simultane quantitative Multielementanalyse erfolgen [Hahn-Weinheimer et al., 2000]. Quantitative Analysen werden als Element- und Spurenelementlisten erfasst (Tabelle 3). An Originaloberflächen sind z.B. qualitative Spektren messbar (Bild 4). Im Fall von Bild 4 konnte gezeigt werden, dass keine färbenden Elementlösungen vorliegen, sondern die Ursache eine Durchfeuchtung mit Lösungen von Huminsäuren war.

Der optisch gut erkennbare Reinigungseffekt (Tabelle 3), bestehend aus Aufhellung, Entstaubung und »Flechtenentfernung« war chemisch als deutlich reduzierte Ca, SO_3 , Ba, Cl, (Pb), Cu und Cr-Bestandteile nachweisbar, was einer typischen Kalzit- und Gipsstaubfraktion mit Schwermetallen entspricht, die entfernt wurde.

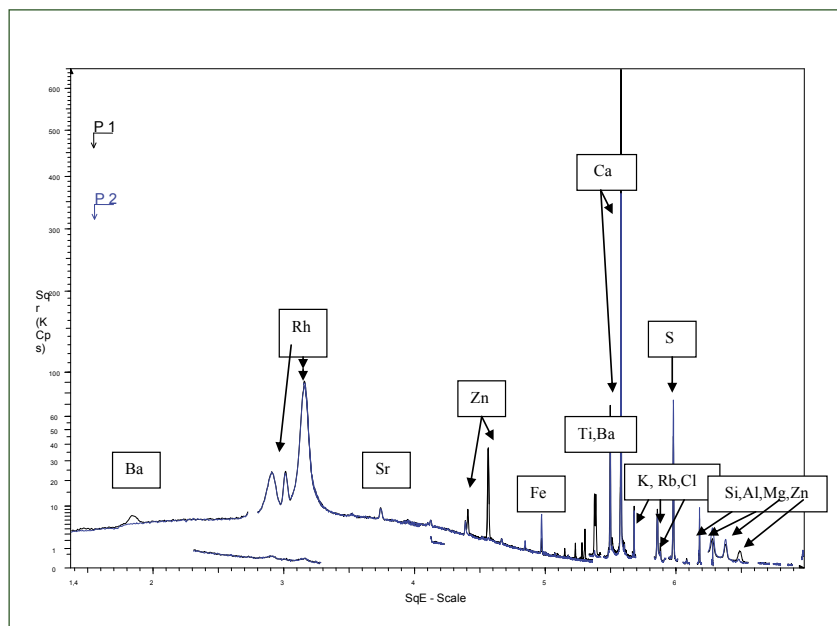


Tabelle 3

RFA-Vergleichsmessung von gereinigten und ungereinigten Graniten, quantitative Aussagen zu Staub- und Schwermetallbelastung an Pulvern der Oberflächen (Amerikanisches Nationaldenkmal Mount Rushmore/South Dakota, USA)

	Ungereinigte Oberfläche	Gereinigte Oberfläche
Element	M.-%	M.-%
SiO_2	68,75	65,84
Al_2O_3	16,30	18,51
TiO_2	0,13	0,13
Fe_2O_3 (gesamt)	2,35	2,71
MnO	0,02	0,02
MgO	0,84	0,92
CaO	1,44	0,95
K_2O	5,97	6,53
Na_2O	2,92	3,25
P_2O_5	0,86	0,87
SO_3	0,30	0,14
Spurenelemente	ppm	ppm
Ba	490	< 20
Rb	352	354
Cl	220	36
Zn	209	232
Pb	100	86
Cu	86	31
Sr	49	48
Y	34	27
Zr	25	22
Nb	18	<10
Cr	15	<10

Bild 4

Gelbe Verfärbungen an der Stuckdecke eines Schlosses, Probe P1 gelbverfärbt, P2-Vergleichsprobe, qualitatives Nachweisspektrum auf unveränderter Oberfläche (RFA-Gerät, Siemens SRS-3000, Rhodiumröhre)

Bild 5

Einsatz des mobilen Röntgenfluoreszenzanalysators an einem Baustoff, hier am Schilfsandstein einer Fassade. Bei der neuesten Generation der mobilen RFA wird z. B. mit Messfenster-Durchmessern von 3–8 mm die chemische (halbquantitativ) Zusammensetzung eines Baustoffs schnell, zerstörungsfrei gemessen (hier Gerät Niton X L3 RF-AIR).



Bei den kleinen mobilen RFA-Geräten (Bild 5) erfolgt die Anregung der Röntgenstrahlung über eine 50 KV- Röhre mit einer Ag-Anode, die schwere und leichte Elemente anregt und dadurch messen lässt. Die Genauigkeit hängt in der Baustellenpraxis sehr von der Qualität der Oberfläche und dem »Luftspalt« ab. Theoretisch liegt die Nachweisgrenze auch im ppm-Bereich, was aber in der Praxis durch die Messbedingungen im Gegensatz zu RFA-Festgerätmessungen im Labor kaum erreichbar ist (z. B. Niton RF-AIR, mobiler Röntgenanalysator).

Probenmengen: Verfahren wie die Röntgenbeugung an Pulvern und die Röntgenfluoreszenz ermöglichen eine direkte Analyse am Festkörper, d. h. es wird ein Querschnitt der Probe gemessen. Zur Analytik selbst genügen Milligramm für die Nachweise, aber da das Material hier sehr heterogen ist, werden meist Mindestmengen von 0,5 g bis mehrere Gramm (zerstörend) – pulverfein aufgemahlen – verwendet.

2.3 Chemisch-physikalische und technische Kennwerte zum Verwitterungszustand

Komplexe Veränderungen bei Verwitterungen wie z. B. Schmutzschichten werden durch mehrere Verfahren untersucht, z. B. auf Mineralveränderungen, Salze, Immissionspartikel und organische Komponenten an Oberflächen (z. B. Siedel; Schwarz und Steiger in diesem Band).

Die vorrangigen Methoden werden in Tabelle 4 mit Bewertung der Aussage genannt. Die in Tabelle 1 genannten Methoden können alle (erneut) zum Einsatz kommen. Wichtig ist es hierbei, die Proben einmal im Ausgangszustand, die sogenannte 0-Probe, als Vergleichsbasis zu den Messungen im Zersetzungszustand zu verwenden. Bewertet werden meist relative Veränderungen.

Die meisten technischen Gesteinskennwerte sind im Bauwesen in Normen geregelt. Dies funktioniert nur insofern ausreichende Probenanzahlen und -größen vorhanden sind, so dass in Forschungsprojekten und Vorschlägen wie DIN EN 16515: Erhaltung des kulturellen Erbes – Leitfaden zur Charakterisierung von Naturstein in der Denkmalpflege – zudem zusätzliche Verfahren für kleinere Proben vorgeschlagen werden (auch als halbquantitative Abschätzungen (siehe auch Tabelle 4). Es gibt außerdem immer wissenschaftliche (neue) Verfahren zu detaillierten Nachweisen.

3 Nachweis von organischen Verbindungen im Natursteinmaterial

Von großer Wichtigkeit für die Konservierung von Natursteinmaterial ist die Kenntnis über das Eindringverhalten, die Verteilung und Reaktion von Tränkungsstoffen im zu behandelnden Gestein. Dies gilt sowohl für bisher nicht behandelte Objekte, besonders aber für solche mit früheren Konservierungen (Abbauzustand der früher eingebrachten Stoffe). Vor dem Aufbringen von Schutzstoffen sollten deshalb gezielt Informationen über a) frühere organische Beschichtungen, b) alte (unbekannte) Hydrophobierungen oder Festigungen, c) organische Verschmutzungen oder d) sonstige hemmende Verbindungen für die erneute Behandlung gewonnen werden. Hier sind besonders konkrete Verdachtsfälle oder Objekte, bei denen Vor-Tests positiv verlaufen sind, zu betrachten. Als Indikatoren können dabei herangezogen werden:

- Bauwerk zeigt wasserabweisende Effekte, d. h. Wasser benetzt nicht (z. B. bei der Tropfenaufsetzmethode oder durch eine aussagekräftige Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme auf Werte < 30 % des Ausgangswerts).

Tabelle 4

Belastung und Zersetzung von Gesteinen – Untersuchungsmethoden und ihre Aussage und Bewertung

Methode	Aussage der Untersuchung	Gerät/Aufwand	Bewertung
Quantitativer Anteil der löslichen Anionen und Kationen	Bauschädlichen Salzgehalte, z. B. für Mauerwerksdiagnostik WTA-MB 4-5-99/D	z. B. IC, AAS, s. o. aus dem wässrigen Extrakt, Nachweisgrenze der Verfahren ca. µg/l. Typische Probenmenge ca. 1 g Substanz/50 ml Aqua reinst.	xxxx
Ultraschall-Messungen zur Zerstörung	Abnehmende Schalllaufgeschwindigkeit, veränderter E-Modul, veränderte Festigkeit	z. B. Patitz in diesem Band	xxx
Bohrwiderstandsmessungen	Relatives Festigkeitsprofil als Bohr-widerstand oder -geschwindigkeit gemessen.	Musteruntersuchungen Bohr-widerstand oder technische Vorgaben der Hersteller (z. B. Geotron, Sint) und z. B. [Franzen, Weise ,2005], [Pamplona et al. 2007]	xx
Porositätsmessungen	Größenordnung der Porenverteilung und Gesamtmenge vor und nach dem Schaden	Technische Leitlinien, z. B. für BET (Bestimmung innerer Oberflächen) oder Hg-Porosimetrie	xx
Wasseraufnahme integral	Zeigt gesamte Porosität in Vol.-% oder M.-% Wasseraufnahme Vorher-Nachher-Zustand	z. B. nach DIN EN 13755 (2002) Wasserlagerungsausstattung, Waagen (siehe Norm)	xxx
Kapillares Wassereindringen von Wasser in Naturstein oder Mörteln	Zeigt kapillare Wasseraufnahmemenge, -zeit, Steighöhe an	DIN EN 1925:1999-05, DIN 52617, DIN EN 15801 DIN EN 772-11	xxxx
Kapillares Wassereindringen (lokal am Stein oder vor Ort)	Zeigt die Wasseraufnahme durch eine Kapillarprozesse	Karsten'sche oder Mirowski Wassereindring-Prüfröhrchen [Wendler, Snethlage, 1989]	xxxx
Feuchteabsorption/ Gleichgewichtsfeuchte	Nach Normen, z. B. Venzmer (in diesem Band)	Maß für Hygroskopizität, Feuchteaufnahme und -abgabe aus der der Luft	x
Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl µ-Wert	Zur Erfassung der Diffusionsdichtigkeit von Baustoffen, Naturstein mit und ohne Behandlungen	Nach Norm DIN 52615, DIN EN 15803	x
Verwitterungsstabilität von Natursteinen	Prinzipielle Zuordnung meist von der Gewinnungsseite (Eigenschaften des Natursteins, Eignung)	DIN EN-Normen Alterungssimulation Ermöglicht auch weitere Tests zur Haltbarkeit, Dauerhaftigkeit	xx
Abschätzung durch händische Zerdrückbarkeit	Festigkeitswert liegt unter 1,5 N/mm ²	Einfacher Vortest	xxxx

- Charakteristische Reaktionen bei der Untersuchung von gewonnenem Probenmaterial; Identifizierung alter Festigungen sind durch Gel-nachweis im Mikroskop/REM möglich, häufig auch durch einen Farbkomplex, der auf den Zinn-haltigen Katalysator (bei vielen früheren Si-organischen Festigern eingesetzt) anspricht.
- Aktenlage oder erkennbare Farbschichten sowie Spuren sonstiger Behandlungen.

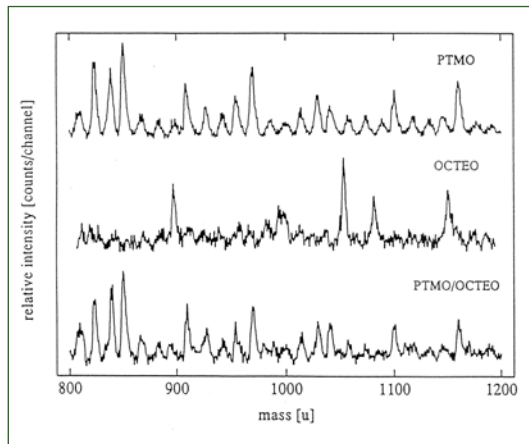
In vielen Fällen reicht eine Voruntersuchungen zur Wirksamkeit einer (erneuten) Behandlung durch Kennwertermittlungen. Wird jedoch eine Detail-information benötigt, stehen auch experimentelle Analyseverfahren für organische Inhaltsstoffe zur Verfügung. Tabelle 5 gibt hierzu einen groben Überblick und beschreibt die Anwendungsziele der Ver-

fahren sowie Vorzüge und Einschränkungen. Ein direkter Vergleich der Methoden ist wenig sinnvoll, da sowohl die notwendige Vorbehandlung der Proben als auch die erzielbaren Information unterschiedlich sind. Grundsätzlich kann angemerkt werden, dass meist eine Kombination von Verfahren erfolgversprechend ist.

Den Schwerpunkt der Ausführungen bildet beispielhaft die Untersuchung von Hydrophobierungsmitteln auf Silan- und Siloxanbasis. Im Rahmen von Forschungen wurde systematisch der Nachweis der Polymere in Gesteinen und deren Abbauverhalten untersucht [Bruchertseifer, 1995], [Bruchertseifer et al., 1996 b], [Bruchertseifer et al., 1998], [Bruchertseifer, 1999]. Im Hinblick auf eine Charakterisierung des Polymerisationsgrades der Sila-

Bild 6

Typische Massenspektren der TOF-SIMS Methode von verschiedenen Silanen auf silikatischem Gestein: C₃ (PTMO, Propyltrimethoxysilan) und C₈ (OCTEO, Octyltriethoxysilan) – oben C₃, Mitte C₈, unten Mischung C₃ und C₈-Silane (aus [Bruchertseifer et al., 1995], [Bruchertseifer et al., 1996a]).



ne und Siloxane im Gestein erwies sich die Massenspektroskopie, im Besonderen hier das TOF-SIMS Verfahren (statistische Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektroskopie) als besonders lohnenswert. Bei der TOF-SIMS-Technik kam ein Versuchsaufbau der Universität Münster [Benninghoven, 1994] zum Einsatz. Dabei wird die Probe mit Primärionen in einer Vakuumkammer beschossen. Durch die Energie der auftreffenden Ionen werden charakteristische Bruchstücke (als Sekundärionen) aus der Probenoberfläche herausgeschlagen. In einem Beschleunigungsfeld erhalten alle Bruchstücke dann die gleiche kinetische Energie und können auf Grund unterschiedlicher Massen im Spektrometer durch unterschiedliche Auftreffzeiten auf den Detektor (massenabhängige Geschwindigkeit) getrennt und quantitativ analysiert werden. Bei der Untersuchung der Polymerisation unterschiedlicher Silane (Methyl-, Propyl- oder Octyl-Verbindungen) in verschiedenen Gesteinen konnten abhängig von der funktionalen Gruppe und dem eingesetzten Katalysator unterschiedliche Kettenlängen und Käfigstrukturen der gebildeten Polymere an Hand des Auftretens spezifischer Massen identifiziert werden (Bild 6).

Die resultierenden Verbindungen auf der Oberfläche der Gesteinsmatrix in Bild 6 unterscheiden sich durch den Kondensationsgrad und die Vernetzungsstruktur. Anhand der Massen kann der Vernetzungsgrad bestimmt werden. Große Massen (Mass_u-Skala) deuten auf hohen Vernetzungsgrad hin (Spektren aus [Bruchertseifer et al., 1995], [Bruchertseifer et al., 1996a]). Wichtigste Aussage der vorliegenden Untersuchung: das Auftreten hoher Massen bei einer Octylverbindung ist sehr

überraschend, da die Vernetzung bei der sterisch gehinderten Octylgruppe sonst eher gering ist. Dieser Effekt wird nur bei der Einzelsubstanz OCTEO, nicht aber bei der Mischung mit PTMO beobachtet. Auch bei Anwesenheit eines Katalysators resultiert für die Octylverbindung in der Mischung nur eine geringe Vernetzung (Kettenlänge max. 3–4), hohe Massen im Bereich von 1000 werden hier nicht beobachtet. Vergleichbare Untersuchungen mittels TOF-SIMS, hier jedoch an einer Zementmatrix, wurden von Süßmuth [2012] durchgeführt.

Zur Identifizierung der verschiedenen Silan- bzw. Siloxan-Materialien und deren Abbauprodukte können weitere spezielle spektroskopische Verfahren eingesetzt werden. Für den Nachweis bzw. die chemische Identifizierung bieten sich Festkörpermethoden wie z. B. die FT-IR-Spektroskopie (Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie) und die XPS (Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie) an. Die Bestimmung der Eindringtiefe von Hydrophobierungsmitteln kann durch eine tiefen-selektive, schrittweise Probengewinnung mit anschließender Herstellung von KBr-Presslingen erfolgen [Gerdes, Wittmann, 1995]. Eine Alternative stellt die Anwendung der FT-IR-Mikroskopie dar, mit der durch Linescans quer zur Oberfläche eines Probenstücks ebenfalls das Profil einer Hydrophobierung nachgewiesen werden kann [Jungermann, 2003].

Im Rahmen der Forschungen von Bruchertseifer wurde für die Gewinnung von IR-Spektren speziell die DRIFT-Technik (diffuse Reflexion) angewendet. Die Probe wird hierbei fein aufgemahlen und mit KBr als nicht absorbierende Matrix verdünnt. Durch einen speziellen DRIFT-Aufsatz kann dann im IR-Spektrometer die an der Probe diffus gestreute IR-Strahlung fokussiert und analysiert werden. Als weitere sensitive IR-Techniken kommen aber auch die ATR (Anwendung der abgeschwächten Totalreflexion) und MIR (IR mit multipler interner Reflexion) in Frage. Mit Hilfe der DRIFT-Technik konnte Bruchertseifer [1998] ergänzende Erkenntnisse zu den bereits geschilderten TOF-SIMS-Ergebnissen erreichen. Bild 7 zeigt DRIFT-Spektren der bereits angesprochenen C₃ und C₈-Silane auf einem Gestein mit Tonmineralanteilen. Durch die genaue Betrachtung der C-H-Valenzschwingungen im Bereich von 3000 bis 2800 cm⁻¹ kann die Hydrolyse der Silane untersucht werden. Das Fehlen der

C-H-Valenzschwingungen der Alkoxygruppe zeigt die Umsetzung/Polymerisation des Silans an. Da auch verschiedenste Minerale IR-sensitiv sind und Banden im Spektrum liefern, müssen diese beachtet und durch Kontrollmessungen an unbehandelten Proben abgezogen werden.

Bruchertseifer [1999] konnte bei diesen Untersuchungen nachweisen, dass sowohl das Substrat, die Vorpolymerisation und funktionalen Gruppen der verwendeten Silane und der Katalysatortyp eine Rolle für die Qualität und Vernetzung der späteren Hydrophobierung spielen.

Die Praxisanwendung der DRIFT-Technik erfolgte bei der Untersuchung einer Langzeitexposition von Natursteinmaterial (ca. 8 Jahre exponiert), das mit verschiedenen Hydrophobierungsmitteln behandelt worden war. Wie zu erwarten, lag die Eindringtiefe von primär niedermolekularen Produkten wie Silanen deutlich höher, hier 7 mm gegenüber den länger-kettigen Siloxanen, hier 4 mm. Im Hinblick auf die gebildeten Polymere zeigten sich sehr unterschiedliche Trends: Bei niedermolekulare Silanen wurde durch Nachkondensation die Hydrophobierung verbessert, bei höhermolekularen wurde sie durch die Verwitterung z. T. abgebaut. Ein katalytischer Einfluss, d. h. Verbesserung der Vernetzung, durch die Minerale selbst war ebenfalls nachweisbar. In vielen Fällen konnte beobachtet werden, dass ein hoher Quarzanteil im Gestein die Anlage- und die Vernetzung der Produkte verbessert. Alle Interpretationen aus den Spektren konnten mit Funktionsnachweisen zum Wirkungsgrad der Hydrophobierung bestätigt werden [Bruchertseifer et al., 1995]. Die sehr komplexe Anbindung an die Oberflächen und der variierende Abbau bei natürlicher Exposition wurde von Bruchertseifer et al. [1996b] dann mit der DRIFT Methode und linearisierter Signalhöhe zur Konzentrationsbestimmung mittels Kubelka-Munk-Spektren betrachtet (Bild 8). Ergebnis: Einflüsse auf die Reaktionen mit dem Gesteinsmaterial werden durch Lösemittel, Katalysatoranteil, Kettenlänge der Silane und das Vorliegen eines vorkondensierten Kieselsäureesters (TEOS) ausgeübt. Längerkettige Silicone haben hierbei manchmal die Tendenz, schneller zu kondensieren als sich anzulagern, was eine Erklärung für schlechtere Hydrophobie ist. Es konnten Oberflächenanreicherungen und wasserabweisende

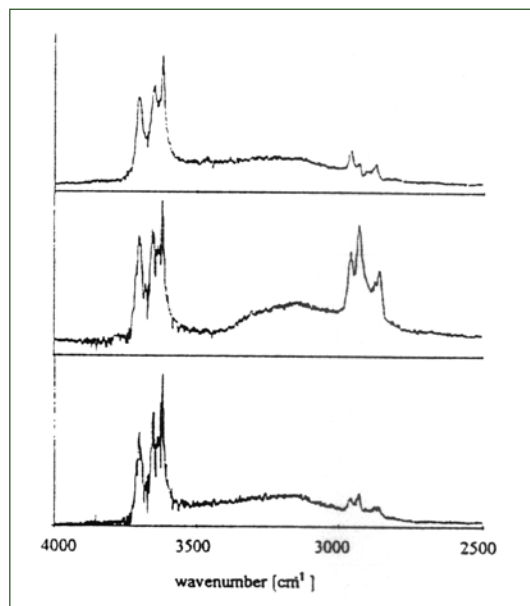
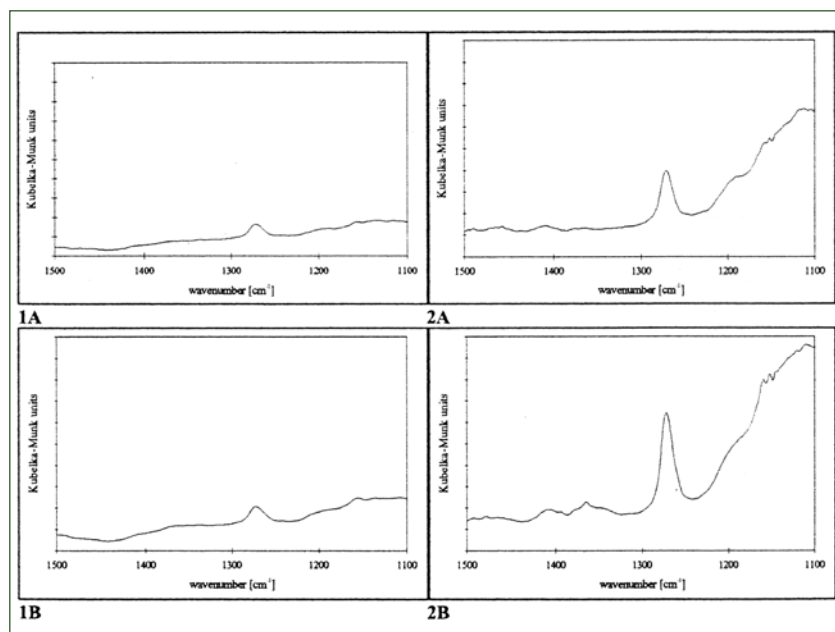


Bild 7
DRIFT-Spektren (IR-Spektroskopie mit diffuser Reflexion) liefern im Bereich der Wellenzahlbereich von 3000 bis 2800 cm^{-1} Aussagen zur unterschiedlichen Vernetzung von Propyltrimethoxysilan und Octyltriethoxysilan-Systemen sowie deren Mischung (aus [Bruchertseifer et al., 1998]).



Überzüge für applizierte Silanmischungen auch an alten Proben nachgewiesen werden [Bruchertseifer et al., 1997]. Insgesamt zeigten all diese Untersuchungen, dass die DRIFT-Technik ein sehr aussagekräftiges Werkzeug für die Analyse der Prozesse bei der Hydrophobierung von Gesteinen ist.

Ergänzend zur DRIFT-Technik sind in den Untersuchungen auf Natursteinen, Ziegeln und Beton auch substratspezifische Reaktionen von verschiedenen Siliconformulierungen mittels XPS und ESCA (Röntgenfotoelektronen-Spektrometrie) beobachtet worden. Mit dieser Technik werden die Oberflächen-

Bild 8
DRIFT-Messungen an behandelten Proben (A mit Methylsilicon, B mit Octylsilicon) von Schleierthaler Sandstein 1 und Obernkirchner Sandstein 2 (aus [Bruchertseifer et al., 1996b]). Die negativen Einflüsse der tonigen Matrix sind deutlich zu erkennen.

belegungen im Nanometerbereich erfasst. Anhand der unterschiedlich ausgeprägten Abdeckung der Substratelemente wie z. B. Al, Mg, Ca, Si, Fe etc. lassen sich deutliche Unterschiede in der Grenzflächenreaktivität der untersuchten Steinmaterialien mit den Hydrophobierungsmitteln aufzeigen und so die DRIFT-Ergebnisse unterstützen [Bruchertseifer et al., 1997].

Neben den oben genannten spektroskopischen Methoden gibt es eine Reihe weiterer Verfahren, mit denen eine Untersuchung organischer Komponenten in Gesteinsmaterial durchgeführt und Aussagen zur Belegung erreicht werden können. Diese Methoden und eine Charakterisierung sind in Tabelle 5 aufgelistet. Mittels der Rasterelektronenmikroskopie können hochauflösend die Belegungen

im Porensystem untersucht werden [Lork, et al., 2005]. Ein Überblick über die Verteilung der organischen Substanzen im Gestein kann auch mit der Kernspinresonanz (NMR) erzielt werden, mit der Magic Angle Spinning-Nuclear Magnetic Resonance (MAS-NMR) sind zusätzlich Strukturaussagen möglich. Mittels Pyrolyse-GC-MS können die organischen Substanzen verdampft, mit Hilfe der Gaschromatographie getrennt und mittels Massenspektroskopie quantitativ analysiert werden. Eine weitere Gruppe von Nachweisverfahren sind Methoden, die mit Lösemittel-Extraktionen und Trennung sowie Nachweis der löslichen/extrahierbaren Anteile durch chromatographische Techniken arbeiten (GPC = Gelpermeationschromatographie, HPLC = Highperformance Liquidchromatographie).

Tabelle 5

Nachweisverfahren für Polymere in Gesteinen und deren Strukturaufbau bzw. Zustand im Überblick

Methode	Aussage der Untersuchung	Gerät/Aufwand	Einsatz – Bewertung
Fourier-Infrarot-Spektrometrie (FT-IR) Mit speziellen Zusätzen: DRIFT (diffuse Reflektion) ATR (abgeschwächte Totalreflexion) MIR (multiple interne Reflexion) IR-Mikroskop	einige µm in das Substrat hinein charakteristische IR-Banden für Silicone, Zustand der Hydrophobierungen und ggf. Abbauprozesse	Spektrometer mit IR-Bibliothek erforderlich Messungen meist an Pulvern, z. T. direkt auf dem Festkörpern	Gute Überblicksmethode auf organische Komponenten Aussagen zu Verteilung (Profilen), Vernetzung und Abbau von Hydrophobierungen
MAS-NMR (Magic Angle Spinning-Nuclear Magnetic Resonance)	gesamte Probe wird erfasst; Resonanz von org. Molekülen in Magnetfeldern	sehr viel Probesubstanz notwendig	Eigenschaften von Siliconoberflächen-Schichten; Strukturinformationen möglich
TOF-SIMS Methode (statische Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie)	Oberste Monolagen Abtrag von polymerbelegten Oberflächen	Spezialverfahren der Massenspektrometrie Hoher Geräteaufwand, eher in Forschungseinrichtungen.	Strukturinformationen möglich; Forschungsmethode, teuer
XPS/ESCA (Röntgenfotoelektronen-Spektrometrie)	Oberste Monolagen Strahlungsanregung im Nanometerbereich	spezifische Oberflächenuntersuchung; hoher Geräteaufwand, eher in Forschungseinrichtungen	Strukturinformationen möglich, Interpretation sehr aufwändig; Forschungsmethode, teuer
REM Rasterelektronen-Mikroskopie Verschiedene Techniken: FEM (Feldemissionstechnik) ESEM (Messung bei Normaldruck) Kryo-REM	Hochauflösendes Verfahren mit Elektronenanregung (Kryo: Messung stark abgekühlter Proben)	Messung direkt an den Proben	Erfassung der Belegungsdichte und -verteilung möglich organische Filme z. T. schwierig zu detektieren
Chromatographische Methoden: Pyrolyse GC-MS HPLC (Highperformance Liquidchromatographie) GPC (Gelpermeations-chromatographie)	Lösbare Anteile, Zerfallsprozesse Extrahierbare Bestandteile, Abbaureaktionen	Unterschiedliche Chromatographie-Verfahren	mittel bis sehr aufwändig, aber zeigt eindeutig durch direkten Nachweis der Komponenten »Weichmacher«, Wanderungen, extrahierbare Anteile, Rest Lösemittel, etc.

Literatur und Quellen

- [Allmann, 2003] Allmann, R., (2003): Röntgenpulverdiffraktometrie. Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage
- [Benninghoven, 1994] Benninghoven, A., (1994): Chemische Analyse von anorganischen und organischen Festkörperoberflächen und von dünnen Schichten mit der statischen Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS). Angew. Chem., S. 1075–1096
- [Bruchertseifer, 1995] Bruchertseifer, C., (1995): Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Bestimmung der Langzeitwirkung von Hydrophobierungsmitteln. Diplomarbeit, Fachbereich Anorganische Chemie der Westf. Wilhelms-Universität Münster
- [Bruchertseifer et al., 1995] Bruchertseifer, C., Brüggerhoff, S., Grobe, J., Stoppek-Langner, K., (1995): Long-term exposure of treated natural stone – development and first results of a testing concept. Proceedings of the 1st International Symposium on Surface Treatment of Building Materials with Water Repellent Agents, 9.–10.11.1995, Delft, Niederlande, Beitrag: 27, S. 1–11
- [Bruchertseifer et al., 1996a] Bruchertseifer, C., Stoppek-Langner, K., Grobe, J., Deimel, M., Benninghoven, A., (1996): Untersuchung der Effektivität und Langzeitstabilität von Silicon-Bautenschutzmitteln mit Hilfe der statischen Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS). Kurzfassungen der Beiträge zur 9. Arbeitstagung »Angewandte Oberflächenanalytik« vom 24.–27. Juni 1996 in Aachen, Hrsg.: Forschungszentrum Jülich GmbH, S. 123
- [Bruchertseifer et al., 1996b] Bruchertseifer, C., Brüggerhoff, S., Grobe, J., Götze, H.-J., (1996): Drift investigation of silylated natural stone – molecular surface information and macroscopic features. Proceedings 8th Int. Congr. on Deterioration and Conservation of Stone, Berlin, 30.9.–4.10.1996, Volume 3, S. 1223–1231
- [Bruchertseifer et al., 1997] Bruchertseifer, C., Götze, H.-J., Störger, R., Albers, P., (1997): Organosilane für die Baustoffhydrophobierung – Oberflächenanalytische Studien zur Erweiterung der mikroskopischen Perspektive. ConChem-Journal 1/97, 11–17 und in: Tagungsber. des 4. Int. Kolloquiums »Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen« vom 17.–19.12.1996 Techn. Akademie Esslingen, Bd. 1, S. 257–272, Aedificatio Publishers, Freiburg
- [Bruchertseifer et al., 1998] Bruchertseifer, C., Brüggerhoff, S., Stoppek-Langner, K., Grobe, J., Jursch, M., Götze, H.-J., (1998): Organosilicon Compounds for Stone Impregnation – Long-Term Effectivity and Weathering Stability. In: Organosilicon Chemistry III, Ed.: Auner, N., Weis, J.; Wiley-VCH, Weinheim, S. 531–537
- [Bruchertseifer, 1999] Bruchertseifer, C., (1999): Spektroskopische Untersuchungen zur Effektivität und Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmitteln auf der Basis von Organosiliciumverbindungen auf mineralischen Oberflächen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum
- [Gerdes, Wittmann, 1995] Gerdes, A., Wittmann, F. H., (1995): Bestimmung der Eindringtiefe eines Hydrophobierungsmittels mit Hilfe der FT-IR-Spektroskopie. Int. Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1995/1, S. 135–152
- [Jungermann, 2003] Jungermann, W., (2003): Untersuchung der Wirk- und Eindringtiefe von Hydrophobierungen. Bachelorarbeit, Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum
- [Lork, et al., 2005] Lork, A., Köhler, J., Sandmeyer, F., Weis, J., (2005): Nanoscale Networks for Masonry Protection. In: Auner, N. & Weis, J. (Eds): Organosilicon Chemistry VI: From Molecules to Materials, Wiley-VCH, Weinheim, S. 825–858
- [Süßmuth, 2012] Süßmuth, J., (2012): Entwicklung eines Modells der Verteilung und Größe von Siloxan-Oligomeren auf mineralischen Oberflächen – Experimentelle und computerchemische Untersuchungen. Dissertation, Fak. Bauingenieur-, Geo u. Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
- [Franzen, Weise, 2005] Franzen, Ch., Weise, St., (2005): Dorfkirche in Thierfeld Begleitung der Restaurierung an mittelalterlichen Wandmalereien in der Babarakapelle, DBU-Projekt: AZ 17565-45, Bericht DD 12/2004, IDK Dresden (Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V., 19 Seiten (DBU digital)
- [Grassegger, Ožbolt, Reinhardt, 2009] Grassegger, G., Ožbolt, J., Reinhardt, H.-W., (2009): Wie belastbar und heterogen ist Sandstein? Ergebnisse von experimentellen Daten und FE-Simulationen an baden-württembergischem Schilfsandstein,

- S. 59–80. In: Grassegger, G., Werner, W., Wölbert, O.: Die Naturwerksteinvorkommen in Baden-Württemberg und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur. Arkus 2009, Tagung in Baden-Württemberg am 29.10.2009, Tagungsband ARKUS-Tagung 2009, IRB Verlag
- [Hahn-Weinheimer et al., 2000] Hahn-Weinheimer, P., Hirner, A., Weber-Tiefenbach, K., (2000): Röntgenfluoreszenzanalytische Methoden. Grundlagen und praktische Anwendungen in den Geo-, Material- und Umweltwissenschaften, Vieweg Verlag – Analytische Chemie, 2. Auflage, 284 Seiten
- [JCPDS-Bibliothek, -Datenbank]: Internationale Datenbank des »Joint Committee of Powder Diffraction Data«, des ICDD (Int. Center of Diffraction Data), Newton Square/PA, USA (laufend ergänzter Katalog von Röntgenstruktur-Messdaten).
- [Pamplona et al. 2007] Pamplona, M., Kocher, M., Snethlage, R., Barros, L. A., (2007): Drilling resistance: overview and outlook, Z. Dt. Gesell. für Geowiss., Vol. 158, Nr. 3, September 2007, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, S. 665–679
- [Schwedt, 2008] Schwedt, G., (2008): Analytische Chemie, Grundlagen, Methoden, Praxis, 543 Seiten, Wiley-VCH, Weinheim
- [Snethlage, Pfanner, 2013] Snethlage, R., Pfanner, M., (2013): Leitfaden Steinkonservierung, 4. überarb. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, 347 Seiten
- [Wendler, Snethlage, 1989] Wendler, E., Snethlage, R., (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Meßwerte. Bautenschutz & Bausanierung; 12, S. 110–115
- [Zschornak, 2007] Zschornak, G., (2007): Handbook of X-Ray data, Springer Verlag, 984 Seiten

Von der bauhistorischen Voruntersuchung zum Maßnahmenkonzept

Bei der Untersuchung von Bauwerken kommt es immer wieder zur Beobachtung baulicher Besonderheiten, die Fragen hinsichtlich ihrer Bedeutung aufwerfen. Vor allem bei der Konzeption von Natursteinsanierungen, aber auch in vielen anderen Fällen hat sich gezeigt, dass historische Bauforschung durch Beobachtung und Interpretation wertvolle Hinweise für die Erstellung substanzschonender und denkmalgerechter Maßnahmenkonzepte liefert.

Till Läßle
Tilman Riegler

Schlagwörter: historische Bauforschung, Gefügekunde, Baubefund, Steinmetzzeichen, Oberflächenbearbeitung, Bauphasenplan, Baualterskartierung, Befundplan

1 Regiswindiskapelle in Lauffen a. N.

1.1 Baugeschichtliche Hintergründe

In unmittelbarer Nähe der Regiswindiskirche in Lauffen a. N. befindet sich die aus dem Ende des 13. Jahrhunderts stammende ehemalige Friedhofskapelle St. Anna. Im Untergeschoss befand sich bis 1853 das Ossuarium (Beinhaus) des angrenzenden Friedhofes. Seit 1832/33 wird sie als Regiswindiskapelle¹ bezeichnet.

Der quadratische Ursprungsbau ist ein steinsichtiger Massivbau aus Quadersteinen mit Wandöffnungen aus Werkstein. Er hat eine Grundfläche von ca. 3,60 × 3,60 m und ein massives Steindach. Nach Osten schließt der mit Maßwerkfenstern durchbrochener Chor mit $\frac{5}{8}$ -Schluss an, der sich mit einem spitzbogigen Durchbruch zum Hauptgebäude hin öffnet und von einem Rippengewölbe überfangen ist.

Die Kapelle zeichnet sich durch eine rege Bau- und Nutzungsgeschichte aus. Um 1440 wurde sie um

einen Chor erweitert. Die Nutzung als Kapelle ist zu einem unbekannten Zeitpunkt aufgegeben worden. Danach wurde sie als Lagergebäude genutzt, was sich durch Archivalien und Baubefunde belegen lässt. Im Jahr 1725 gab es z. B. einen Brand durch in der Kapelle eingelagertes Stroh. Spuren des Brandes, in Form von teilweise intensiv rötlicher Färbung der Oberflächen, sind noch heute im Inneren der Kapelle sichtbar. 1764 kam es zum Beschluss des Magistrates, die Kapelle abzureißen. Das Grundstück sollte dem Hilfslehrer S. Göz als Gartenland zugewiesen werden. Nach einer mündlichen Nachricht soll dessen Frau um 1765 durch ihre Erklärung,

»sie esse keinen Salat von einem Platz, wo vordem einen Gruft gestanden«,

den Abbruch verhindert haben. Nach erneuter Rettung vor dem Abbruch im Jahr 1827 kam es in der Folge zu einigen Renovierungsmaßnahmen. Nach ersten Reparaturen im Jahr 1836 wurde 1853/54 der Chor durch K. F. Beisbarth neu ausgewölbt und überdacht. Ende des 19. Jahrhunderts wurde schließlich der Steinsarkophag der Heiligen Regiswindis in die Kapelle überführt.

¹ Erstmals erwähnt wurde der Name Regiswindiskapelle auf dem Urkataster von Lauffen a. N. um 1832/33.



Bild 1
Detail Turmhelm mit wechsellagerter Steinbearbeitung und Ausparierungen für Verankerungen
[strebeberg 2013]

1.2 Besondere Schadensphänomene werfen Fragen auf

Besonderheiten der Dachkonstruktion

Der desolate bauliche Zustand gab im Jahr 2013 Anlass für eine größere Restaurierungsmaßnahme. Bei starkem Regen drang durch offene Fugen im dünnen einschaligen Mauerwerk des Dachhelms Wasser ins Gebäudeinnere ein. Bis zum Beginn der Sanierung waren die unteren Mauerwerkspartien regelmäßig vollständig durchfeuchtet. Es lag nahe, dass die schadhaften Fugen Hauptursache für den Wassereintritt sind. Die Ursache lässt sich anhand der konstruktiven Besonderheiten beschreiben. Bei der Konstruktion des Steindaches handelt es sich um ein pyramidales Kraggewölbe mit nach oben dünner werdenden Schichten, die an der dünnsten Stelle nur 10 cm dick sind. Nachdem die Fugen geöffnet waren, wurde ersichtlich, dass der Horizontalschub durch eine Verklammerung der Quaderblöcke auf dem Oberlager und in den Ansichtsflächen aufgenommen wird. An einigen Steinen sind Spuren ehemaliger Verklammerungen vorhanden, die im unteren Drittel des Steins liegen. Sie zeugen vom Neuaufbau des oberen Dachabschnittes ab der dritten Steinlage im Jahr 1954. Der Wiederaufbau erfolgte mit einigen Neuteilen und wiederverwendeten bauzeitlichen Steinen, die allerdings an anderer Stelle eingebaut wurden. Die

alten Steine wurden zu diesem Zweck angepasst. Durch Verkürzung der Quadersteine liegen die Zangenlöcher daher teilweise nicht mehr im Schwerpunkt des Steines.

Ein weiterer Befund ist der Wechsel der Steinbearbeitung vom oberen Drittel zum Rest des Turmhelms (Bild 1). Die Werkzeugspuren sind dort sehr kräftig. Es gibt kleine Spitzhiebe in regelmäßigen Abständen, die einen Hinweis auf die Bearbeitung mit einem Krönel geben. Im unteren Bereich sind diese nur vereinzelt und unregelmäßig zu finden. Zusätzlich sind diese Teile auch deutlich tiefer zurückgewittert. Datiert werden können die Umbauten durch eine grob eingehauene Inschrift auf den Werksteinen unterhalb der Kreuzblume, die »1954 M. Fabich G. Fischer« lautet.

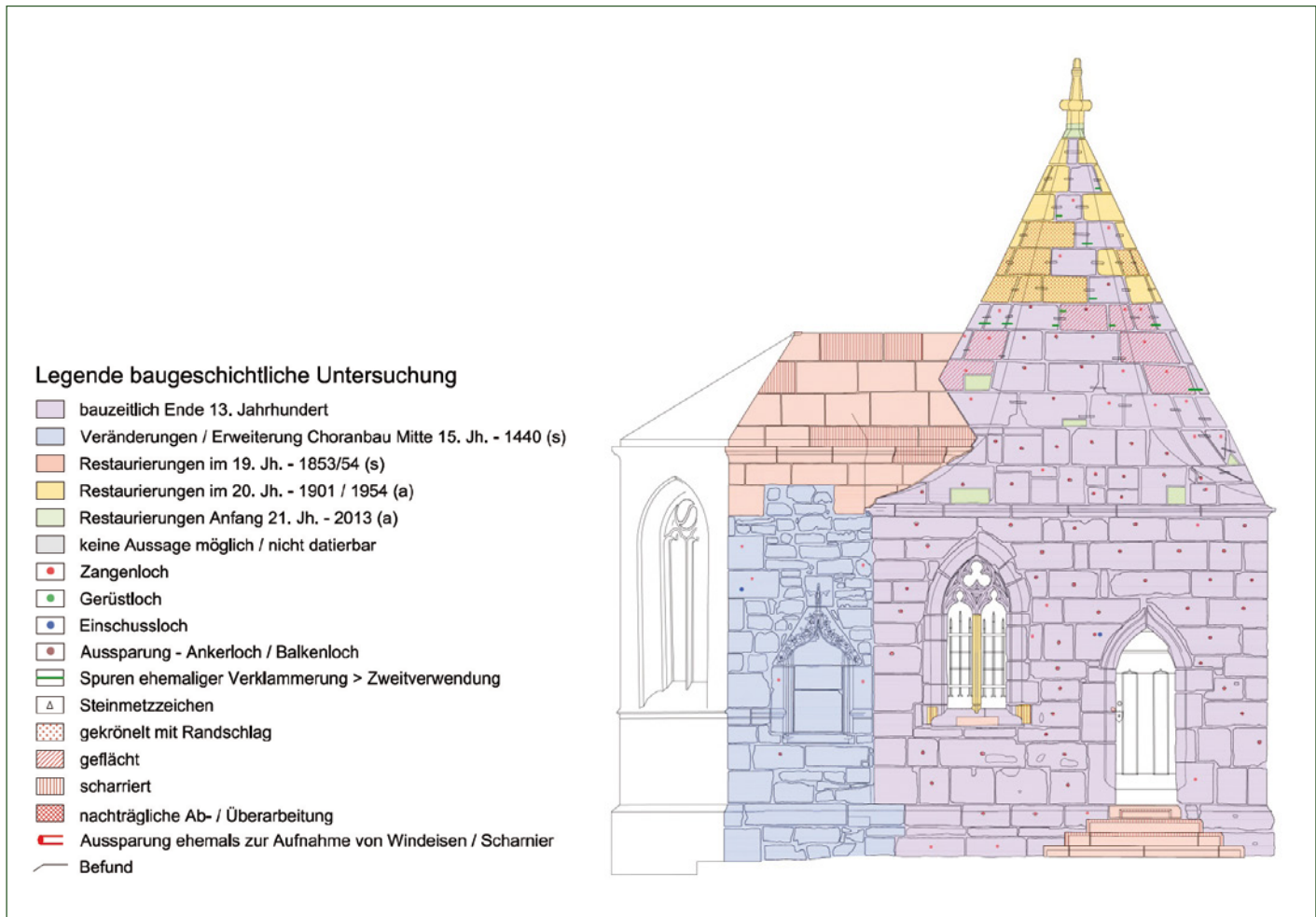
Choranbau

Durch den späteren Anbau des Chores ohne Verzahnung mit dem Hauptgebäude entstand an der Fugestelle eine senkrechte Baunaht. Die großformatigen Steinquader des flach geneigten Chordaches stoßen ebenfalls stumpf mit etwas höherer Traufkante gegen die Quader des Hauptdaches (Bild 2).

Die additive Bauweise des Chores hat zur Folge, dass an den aneinandergrenzenden Dachflächen die Entwässerung des östlichen Hauptdaches über das Chordach verläuft. Durch die konstruktiv getrennte Fügung beider Gebäudeteile gibt es eine Schwachstelle an der Baunaht. Minimale Bewegungen beider Baukörper beschädigten immer wieder die Fuge und sorgten wiederholt für Wassereintrag.

Anhand dieser Analyse der Konstruktion und dem Abgleich mit der jüngeren Restaurierungsgeschichte wird deutlich, dass die ursprüngliche Nutzung des Gebäudes vermutlich durch das konstruktiv mangelhafte Dach erschwert und dieses Bauteil schon früh sehr wartungsintensiv gewesen ist.

Da die bisher zum Einsatz gekommenen mineralischen Mörtel nachweislich die Fugen nicht dauerhaft verschließen konnten, wurde bei der jüngsten Sanierung beschlossen, die Fugen mit Blei zu vergießen. Der Rückblick auf die Baugeschichte zeigt, dass auch diese Verfügung kontinuierlicher War-



tung bedarf. Grundsätzliche konstruktive Schwächen können durch die aktuelle Sanierung nur gemindert, jedoch nicht vollständig beseitigt werden. Gerade die ungewöhnliche Dachkonstruktion zeichnet die Regiswindiskapelle neben ihrer prominenten Lage und lokalgeschichtlichen Bedeutung als einzigartiges Kulturdenkmal aus.

2 Martinskirche Stuttgart, Plieningen

2.1 Baugeschichtliche Ausgangssituation

Die Martinskirche präsentiert sich heute als steinsichtige, einschiffige Hallenkirche mit hohem Satteldach und wurde im letzten Drittel des 12. Jahrhunderts erbaut [Metzger, 1968]. Der Westturm ist

im Jahr 1299 (d) errichtet² worden. Sein heute achteckiges Zeltdach musste 1443 (d) nach einem Brand neu aufgebaut und der Glockenstuhl 1535 (i) umgebaut werden. Im Jahr 1492 (d) wurde der spätgotische Chor mit $\frac{5}{8}$ -Schluss errichtet. An der nördlichen Außenwand des Chores am Übergang zum Langhaus befindet sich der Sakristeianbau mit Pultdach aus derselben Zeit. Die heutigen Zugänge am Westportal und in den Chor sind 1518 (i) eingebrochen worden. Die neoromanischen Treppentürme zu beiden Seiten des Turmes wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts angebaut.

Das prägnante Erscheinungsbild der Kirchenfasaden wird geprägt von Kontrasten der architektonischen Stilelemente, die auf einen lebhaften Verlauf der Baugeschichte schließen lassen. Markant ist hierbei vor allem der weithin sichtbare

Bild 2
Bauphasenplan 2013, Ansicht von Süden [strebbewerk auf Plangrundlage GBVD]

2 Probenentnahme durch Günter Herre: Dendrochronologische Analyse Becker, Hohenheim 12.9.1988

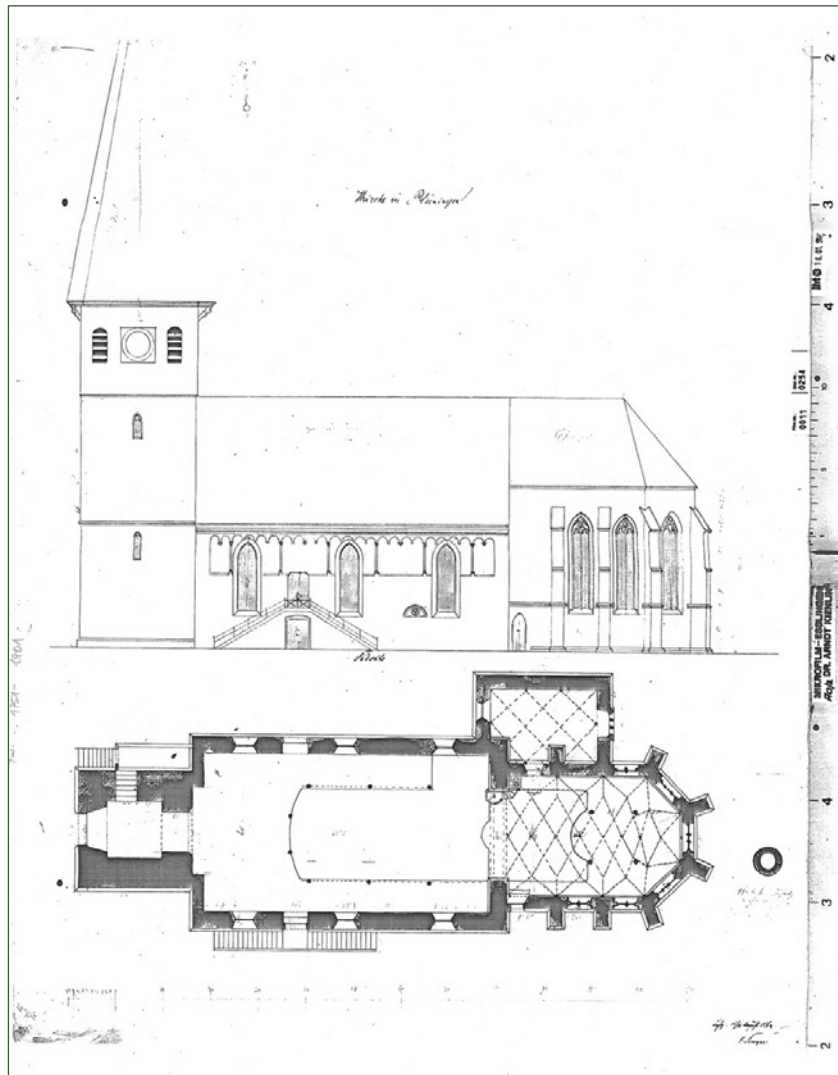


Bild 3 oktagonale Turmhelm auf einem quadratischen Unterbau. Die Langhausfassaden sollen im Folgendengenaue untersucht werden. Neben dem romanischen Rundbogenfries an der Traufe des Langhauses mit seinen bedeutenden Reliefdarstellungen und kleinen Rundbogenfenstern befinden sich dort große spitzbogige Fensteröffnungen mit Maßwerken. Durch die im Vorfeld der Untersuchungen bereits erfolgte Auswertung von Archivalien und den bisher bekannten Umbauphasen lag die Vermutung nahe, dass die Langhausfassaden in umfangreicher Form baugeschichtlich interessante Spuren aufweisen könnten [Schad, 2006]. Die Bedeutung und Interpretation dieser Einzelbefunde rückten damit beim Erarbeiten eines Sanierungskonzeptes in den Mittelpunkt. Sie mussten sorgfältig erfasst, interpretiert und ihre Erhaltungswürdigkeit bewertet werden.

2.2 Exemplarische Baubefunde

Ehemalige Richterstaffel

Bei näherer Betrachtung der Südfassade finden sich im Bereich des Eingangs Reste einer Putzkannte. Diese führt von der Höhe des heutigen Türsturzes zu beiden Seiten schräg nach unten und verliert sich kurz oberhalb des Sockels. Das Aussehen der Putzkannte lässt den Verlauf einer ehemaligen Treppe erahnen. Schrift- und Bildquellen ergänzen den Befund um die Erkenntnis, dass es sich hierbei um eine Freitreppe gehandelt hat. Zwei einläufige Treppen führten parallel zur Fassade zu einem Treppenhause über dem heutigen Zugang. Über sie ist die Empore von außen erschlossen worden. In den Kirchenrechnungsbüchern wurde sie um 1751 als sog. »Richterstaffel« bezeichnet und in zeitgenössischen Plänen dargestellt (Bild 3). Das Anwachsen der Kirchengemeinde machte eine Vergrößerung der Empore nötig. Ende des 19. Jahrhunderts konnte Baurat Frey beauftragt werden, eine zweigeschossige Empore zu planen, die über neu zu errichtende Treppenhäuser am Turm erschlossen werden sollte. Das Abtragen der nicht mehr genutzten Freitreppen hatte auch ästhetische Gründe, da die Treppe nicht mehr den historisierenden Architekturvorstellungen Ende des 19. Jahrhunderts entsprach. Die Arbeiten waren mit Errichtung der zwei neuen Treppenhäuser am Turm um 1901 abgeschlossen.

Einbau großer Kirchenfenster

Abarbeitungsspuren an den Gewänden der Kirchenschiffenfenster zeugen von ihrem Einbau um 1751. Hierbei wurden neben dem Einsetzen von Neuteilen Leibungen zur Anpassung der bauzeitlichen Steinsubstanz abgearbeitet. Eine filigrane Ritzlinie an der Fassade, die nur im Streiflicht zu erkennen ist, gibt einen weiteren Hinweis auf eine entscheidende Veränderung der Fenster. Die unterbrochene horizontale Ritzlinie markiert die Höhe der heutigen Sohlbänke. Mit einer Reissnadel wurde vor Arbeitsbeginn die neue Höhe der Sohlbänke durchgängig an der Südfassade des Langhauses gekennzeichnet (Bild 3). Dies wurde notwendig, um die Belichtung unter den Emporen zu verbessern. Der Stilreinheit zu Beginn des 20. Jahrhunderts



folgend wurden neben der Vergrößerung der Fenster ebenfalls Maßwerke und Fensterrippen eingebaut.

Die Lage und Bedeutung unbedingt zu erhaltender, oft nur winziger Spuren war nun bekannt. Ihr Erhalt sollte bei der Maßnahmenkonzeption besondere Berücksichtigung finden. Alle Erkenntnisse wurden abschließend in einer Befundkartierung zusammengeführt und in einem Baualtersplan dargestellt. Dieser Plan bildete die entscheidende Grundlage bei der Maßnahmenkonzeption. Er wird damit zu einem wichtigen Werkzeug des bauleitenden Architekten, um bauhistorische Befunde zu lokalisieren und ihren Erhalt trotz umfangreicher Sanierungsarbeiten zu gewährleisten.

3 Methodik der historischen Bauforschung

3.1 Befunde erkennen

Entscheidend bei der bauhistorischen Voruntersuchung ist, dass ein erfahrener Bauforscher die Befunde bewertet. Begleitet werden sollten die Arbeiten durch eine restauratorische Voruntersuchung. Die Befunde müssen anschließend systematisch erfasst werden. Als Plangrundlage zur Dokumentation eignen sich z. B. neben verformungsgerechten Bauaufnahmen mit hohen Darstellungstiefen auch Bildpläne auf Basis hochauflösender Messbilder. Die einzelnen Befunde sind ebenfalls fotografisch und textlich zu erfassen. Bei größeren Gebäu-

den bieten sich dafür Kataloge an, bei denen die Befunde seitenweise erfasst und interpretiert werden. Danach sind die thematisch zueinander gehörenden Befundkomplexe durch intensiven Austausch der verschiedenen Fachdisziplinen auswertbar. Als abschließende Ergebnis- und Erkenntnissicherung eignet sich die Darstellung in einer Befund- und Baualterskartierung besonders gut (Bild 4).

3.2 Dokumentieren und Interpretieren

Viele Detailbefunde stehen in einem Zusammenhang und machen die wechselhafte Bau- und Nutzungsgeschichte lebendig und ablesbar. Sie müssen daher vor einer Sanierung erkannt und während der Baumaßnahmen geschützt werden, um die Authentizität des Bauwerkes und seine Funktion als Primärquelle zu erhalten.

Im Rahmen der an denkmalgeschützten Objekten üblichen Voruntersuchungen sollte die historische Bauforschung sowohl vor als auch während der Maßnahme einbezogen werden. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse tragen maßgeblich zu einem nachhaltigen Sanierungskonzept bei. Für die Fortschreibung der Baugeschichte sind wichtige Zusammenhänge aufzudecken und zu erfassen. Die historische Bauforschung dient dem Denkmalpfleger bei der Erarbeitung der denkmalpflegerischen Zielstellung und dem Architekten zur Erarbeitung eines Maßnahmenkonzeptes.

Bild 4
Befundplan mit Baualterskartierung [strebe-
werk 2013, Plan-
grundlage Messbild W. Fischer]

Das Bauwerk ist ein wertvolles Dokument und Zeugnis der handwerklichen Fertigkeiten seiner Erbauer sowie zeitgeschichtlicher Einflüsse. Jedes historische Gebäude mit den Spuren seiner Geschichte ist eine Primärquelle – vergleichbar mit

einer historischen Urkunde. Die Authentizität eines Denkmals kann nur durch den Erhalt und die Ablesbarkeit baugeschichtlicher Veränderungen und Baubefunde bestehen bleiben.

Literatur und Quellen

[Kies, 1977] Kies, O., (1977): 750 Jahre Regiswindiskirche. Lauffen a. N.

[Metzger, 1968] Metzger, W., (1968): Die romanischen Reliefbilder an der Plieninger Martinskirche. Calwer Verlag, Stuttgart

[Schad, 2006] Schad, T., (2006): Die Martinskirche zu Plieningen auf den Fildern. Evang. Kirchengemeinde Plieningen

Typische Schäden an Außenputzen und Fugenmörteln und deren denkmalverträgliche Sanierung

Sylvia Stürmer

Putze und Fugenmörtel, insbesondere in Sichtmauerwerken übernehmen wesentliche technische, bauphysikalische und ästhetische Aufgaben für die Fassade und tragen maßgeblich zum Erhalt der historischen Bausubstanz bei. Dabei sind an Denkmälern häufig Befunde historischer Putze und Fugenmörtel sowie Verarbeitungsweisen und Handwerkstechniken vorhanden, die heute nicht mehr gebräuchlich sind und beherrscht werden. Deshalb kommt ihrer Erhaltung besondere Bedeutung zu. Als äußerster »Angriffspunkt« der Gebäudehülle sind die Putze und Fugenmörtel der Witterung und zum Teil chemischen, biologischen und mechanischen Belastungen frei ausgesetzt und werden in Spritzwasserbereichen auch durch Tausalze beansprucht. Die dadurch sowie durch Alterung und Ermüdung entstehenden Schäden werden beschrieben und Möglichkeiten für die Erhaltung und Instandsetzung der Putze aufgezeigt.

Schlagwörter: Putz- und Fugenmörtel, Putzweisen, Putzfestigung, Überarbeitung von Putzen, Verputztechniken

1 Schäden an historischen Fassadenputzen und deren Sanierung

1.1 Allgemeines zu Außenputzen

Außenputze zieren in großer Material-, Farb- und Strukturvielfalt zu mehr als 60 Prozent die Fassaden an historischen Wohn- und Gesellschaftsbauten. Der Fassadenputz ist ein architektonisches Gestaltungselement, bringt Farbe in die »Gebäudelandschaft«, kann Fassadendetails hervorheben, Geschichten erzählen und andere Baustoffe, z. B. Natursteine imitieren. Als äußere Schicht der Gebäudehülle schützt er das tragende Mauerwerk vor Witterung und anderen äußeren Einflüssen.

Jede Bauepoche hat typische Putzweisen und verschiedene Putzzusammensetzungen hervorgebracht, die häufig auch regional geprägt sind. Im Rahmen der technischen Lebensdauer von ca. 40 Jahren sollte der Außenputz in der Lage sein, den üblichen Temperaturwechseln, Frostbeanspruchungen, Regen und Schnee und selbst extremen Belastungen wie Hagelschlag zu widerstehen. Viele historische Putze sind hunderte Jahre alt und trotzdem noch in sehr gutem Zustand.

Als Bindemittel für Außenputze wurden früher Lehme, Kalke, Gips und Anhydrit und ab ca. Mitte des 19. Jh. auch Zemente eingesetzt. Während heute natürliche hydraulische Kalke und Gemische aus Kalken und Zementen dominieren, werden gips- und lehmgebundene Putze aufgrund ihrer Aufweichung bzw. Löslichkeit in Wasser nur noch in Einzelfällen außen eingesetzt – mit besonderen Maßnahmen zum Witterungs- und Spritzwasserschutz.

Luftkalkmörtel sind für Expositionen im ungeschützten Außenbereich aufgrund ihrer unzureichenden Frostbeständigkeit, der geringen Beständigkeit gegenüber Schlagregen und Abrieb bzw. Erosion durch den Wind in großer Höhe ungeeignet. Für Sockelbereiche werden in den geltenden Regelwerken nur Putze mit hydraulischen Bindemitteln und Wasserabweisung bzw. Wasser abweisender Beschichtung empfohlen.

Besonders wichtig für die sichere Funktion und lange Lebensdauer sind das richtige Festigkeitsgefüge, der Putzaufbau, ein guter Haftverbund zum Putzgrund und die Putzdicke. Bei dickschichtigen, nicht durch Putzträger oder Dämmplatten entkoppelten Putzen gilt nach wie vor, dass die Festigkeit des Putzsystems nicht größer als die des Untergrunds sein sollte. Bei einer möglichst vollflächigen



Bild 1
Risse, Hohllagen und Abplatzungen eines mit Kalkfarbe beschichteten Luftkalkputzes im Spritzwasserbereich

Haftung können so die Erhärtungs- sowie hygisch und thermisch bedingten Spannungen des Putzes aufgenommen werden, ohne dass es zu Rissen oder Ablösungen kommt. Außenputze sollten zweilagig, bestehend aus Unter- und Oberputz (= Putzsystem), aufgebaut sein und eine Mindestdicke aufweisen. Nur so können nicht völlig vermeidbare Unebenheiten des Putzgrundes ausgeglichen und Spannungen aus dem Untergrund (z. B. Kerbspannungen an kleinen Fehlstellen) vom Putzsystem aufgenommen werden, ohne dass sich der Putz durch Reißen entspannt.

Auch zu große Putzdicken können nachteilig wirken. Neben dem größeren Eigengewicht des Frischmörtels, was zum »Absacken« verbunden mit Sackrissen oder Ablösungen führen kann, werden sich die Erhärtungs- und Trocknungszeiten verlängern. Insbesondere bei Luftkalkputzen kann das aufgrund der vergleichsweise langsamen Erhärtung zu Problemen führen, wenn der Putzquerschnitt noch nicht durchkarbonatisiert und ausreichend fest ist und die Kapillarporen bei Frostbeanspruchung noch viel Feuchte enthalten.

1.2 Typische Schadensbilder bei Putzen

Typische Schadensbilder von Außenputzen können Absanden, Mürbzonen, Hohlstellen, schalenartige Ablösungen und Abplatzungen sowie Risse mit verschiedenen Rissbildern und -ursachen sein.

Besonders häufig treten diese Schäden in den exponierten Bereichen in großer Höhe und im Spritz-

wasser- bzw. Sockelbereich auf (Bild 1). Aber auch nicht fachgerecht ausgebildete Materialübergänge und schräge oder vorstehende Putzflächen ohne Schutz durch Gesimse oder Überdachung sind häufig schadhaft.

Putzrisse können unmittelbar nach der Ausführung oder im Laufe der langjährigen Bewitterung und Beanspruchung auftreten. Sie können ab bestimmten Rissbreiten und durch die Verschmutzung der Rissflanken nicht nur ästhetisch stören, sondern auch die technischen Funktionen des Außenputzes beeinträchtigen. Mit zunehmenden energetischen Anforderungen – auch für Bestandsbauten – kommt den Rissen in Verbindung mit den Themen Feuchteschutz sowie Luft- und Winddichtheit eine noch größere Bedeutung zu. Feuchtigkeit führt zu einer höheren Beanspruchung bei Frostangriff und kann durch die Risse bis in den Innenbereich vordringen, wodurch der Wärmeschutz der Außenwand und die Behaglichkeit innen beeinträchtigt werden.

Risse in Putzen entstehen, wenn die auftretenden Spannungen die Zugfestigkeit des Putzes übersteigen. Da die Zugfestigkeit bei Putzen gering ist, können vergleichsweise geringe Verformungen zu Putzrissen führen. Ursache für Risse können der Putzgrund, die Konstruktion, die Putzmörtelzusammensetzung und die Art der Ausführung sein. Bestimmte Putzweisen können Rissbildungen fördern (z. B. intensiv geglättete Putze), während z. B. durch das »Entspannen« beim nachträglichen Kratzen bei dickschichtigen Kratzputzen seltener Risse auftreten.

Nur wenn die Rissursachen geklärt sind, lässt sich das geeignete, dem Objekt und den lokalen Randbedingungen angemessene Instandsetzungsverfahren auswählen. Je nach Erfahrungen des Fachmanns und dem Aussehen des Rissbildes können neben visuellen und einfachen zerstörungsfreien Prüfungen z. T. auch kleinflächige Freilegungen erforderlich sein. Es ist zu empfehlen, gerissene Flächen mit einem Klangprüfer auf Hohlstellen zu prüfen. Dabei ist zu beachten, dass der »Hohlklang« nicht in jedem Fall auf Hohllagen des Putzes zurückzuführen ist. Er kann auch Fehlstellen im Untergrund anzeigen, wie z. B. nicht vollfugig vermörteltes Mauerwerk.



1.3 Sanierung und Instandsetzung von Putzen

Je nach Mangel- oder Schadensbild gibt es dafür folgende Möglichkeiten:

- Erhalt des Bestandsputzes durch *Festigung der »mürben« und sandenden Zonen* – mit oder ohne anschließende Beschichtung mit einem Anstrichsystem,
- *Lokale Ausbesserung* mit Angleichung an den Bestandsputz – mit oder ohne anschließender Beschichtung mit einem Anstrichsystem,
- Vollflächige »Überarbeitung« mit einem Putz, d.h. Beschichtung mit einem neuen, meist dünn-schichtigen Putz.

Je nach Ausmaß der Putzschädigung kann es auch notwendig werden, den Bestandsputz vollständig bis zum Putzgrund zu entfernen und durch ein neues Putzsystem zu ersetzen. In jedem Fall ist vorher eine *schonende Reinigung* mit Entfernen der Verschmutzungen, ggf. des mikrobiologischen Befalls (Algen, Flechten, Moose etc.) und losen Teilen notwendig. Dabei sollte so wenig Wasser wie möglich in den Bestandsputz und den Putzgrund eingetragen werden, weil dadurch Salze im Bestand mobilisiert und die Beanspruchung bei späterem Frostangriff erhöht werden können.

Bei der Festigung, z. B. mit einem *Putzfestiger* auf Kieselsäureester-Basis, ist die Eindringtiefe des Festigers zu beachten. Ziel sollte es sein, den gesamten Putzquerschnitt zu penetrieren und gleichmäßige Festigkeiten zu erzielen. Bei dickschichtigen Putzen mit nur schichtweiser Festigung oder »Überfestigung« der Oberfläche gegenüber den

tiefer liegenden Putzbereichen kann es zu Rissen und Hohllagen mit schalenartigen Ablösungen kommen. Bild 2 zeigt eine Freilegung an einer Hohlstelle, bei der sich der gefestigte Teil des Bestandsputzes vom ungefestigten Bereich abgelöst hat. Der tiefer liegende Putzbereich wurde durch die Festigungsmaßnahme nicht erreicht, was anhand der Penetrationsprobe mit dem Taschenmesser und dem weiteren Absanden erkennbar war (siehe Fingerspitze in Bild 2). In Bild 3 ist die an der Hohlstelle abgelöste Putzprobe erkennbar. Der Verbund des dünnen weißen Kalkfeinputzes zum gefestigten Bestandsputz ist sehr gut. Die Ablösung erfolgte genau in der Tiefe, bis zu welcher der Festiger eingedrungen ist.

Mit Putzfestigern ist es nicht möglich, bereits hohl-liegende, d. h. abgelöste Bereiche des Putzsystems wieder mit dem Rest des Putzquerschnitts zu »verbinden«. Für dieses Auffüllen von Fehlstellen können z. B. lokale Injektionen mit weichen, sehr feinkörnigen mineralischen Injektionsmitteln eingesetzt werden.

Vor einer vollflächigen »Überarbeitung« mit einem Putz muss der Bestandsputz im Sinne der stofflichen Verträglichkeit auf dessen Zusammensetzung und ggf. Salzbelastung und die wesentlichen Putzeigenschaften wie Druckfestigkeit und kapillare Wasseraufnahme geprüft werden. Letztgenannte können mit hinreichender Genauigkeit zerstörungsfrei bzw. -arm auch vor Ort erfasst werden, z. B. mit Karsten'schen Röhrchen und Rückprallhammer.

Vor der endgültigen Auswahl des Putzes für die Ausbesserungen oder die vollflächige Überarbeitung ist das Anlegen einer Musterfläche am Objekt

Bild 2

Freilegung an einer Hohlstelle, bei der sich das gefestigte Gefüge des Bestandsputzes vom ungefestigten Bereich abgelöst hat

Bild 3

An der Hohlstelle abgelöste Putzprobe – guter Verbund zwischen weißen Kalkfeinputz (unten) zum gefestigten Bestandsputz



Bild 4 mit anschließender technischer und ästhetischer Bewertung aller Beteiligten zu empfehlen. Mit einem Abreißtest kann geprüft werden, ob der Bestandsputz für die neue Beschichtung ausreichend tragfähig und ob das Festigkeitsgefälle und der Haftverbund angemessen sind.

Falscher Fugenmörtel und falsche Ausführung haben zu Millimeter tiefer Rückwitterung des Sandsteins geführt.

2 Schäden an Fugenmörteln und deren Sanierung

Fugen sind die Bindeglieder zwischen den Mauersteinen. Sie können offen sein wie bei Trockenmauern oder mit Fugenmörtel gefüllt. Entsprechend dem Verlauf im Mauerwerk werden horizontale Lagerfugen und vertikale Stoßfugen unterschieden, deren Ausbildung und Breite je nach Steinformat und Steinbearbeitungsstufe von wenigen Millimetern bei Quadermauerwerken bis zu Handbreite in den Zwickeln von Bruch- oder Feldsteinmauerwerken schwanken können.

Fugenmörtel tragen maßgeblich zur Lastabtragung und Stabilität der Mauerwerke bei und prägen deren optisches Erscheinungsbild. Ein intaktes Fugennetz mit wirksamem Feuchteschutz erhöht die Dauerhaftigkeit des Natursteinmauerwerkes u. a. durch Reduzierung der hygrischen Verformungen sowie Vermeidung von Frostschäden bei geringem Porenfüllgrad von Mörteln und Natursteinen. Bei beheizten Bauten aus Natursteinmauerwerk wird auch der Wärmeschutz durch die Fugen beein-

flusst. Feuchteinträge können zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und damit zur Reduzierung der Dämmwirkung führen. Bei Innendämmungen an Gebäuden mit Sichtmauerwerk kann dies die Wirksamkeit der Maßnahme gefährden.

Die Notwendigkeit zur Fugensanierung kann u. a. gegeben sein, wenn:

- der Fugenmörtel verwittert oder anderweitig geschädigt ist,
- stofflich oder technisch nicht angepasste Fugenmörtel verwendet wurden, die z. B. zu verstärkter Verwitterung der Steine geführt haben (Bild 4) und
- die Fugenform und/oder die Gestaltung der Übergänge zum Naturstein zu verstärkter Beanspruchung der Natursteine führen.

Typische Schadensbilder sind:

- Abplatzungen, Rückwitterung oder Auswaschen des Fugenmörtels,
- Sanden der Fugenmörteloberfläche,
- Risse im Fugenmörtel oder Abrisse von den Steinflanken,
- Rückwitterung der Natursteine durch falsche Fugenmörtel (Bild 4).

2.1 Ausräumen und Reinigen von Fugenmörtel

Besonders wichtig sind die vorbereitenden Arbeiten vor der eigentlichen Verfugung – das Ausräumen des geschädigten Mörtels und die anschließende Reinigung. Vor der Neuverfugung ist die Fuge nach Möglichkeit in ca. doppelter Tiefe der Fugenbreite auszuräumen, um eine ausreichende Verbundfläche des neuen Mörtels zu den Steinflanken und dem Bestandsmörtel zu schaffen. Dabei dürfen die Fugenflanken nicht beschädigt werden. Die Techniken dafür richten sich u. a. nach dem Fugenverlauf, dem Zustand des alten Fugenmörtels und der Festigkeit des Natursteins. Neben dem schonenden Ausstemmen von Hand bei eher weichen und stark verwitterten Gesteinen können bei gleichmäßigem Fugenverlauf und festen Gesteinen auch Fingerfräsen bzw. Trennschneidergeräte zum Einsatz kommen. Die Fugen sind danach von Staub und losen Teilen zu säubern, da diese haftungsmindernd für den neuen Fugenmörtel wirken können.

Vor oder nach dem Ausräumen kann eine Festigung der angrenzenden Steine notwendig sein, z. B. mit Kieselensäureester. Rückgewitterte Fugenflanken sind in ihrem Zustand zu konservieren oder können durch Anstrich mit Steinrestauriermörtel wiederhergestellt werden.

2.2 Wahl geeigneter Fugenmörtel

Fugenmörtel können auf der Baustelle aus Bindemittel, geeigneten Bausanden und Wasser selbst angemischt werden oder man verwendet Werk trockenmörtel, die von zahlreichen Herstellern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Eigenschaften angeboten werden. Als Bindemittel dominieren die hydraulischen Kalke, als natürliche hydraulische Kalke oder Gemische aus Luftkalk und Zementen, zum Teil mit puzzolanischen Zusätzen. Auch wenn die Baustellenmischung auf den ersten Blick einfach und preisgünstig erscheint, ist sie im Bereich der Natursteinsanierung keinesfalls für Nichtfachleute geeignet und mit Schwankungen der einzelnen Chargen verbunden. Diese Schwankungen in der Mörtelzusammensetzung können zu deutlichen Unterschieden der Optik (z. B. Farbtonunterschieden) und den mörteltechnischen Eigenschaften führen.

Die statisch relevanten Anforderungen an Mauer- und Fugenmörtel im Neubaubereich wurden bisher durch die Mauerwerksnorm DIN 1053 und sind jetzt in den Eurocodes geregelt. Darin werden die Bindemittelanteile und Gehalte an Gesteinskörnung sowie wesentliche Festmörteleigenschaften der »Rezeptmörtel« in den Mörtelgruppen I bis III a beschrieben. Für die Auswahl der Mörtelgruppe und damit der Festigkeitsklasse sind vor allem die statischen Anforderungen und die Steinfestigkeit sowie der Verwitterungszustand der Steine maßgebend.

Das Größtkorn des neuen Fugenmörtels sollte kleiner als $\frac{1}{3}$, besser noch kleiner als $\frac{1}{5}$ der Fugenbreite sein. Die Fugenmörtel müssen fest am Mauerstein und am Mauermörtel haften. Die Festigkeiten und der Elastizitätsmodul sollten kleiner sein als die Werte des Gesteins. Möglichst geringe Schwind- und Quellmaße und angepasste thermische Ausdehnungskoeffizienten sorgen auch unter

permanenter Freibewitterung für geringe Rissanfälligkeit. Bezüglich der Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe ist ein geringerer, maximal der gleiche Wasseraufnahmekoeffizient wie der des Gesteins anzustreben [Snethlage, 2013].

Neben den physikalischen Anforderungen ist die stoffliche (chemische) Verträglichkeit mit der vorhandenen Bausubstanz von wesentlicher Bedeutung. Ausblühungen auf der Mauerwerks Oberfläche und schädigende Reaktionen, wie zum Beispiel zwischen Gips und reaktionsfähigen Bestandteilen aus hydraulischen Kalken und Zementen zu dem Treibmineral Ettringit, müssen durch die Auswahl des geeigneten Bindemittels bzw. der Zusatzstoffe für den neuen Fugenmörtel vermieden werden.

2.3 Applikationstechnik – von Hand oder doch maschinell

Die Verfugung kann je nach Verlauf, Dimension und Zugänglichkeit der Fugen sowie Art und Größe des zu sanierenden Natursteinmauerwerks traditionell von Hand, mit Kartuschen oder maschinell mit Vergugpistole erfolgen.

Wesentlich für die Dauerhaftigkeit der Neuverfugung ist die Flankenhaftung des Mörtels am Stein. Dabei sind vor allem die Rauigkeit und das Saugverhalten des Steins zu beachten und eine optimale Konsistenz des Mörtels einzustellen – steifplastisch bei der Handverfugung und etwas weicher, zum Teil mit einem kleinen Anteil an Fließmittel bei maschineller Verfugung. Bei schmalen und gleichmäßigen Fugen in regelmäßigen Mauerwerken dominieren die Verfugung mit Hand oder Kartusche, bei der die Spritzdüse je nach Fugengeometrie angepasst werden kann. Die *Kartuschtechnik* mit Fließmittel vergütetem Mörtel eignet sich besonders bei Überkopfarbeiten (Gewölbe, Untersichten z. B. bei Gewölben oder Brücken) und keilförmigen Fugen, die sich nach hinten aufweiten. Bei tief ausgewitterten Fugen kann es notwendig sein, die Spritzdüse mit einem Schlauchabschnitt zu verlängern und/oder in mehreren Arbeitsgängen zu verfugen. Für einen langfristigen Witterungsschutz sollte die Fugenoberfläche bündig mit der Steinflanke oder leicht »zurückgesetzt« gestaltet werden. Bei stark hervor stehenden Fugen werden

die Fugenmörtel, bei tief zurückgesetzten Fugen die Steinflanken durch Schlagregen, Frost und Erosion übermäßig beansprucht. Die Oberflächenbearbeitung kann durch Glätten (mit Fugenkelle oder Schlauchabschnitt), Abziehen (z. B. mit der Schmalseite der Kelle oder Fugenholz), Waschen oder Bürsten erfolgen. Bei Fugensanierungen, wo sich der bestehende, falsche Fugenmörtel nicht mehr vollständig ohne Zerstörungen an den Natursteinen entfernen lässt oder bei vorstehenden Steinquadern kann es notwendig werden, den Fugenmörtel an den Bestand anzuböschten. Zur Erzielung eines optimalen Haftverbunds sind Haftvermittler (systemverträgliche Kunststoffzusätze) zu den mineralischen Mörteln zu empfehlen.

Bei der Fugensanierung großer Flächen aus Bruchstein- und Schichtmauerwerk mit tief ausgewitterten Fugen hat sich das Trockenspritzen bewährt. Dieses Verfahren der Betontechnik wird seit den 20er Jahren des 20. Jh. auch für Verfugungen eingesetzt. Beim Trockenspritzen wird der Mörtel durch Druckluft (pneumatisch) trocken bis zur Spritzdüse gefördert, wo das Wasser über einen Wasserring mit mehreren Öffnungen unter Druck zudosiert wird. Die Benetzung bzw. das Vermischen von Trockenmörtel und Wasser erfolgen bei diesem Verfahren erst einige Zentimeter vor dem Düsenausgang. Aufgrund der geringen Wasserzugabe zum Trockenmörtel werden das Schwindmaß und die Gefahr der Rissbildung reduziert und das Mauerwerk nicht unnötig durchfeuchtet. Durch den Anpressdruck wird eine sehr gute Flankenhaftung erzielt.

Das Trockenspritzverfahren eignet sich für die steinsichtige Verfü gung für Fugenbreiten ab ca. 2 cm bis 15 cm und Tiefen ab 3 cm bis ca. 20 cm ebenso wie für steinfühligen und steindeckenden Verputz von Mauerwerk. Kennzeichnend für das Trockenspritzverfahren sind:

- sehr gute Flankenhaftung an den Mauersteinen,
- sehr gute Haftung des neuen Fugenmörtels am Originalmörtel,
- gleichmäßiger Fugenschluss auch bei tiefen Fugen und wechselnder Fugenbreite,
- geringer Anmachwasserbedarf, dadurch geringe Schwindneigung und Ausblühgefahr,

- ansprechende, bestandsgerechte Ästhetik durch die sichtbare Körnung nach der Reinigung,
- Arbeitszeiteinsparung gegenüber Handverfü gung bei großen Flächen,
- Verfü gung und Verputz sind in einem Arbeitsgang möglich.

Für regelmäßige Verbände mit kleinformatigen Mauersteinen und/oder schmalen Fugen, wie Quadermauerwerken, ist diese Art der Verfü gung aufgrund des großen Rückpralles und der »Siebwirkung« weniger geeignet, da mögliche Anreicherungen des Bindemittels und der Feinanteile mit der Gefahr der Überfestigung und Rissbildung verbunden sein können. Beim Trockenspritzen tritt eine Staubeentwicklung ein. Mit optimaler Geräteeinstellung (Druckluft, Wasserdruck etc.), geeignetem Spritzabstand, angepasster Düse und geschultem Personal lässt sich die Staubeentwicklung jedoch auf ein vertretbares Maß beschränken.

Die Reinigung des überschüssigen Mörtelmaterials von den Steinoberflächen kann nass oder trocken mit geeignetem Strahlmittel erfolgen. Es verbleibt eine rauere Oberfläche als beim Glätten mit dem Fugeisen oder der Bürste nach der Handverfü gung, bei der die Gesteinskörnung gut sichtbar ist.

Wesentlich für den Erhalt des geschädigten Außenputzes oder Fugennetzes und für den Schutz des gesamten Mauerwerks sind neben der Materialkenntnis und Applikationstechniken auch das Wissen und Können der Fachhandwerker, da es sich beim Putzen und Verfugen um handwerkliche, arbeitskraftintensive Leistungen handelt. Aufgrund der Komplexität der Sanierungsmaßnahmen und des Ineinandergreifens verschiedener Gewerke sind kompetente Planer und Ausführende gefragt. Diese sollten sich nicht nur mit der historischen Bausubstanz und früheren Bautechniken, sondern auch mit den bauphysikalischen Einflüssen auskennen, um modernen Komfort und ausreichende Nutzungssicherheit zu erreichen. Unter anderem sind die Einflüsse des Außenputzes und der Fugengestaltung auf die energetische und schalltechnische Qualität zu berücksichtigen. Das ist besonders wichtig, wenn die Objekte hochwertig z. B. für Wohn- oder Büro zwecke genutzt werden sollen.

Literatur und Quellen

- [Snethlage, 2013] Snethlage, R., (2013): Leitfaden Steinkonservierung. Fraunhofer IRB Verlag 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 122
- [Ross, Stahl, 2003] Ross, H., Stahl, F., (2003): Praxis-Handbuch Putz. Verlagsges. Müller, 3. Auflage
- [Stürmer, 2012] Stürmer, S., (2012): Konsolidierung von Natursteinmauerwerk durch Verfügung und Injektion. In: Tagungsband 4: Ingenieurbauwerke aus Natursteinmauerwerk, Verein Erhalten historischer Bauwerke e. V. (Hrsg.), Fraunhofer IRB Verlag, S. 95–106
- [Stürmer, 2008] Stürmer, S., (2008): Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden. In: Bautenschutz 1/2008, Zeitschrift des VBK Schweiz, S. 4–6
- [Kollmann, 2013] Kollmann, H.: Putz kompakt. Rudolf Müller Verlag 2013

Antrags- und Vergussmassen für die Instandsetzung von römischem Ziegelmauerwerk

Im Rahmen der Entwicklung eines restauratorischen Gesamtkonzepts zur Erhaltung der antiken Gebäudestrukturen der Kaiserthermen in Trier musste sich besonders mit den Konservierungsproblemen an römischem Ziegelmauerwerk befasst werden. Ziel der Aufgabe war dessen Erhaltung durch eine Verringerung der Angriffsflächen und eine Optimierung der Wasserführung. Das bedeutet vor allem das Verschließen von Rissen und Klüften an den Oberflächen von Ziegeln und Mörtelfugen. Dazu wurde ein neuer Ziegeleratzmörtel auf der Basis von Ziegelmehl mit reinem Weißkalkhydrat und Metakaolin entwickelt. Dieses Material lässt sich sowohl in restauratorischer Vorgehensweise, im Handauftrag mit Kleinwerkzeug, als auch maschinell großflächig im Trockenspritzverfahren verarbeiten. Um die Vorzüge beider Verarbeitungsmethoden nutzen zu können, ist eine »Mikrotrockenspritzmaschine« entwickelt worden.

Hans Michael Hangleiter

Schlagwörter: römisches Ziegelmauerwerk, Ziegeleratzmörtel, großflächige restauratorische Sanierung von Ziegelmauerwerk, Ziegelmehl, Weißkalkhydrat, Metakaolin, Handauftrag, Trockenspritzverfahren, Mikrotrockenspritzmaschine, Pigment, Vergussmasse, Antragsmasse, Injektagen, Erhalt der Ruine

Die Kaiserthermen in Trier sind die monumentalen Überreste einer großflächig geplanten spätantiken Badeanlage. Der Bau, mit seinen teilweise noch 19 Meter hoch erhaltenen Mauern, gehört zu den größten römischen Thermen nördlich der Alpen und ist seit 1986 Teil des UNESCO-Welterbes (Bild 1).

Als Kulturdenkmal steht der Bau seit 1989 unter Denkmalschutz. Heute ist das Gelände der Thermen als Archäologischer Park ausgewiesen und das Erscheinungsbild der Anlage wird im Wesentlichen durch die Konzeption der großen Instandsetzung der 80er Jahre bestimmt. Alle überirdischen

Bereiche sind der freien Bewitterung ausgesetzt. Die Mauerkronen wurden weitgehend durch neue Aufmauerungen überformt und teilweise gezielt begrünt. In diesen Bereichen besteht der Schutz gegen das anfallende Regenwasser in Zementestrichen mit bituminösen Beschichtungen. Da sich jedoch eine freibewitterte Gebäuderuine nicht klar in horizontale und vertikale Flächen aufteilen lässt, sondern im Wesentlichen aus unregelmäßigen, abgebrochenen und aufgespaltenen Mauerwerksstrukturen besteht, ist die Wasserführung das zentrale Erhaltungsproblem (Bild 2).



Bild 1
Ziegelmauerwerk in der Apsis des ehemaligen Caldariums

Bild 2
Die lange anhaltende Durchfeuchtung zeigt sich auch an dem starken Bewuchs.

1 Konzept der Erhaltungsmaßnahme

Ziel des Konzepts ist die Erhaltung des römischen Ziegelmauerwerks durch eine Verringerung der Angriffsflächen und eine Optimierung der Wasserführung. Die für die Erhaltung des Bestandes erforderlichen Ergänzungen sollten das »kristalline« Erscheinungsbild der Ruine so wenig wie möglich verändern und alle Maßnahmen wurden entsprechend zieloptimiert durchgeführt.

Das bedeutet vor allem das Verschließen von Rissen und Klüften an den Oberflächen von Ziegeln und Mörtelfugen. Dazu wurde ein Ziegeleratzmörtel auf der Basis von Ziegelmehl mit reinem Weißkalkhydrat und Metakaolin durch Versuchsserien entwickelt, der sehr gute physikalische Eigenschaften aufweist. Dieses Ergänzungsmaterial lässt sich sowohl in restauratorischer Vorgehensweise im Handauftrag mit Kleinwerkzeug als auch maschinell im Trockenspritzverfahren verarbeiten. Um die Vorzüge beider Verarbeitungsmethoden nutzen zu können, ist in Zusammenarbeit mit dem Maschinenbau eine neue »Mikrotrockenspritzmaschine« entwickelt worden. Mit dem Gerät können sehr effizient präzise Mörtelergänzungen mit guten Festigkeiten ausgeführt werden.

Mit gleicher Bindemittelmischung wurde auch ein Vergussmörtel für die Ziegelbereiche der Ruine entwickelt, der in seinen Festigkeitseigenschaften weitgehend den Antragsmassen entspricht. Als Stand der Technik zu Antragsmassen für die Ziegelergänzung standen bisher die Konzeptionen zur Verfügung:

- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kalk oder Zement,
- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kunstharzdispersion,
- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kieselsoildispersion.

1.1 Metakaolin als hydraulisch wirksamer Bestandteil des Bindemittels

Für die Konzeption standen die Überlegungen im Vordergrund, die hydraulischen Wirkungen von

schwach gebrannten Ziegeln zusammen mit Kalk als Bindemittel für die Ersatzmassen zu nutzen. So sind die Tone, wie sie von den Römern zur Ziegelherstellung verwendet wurden, Sedimenttone. Sie bestehen neben Sand vor allem aus den Aluminiumsilikaten: Illit, Montmorillonit und Kaolinit. Durch einen Brennvorgang in normaler Atmosphäre und einer Temperatur von ca. 600 °C entsteht daraus amorphes Metakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) mit hervorragenden hydraulischen Eigenschaften. Zusammen mit Kalziumhydrat bilden diese Metakaoline Kalzium-Silikat-Hydrat-Phasen (CSH).

Für die Wahl von Metakaolin als hydraulisch wirksamer Bestandteil des Bindemittels war vor allem entscheidend, dass dieses Material industriell hergestellt in gleichbleibender Qualität kostengünstig zur Verfügung steht. Dabei konnte auf jahrelange Erfahrung beim Einsatz von industriell hergestellten Metakaolin zur Herstellung von Injektionsmörtel für das Kloster Maulbronn zurückgegriffen werden. Es gibt für derartige Anwendungen eine ganze Reihe von Metakaolinen. Unter diesen wurde für die Konzeption der Typ mit dem geringsten Wasseranspruch und der kürzesten Abbindezeit – Metaver R – gewählt. Auf dieser Grundlage sollte eine Antragsmasse als Ziegeleratzmasse entwickelt werden, die den Bedingungen entspricht:

- einfache Verarbeitbarkeit mit restauratorischen Feinwerkzeugen,
- minimaler Schwund bei Handantragungen,
- sehr gute Festigkeiten,
- optisch sehr gut integrierbar,
- Frostbeständigkeit.

Parallel zur Antragsmasse sollte eine injizierbare Ziegeleratzmasse auf der gleichen Grundlage entwickelt werden, die den Bedingungen entspricht:

- gut injizierbar mittels medizinischer Spritzenkanülen mit einem Durchmesser von mindestens 1,0 mm,
- minimaler Schwund bei optimalen Fließeigenschaften,
- sehr gute Festigkeiten,
- optisch sehr gut integrierbar,
- Frostbeständigkeit.

1.2 Vorgehensweise bei der Materialentwicklung

a) Für die Antragsmasse wurde konzipiert:

Bindemittel:	Weißkalkhydrat CL90 + Metakaolin
Zuschlag:	Ziegmehl + Steinmehl
Pigment	synthetisches Eisenoxid Bayferrox
Zusatzmittel	keine
W/Z-Wert	ca. 0,66

Bindemittelloptimierung

Zunächst wurden Vorversuche mit der Bindemittelmischung durchgeführt. Das Ziel war eine optimale Mischung zwischen CL90 und Metakaolin. Sehr gute Ergebnisse wurden bei einem Mischungsverhältnis in Gewichtsteilen von 1:1 erzielt. Nach den aktuellen Testergebnissen lassen sich die höchsten Festigkeiten mit einem Verhältnis von 65 GT Metaver R zu 35 GT CL90 erreichen (Tabelle 1).

Zusammensetzung der Zuschläge

Als Zuschlag für die Antragsmassen wurde vor allem Ziegmehl verwendet. Ziegmehl wird industriell aus neuwertigen roten Tonziegeln hergestellt. Das verwendete Mehl hat eine Körnung von 0–1 mm, ist allerdings erdfeucht und muss ggf. getrocknet werden. Das aus den Ziegeln hergestellte Mehl ergibt jedoch zusammen mit dem Bindemittel keine ausreichend dichte Packung. Um die Sieblinie zu verbessern, wurde deshalb noch Kalksteinmehl zugefügt.

Pigmentauswahl und -wirkung

Der Einfluss von Pigmenten auf den W/Z-Wert (Wasser/Zement-Wert) und damit auf die Festigkeit der Mörtel darf nicht unterschätzt werden. Dabei gibt es auch beim Einsatz von synthetischen Eisenoxidpigmenten bereits durch das Herstellungsverfahren bedingt enorme Unterschiede. Bei der Mörtelherstellung ist es das Ziel, immer durch eine möglichst geringe Pigmentzugabe die optimalen Ergebnisse zu erzielen. Bei den durchgeführten Mörtelproben sind die besten Ergebnisse mit Bay-

ferrox-Pigmenten erzielt worden. Grundsätzlich ergeben die Pigmente mit der kleinsten Teilchengröße das stärkste Färbevermögen. Gleichzeitig wird aufgrund des Streuvermögens von Eisenoxiden der Farbton direkt durch die Teilchengröße beeinflusst. Beim Rot gilt, je kleiner die Teilchen sind, desto gelbstichiger ist der Farbton, während größere Teilchen einen eher blautichigen Farbton erzeugen. Der Unterschied in der vorherrschenden Teilchengröße deckt eine Spanne von 0,09 µm für das Bayferrox® 105 M bis zu 0,7 µm für das Bayferrox® 180 M ab. Auch bei Schwarz ist der Farbton des Pigments abhängig von der Teilchengröße der Primärteilchen. Das Spektrum reicht vom blautichigen Bayferrox® 350 bis zum farbstarken Bayferrox® 330. Je größer die Primärteilchen sind, desto blautichiger ist der Farbton. Allerdings geht das zu Lasten der Farbstärke. Diese ist umso höher, je feinteiliger das Pigment ist.

Für die Rezeptur der Mörtel wurden die Pigmente verwendet:

Rot	Bayferrox 110
Schwarz	Bayferrox 330
Gelb	Bayferrox 920

b) Für die Vergussmasse wurde konzipiert:

Bindemittel:	Weißkalkhydrat CL90 + Metakaolin
Zuschlag:	Steinmehl
Pigment:	synthetisches Eisenoxid Bayferrox
Zusatzmittel:	Verflüssiger und Kunstharzdispersion

Bindemittelzusammensetzung

Das Bindemittel der Antragsmasse wurde als Mischung zwischen CL90 und Metakaolin im Verhältnis von 1:1 beibehalten.

Zusammensetzung der Zuschläge

Um optimale Fließeigenschaften zu erhalten, wurde auf das gebrochene Korn des Ziegmehls verzichtet und ausschließlich Kalksteinmehl verwendet.

Zusatzstoffeinsatz

Zur Optimierung der Fließeigenschaften ist ein Verflüssiger und als Plastifizierer ein geringer Anteil (ca. 1 % der Trockenmasse) an Kunstharzdispersion zugesetzt worden.

Pigmenteinsatz

Bei der Injektionsmasse ist die Auswahl der Pigmente von ganz entscheidender Bedeutung, da die Grundmasse weitgehend weiß erscheint und die Materialfarbe nach dem Abbinden und Austrocknen der des Ziegelmaterials entsprechen muss.



Bild 3

Injektionsmörtel lässt sich durch eine 1,2 mm-Kanüle verarbeiten.

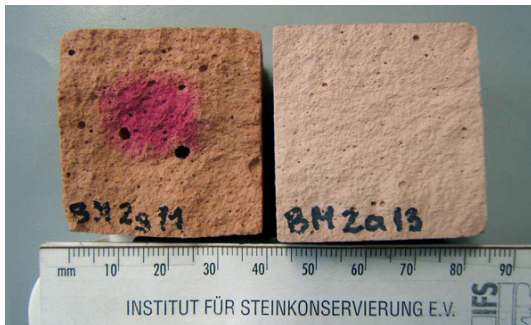


Bild 4

Carbonatisierungstest mit Phenolphthaleinlösung nach sechsmonatiger Lagerung: Der Antragsmörtel (links) ist bis in durchschnittlich 12 mm Tiefe karbonatisiert. Der Injektionsmörtel (rechts) vollständig. [Foto: Michael Auras IFS]



Bild 5

Vorversuch für die Verarbeitung der Antragsmasse mit der Trockenspritzanlage der Fa. Mader

2 Erste Ergebnisse der Vergussmörteloptimierung

Die Versuchsprismen (40 × 40 × 160 mm) wurden in Styroporformen hergestellt. Die Viskosität der Vergussmörtel wurde dabei so eingestellt, dass sich die Masse noch durch eine 1,2 mm starke Spritzenkanüle verarbeiten ließ (Bild 3).

Nachdem die Mörtelprismen in den Formen ohne erkennbaren Schwund abgebunden hatten, wurden sie nach 7 Tagen aus den Formen genommen und weiterhin feucht gehalten. Nach 20 Tagen sind die Prismen an das Institut für Steinkonservierung in Mainz zur naturwissenschaftlichen Untersuchung übergeben worden. Sie wurden in einem überdachten Außenraum gelagert und wöchentlich befeuchtet. Sporadisch ist der Fortschritt der Carbonatisierung überprüft worden (Bild 4).

Nach sechsmonatiger Lagerung wurden physikalische Kennwerte bestimmt und in Relation zu den entsprechenden Werten der römischen Ziegel gesetzt. Die Materialprüfanstalt Wiesbaden ermittelte die Festigkeiten nach 28 Tagen und noch einmal nach 6 Monaten (Tabelle 1).

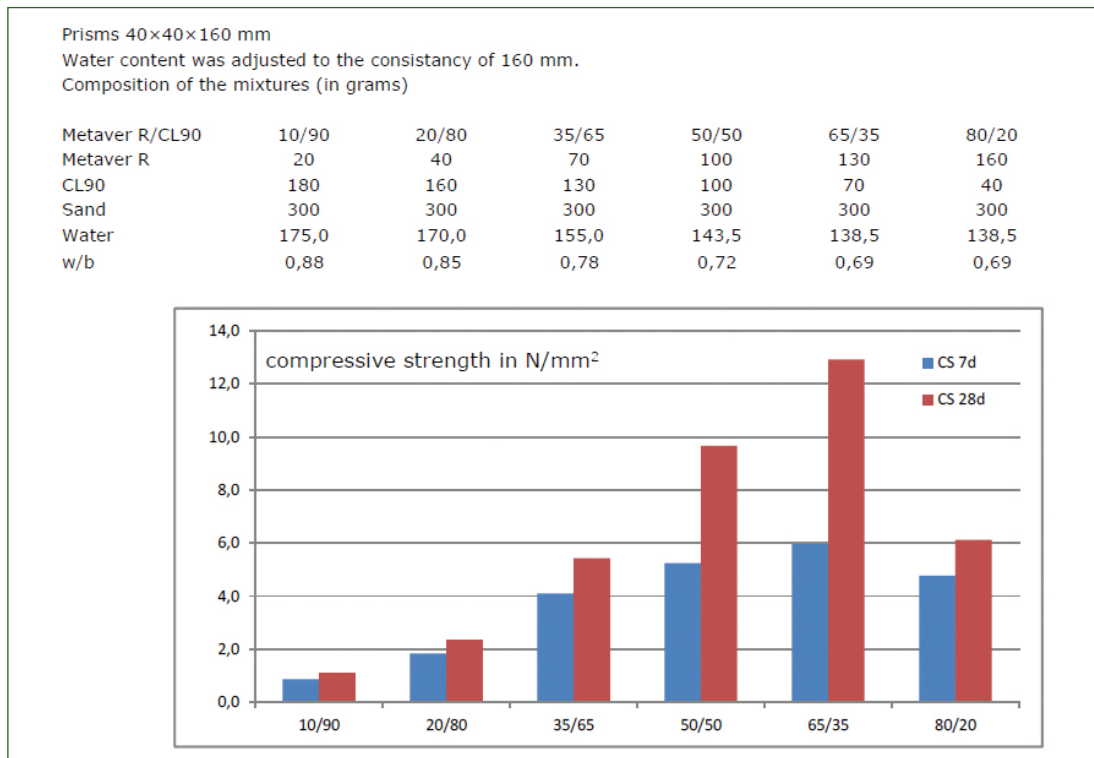
Mit den optimalen Massen wurden weitere Versuche zur Antragung und zum Verfüllen von Hohlräumen an den römischen Ziegelfragmenten aus Trier durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr zufriedenstellend (Bild 5).

3 Überlegungen und Versuche zur Verarbeitung

Wesentlicher Teil der Konzeptentwicklung ist neben der objektbezogenen Materialentwicklung auch eine entsprechende neue Technik für die großflächige Verarbeitung. Die große Menge von

Tabelle 1

Prismenfestigkeit nach 7 Tagen und nach 28 Tagen [Kassautzki, 2012]



ca. 15.000 m² römischer Mauerwerksoberfläche steckt einer ganz traditionellen restauratorischen Bearbeitung der Oberflächen mit kleinen Werkzeugen zeitlich und damit finanziell enge Grenzen. Allein der zeitliche Aufwand, kleinteilig zerborstene, mit einem feinen Rissnetz durchzogene Ziegel auf traditionelle Weise mit Injektionsspritze und Kitt-eisen zu konsolidieren, ist so enorm, dass eine Finanzierung unmöglich realisiert werden kann. Das in der Mauerwerksanierung bekannte Trockenspritzverfahren schien zumindest theoretisch eine Alternative zur Handarbeit zu sein.

Das Material wird mit hoher Geschwindigkeit trocken durch den Schlauch bis an die Düse transportiert und erst dort erfolgt die Zugabe der erforderlichen Wassermenge. Dies führt zu einer hohen Verdichtung des Mörtels, verbunden mit stark erhöhten Festigkeiten nach dem Abbinden. Dazu war zu erwarten, dass dabei neben einem sehr gut haftenden Antrag auch ein tiefer Verschluss aller Risse mit guter Flankenhaftung möglich wird. Die vorher locker in die Risse eingesetzten Spritzennadeln konnten dann noch zur Verfüllung mit dem Injektionsmörtel dienen.

Damit dieses Verfahren am römischen Ziegelmauerwerk in Trier angewendet werden konnte, waren eine ganze Reihe von begleitenden Maßnahmen und Vorbereitungen erforderlich. Allein die enorme Größe der Apparatur, mit den fast armdicken Schläuchen und Düsen, erfordert vor allem auch einen Schutz der Umgebung sowie den ganz präzisen Schutz der hellen Mörtelfugen zwischen den Ziegeln vor der roten Ziegelmasse.

Beim Einsatz des üblichen Trockenspritzverfahrens bei der Mauerwerkssanierung werden die Steinköpfe durch den Mörtelantrag erheblich verschmutzt. Im Standardverfahren (Torkretieren) wird dieser Überschuss unmittelbar nach den Strahlarbeiten grob angekratzt. Die verbleibenden Reste werden dann erst nach einigen Tagen im Sandstrahlverfahren entfernt. Vor allem diese Strahlarbeiten führen je nach Steinmaterial zum Verlust der originalen Oberflächen und sind der Grund für den schlechten Ruf dieses Verfahrens im Bereich der Denkmalpflege.

Um diesem Problem zu begegnen, sind mit der Antragsmasse im Trockenspritzverfahren einige Versuche durchgeführt worden. Geprüft wurde, in wel-

Bild 6

Vorversuch mit zerschlagenen Vollziegeln in einem Holzkasten, die Fugen und eine Ziegeloberfläche sind mit Cyclododecan beschichtet.

Bild 7

Nachgereinigte Versuchsfläche

**Bild 8**

Die Ziegelbruchstelle zeigt die Eindringtiefe der gespritzten Antragsmasse in einen Riss von 2 bis 3 mm; daneben die hellere Injektionsmasse

**Bild 9**

Mörtelblock mit $27 \times 42 \times 9$ cm – gespritzt



chem Umfang eine schützende Beschichtung mit Cyclododecan (CCD) den mechanischen Belastungen durch die gestrahlte Ziegeleratzmasse standhalten kann. Dazu wurden moderne Vollziegel in Stücke zerschlagen und in einem Holzkasten so zusammengesetzt, dass Risse in verschiedenen Breiten entstanden. Anschließend sind die Ziegel etwas unter Niveau mit Mörtel vergossen worden, so dass ein Fugenbild entstand (Bilder 6 und 7).

Es erfolgte eine Versiegelung der Fugen mit Cyclo-dodecanschmelze und in einige Fugen wurden Kanülen als Packer eingesetzt und mit Kappen verschlossen. Die gesamte Oberfläche wurde anschließend im Trockenspritzverfahren mit der Ziegelantragsmasse beschichtet. Gezielt ist beim Spritzen die Beschichtung mit Cyclododecan durch geringe Abstände zur Düse punktuell auch stark belastet worden. Es kam jedoch nur bei einem Spritzabstand von wenigen cm zu einem Abtrag der Beschichtung. Ca. 1 Stunde nach dem Auftrag wurden die Überschüsse grob entfernt. Alle weiteren Überschüsse konnten mühelos mechanisch nachgereinigt und nach der Verdunstung der CCD-Beschichtung vollständig entfernt werden.

Ein wichtiges Ziel dieses Vorversuchs war die Überprüfung der Eindringtiefe der gespritzten Masse in den Rissen. Dazu wurden die Ziegel wieder auseinander gebrochen. Es zeigte sich, dass selbst bei einer Rissbreite von 2–3 mm noch Eindringtiefen von 8 bis 12 mm erreicht werden können (Bild 8).

An einem zweiten Holzkasten als Schalung wurde das Schwindverhalten der Antragsmasse bei einer Verarbeitung im Trockenspritzverfahren geprüft. Dabei entstand ein Block mit $27 \times 42 \times 9$ cm, der auch nach 3 Monaten Außenlagerung keine Schwindrisse zeigte (Bild 9).

4 Umsetzung des Materialkonzepts

Für eine Umsetzung des Konzepts und die Erprobung der einzelnen Verarbeitungsverfahren stand ein größerer Mauerwerkskomplex zur Verfügung, der bereits im Vorfeld ausgewählt und mit einem Schutzdach versehen worden war (Bild 10).

In diesem Bereich konzentrierten sich die wichtigsten Instandsetzungsprobleme am Mauerwerk der Thermenanlage. Es handelt sich um ein Mauerwerk aus Kalkstein-Handquadern mit Ziegeldurchschüssen sowie einem Bogen aus reinem Ziegelmauerwerk. Vor allem der Bogen war durch die dauerhafte Durchfeuchtung, verbunden mit den entsprechenden Frostschäden ganz erheblich geschädigt. Noch vor den ersten Maßnahmen war dieser Bereich durch eine hölzerne Unterfangung sowie durch Absprießungen notdürftig gesichert worden.

4.1 Vorarbeiten

Der weitgehend mit Algen, Moos und anderen Pflanzen überwucherte Bogen musste zunächst freigelegt, gereinigt und von Wurzelwerk befreit

werden. Dabei wurden parallel alle erforderlichen Notsicherungen durchgeführt (Bild 11).

4.2 Trockenspritzverfahren – erste Musterfläche vor Ort

Nachdem die Vorversuche an verschiedenen Ziegeloberflächen positiv verlaufen waren, ist eine Musterfläche vor Ort in einem Bereich der Bogenuntersicht mit erheblichen Schäden an den Ziegeln vorbereitet worden (Bild 12).

Anschließend wurden alle Flächen, die nicht mit der Antragsmasse versehen werden sollten, mit Cyclododecan versiegelt. Eine robuste »Maske« sollte die weitere Umgebung vor dem Materialnebel während des Spritzens schützen (Bild 13).

Das bei Vorversuchen erprobte Verfahren konnte auch an der Musterfläche vor Ort bestätigt werden. Unmittelbar nach dem Materialantrag mit der Trockenspritzanlage (Bild 14) wurde die Fläche mechanisch nachbearbeitet. Die Überschüsse konnten dabei verhältnismäßig einfach von der Cyclododecanbeschichtung abgenommen werden (Bild 15).



Bild 10
Raum 13n mit dem Bogen aus Ziegelmauerwerk



Bild 11
Ostseite des Bogens mit starkem Bewuchs



Bild 12
Musterfläche für das Trockenspritzverfahren, markiert auf der Untersicht des Gewölbes



Bild 13
Raum 13a, Musterfläche, Beschichtung im Trockenspritzverfahren

Bild 14

Raum 13a, Musterfläche nach der vollflächigen Beschichtung

Bild 15

Endzustand der ganzen Musterfläche nach dem Absaugen der Mörtelreste



Bild 16

Arbeit mit der Micro-Trockenspritzanlage

Bild 17

Trockenspritzanlage



Die verbliebenen Reste wurden nach der Verdunstung von CCD weitgehend mit dem Staubsauger abgesaugt.

Die guten Erfahrungen bei der Verarbeitung der Mörtel mit einer Trockenspritzanlage haben zu dem Wunsch geführt, noch kleinteiliger und mit einer leichteren, beweglicheren Anlage arbeiten zu können. In Zusammenarbeit mit einem Maschinenher-

steller ist es gelungen, eine kleine, nur ca. 25 kg schwere Micro-Trockenspritzmaschine zu entwickeln, die bei der Aufgabenstellung an den Trierer Kaiserthermen sehr gut zum Einsatz kommen kann (Bilder 16 und 17). Die Arbeiten mit dieser Maschine befinden sich gegenwärtig noch in einer Erprobungsphase.



Bild 18
Ostseite des Bogens mit großflächigen Ziegelergänzungen in einer Stärke von ca. 4 cm (Pfeil)



Bild 19
Ziegel und Mörtelergänzungen im Detail mit eingebauten Spritzenkanülen und Schläuchen



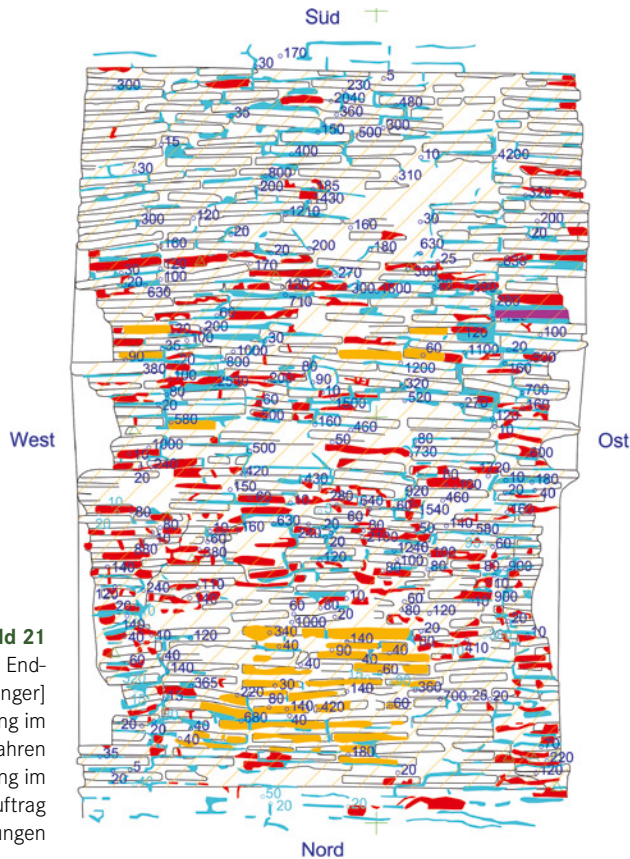
Bild 20
Westseite des Bogens im Endzustand

4.3 Handantrag und Verguss mit Injektionsmörtel

Die Maßnahmen am Mauerwerk betrafen in allen Fällen sowohl die Ziegel als auch den umgebenden Setzmörtel. Die teilweise sehr instabilen Strukturen erforderten eine kombinierte Vorgehensweise an Ziegeln und Setzmörteln im Pilgerschrittverfahren. Dabei wurden auch einzelne, zerbrochene Ziegel ausgebaut, punktuell verklebt und wieder eingebaut. In vielen Bereichen, in denen große Stücke

von Ziegeln zur Sicherung des umgebenden Gefüges fehlten, sind diese durch die Antragsmasse ergänzt worden. Diese Masse ermöglicht einen Aufbau mit Schichtstärken von mehr als 6 cm in einem Arbeitsgang (Bild 18).

Zusammen mit den verschiedenen Ergänzungs- und Antragsmassen wurden bis in die Tiefe des Gefüges Schläuche bzw. Injektionskanülen für den nachfolgenden Verguss mit Injektionsmörtel eingesetzt (Bild 19).

**Bild 21**

Untersicht des Bogens im Endzustand [Foto: Büro Linsinger]

Gelb: Ziegelergänzung im Trockenspritzverfahren
 Rot: Ziegelergänzung im Handauftrag
 Blau: Mörtelergänzungen



Entsprechend der Erfordernisse kamen hier medizinische Injektionsspritzen, Kartuschenpressen und Kolbenpumpen zum Einsatz. Zur Verdämmung der vorhandenen Risse und zum Schutz der umgebenden originalen Oberflächen, wurde erneut mit

Cyclododecan als Schutzschicht gearbeitet. Die Bilder 20 und 21 zeigen den Endzustand des Bogens nach der Bearbeitung und verdeutlichen den Einsatz der verschiedenen Verfahren.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

[Kassautzki, 2012] Kassautzki, M., (2012), NEWCHEM Group, Germany, Alsfeld, temcon solutions GmbH
 BECO Begmüller & Co. GmbH, Nürnberg

Moderne Putze auf alten Untergründen

Müssen bei der Bauwerksanierung »alte« Untergründe mit »modernen« Putzen überarbeitet werden, sind zunächst die Eigenschaften der Untergründe zu ermitteln und festzulegen, welche Funktion der Putz zu erfüllen hat. Danach kann entschieden werden, welcher Putztyp zum Einsatz kommt. Es werden heute zahlreiche Werkmörtel von der Bauindustrie angeboten, die speziell auf alte Untergründe abgestimmt sind und die Anforderungen erfüllen.

Helmut Kollmann

Schlagwörter: Altbaumauerwerk, Altputz, Putzgrundvorbereitung, Putzgrundvorbehandlung, Dichtputze, Opferputze, Sanierputzsysteme, Renovierputze, Kalkputze, Gipsputze, Lehmputze, Wärmedämmputze

1 Alte Untergründe – moderne Putze

Bei der Bauwerksanierung müssen häufig »alte« und »neue« Baustoffe kombiniert werden. Dem sind technische Grenzen gesetzt. Daher ist es unbedingt erforderlich, die Zusammensetzung und die Eigenschaften der miteinander zu kombinierenden Baustoffe zu kennen oder zu untersuchen und ihre Verträglichkeit untereinander abzuwägen.

Ein alter Untergrund kann aus Mauerwerk oder Putz bestehen. »Alt« bedeutet, dass dieser Untergrund geschädigt ist und saniert werden muss. Putze, die bis etwa 1950 zum Einsatz kamen, werden allgemein als »historische« Putze bezeichnet. Danach kamen kunststoffvergütete Werkmörtel auf den Markt. Im Folgenden sind »moderne Putze« mit »Werkmörteln« gleichgesetzt worden. Diese werden gemäß [DIN EN 998-1] in einem Werk zusammengesetzt, gemischt und als »Trockenmörtel« geliefert, dem an der Baustelle nur Wasser zugesetzt wird.

2 Putzgrund

Mauerwerk besteht im Prinzip aus Mauersteinen, Mauerwerk und gegebenenfalls Fugenmörtel. Sein Verhalten hängt von den Eigenschaften der einzelnen Komponenten und der Art, wie sie miteinander verbunden sind, ab. Im Altbaubereich sind Untergründe, die aus einer Vielzahl von Baustoffen bestehen, häufig anzutreffen. Das Mauerwerk kann auch Ausmauerungen und Ergänzungen mit Beton oder anderen Baustoffen enthalten, die sich alle unterschiedlich verhalten.

Zur Beurteilung, ob ein Mauerwerk als Putzgrund geeignet ist, sind Gefüge (Materialwechsel, Fehlstellen, Hohlräume, Risse) sowie Belastungen durch Feuchtigkeit und Salze zu betrachten. Um den Putzgrund zu charakterisieren, müssen Oberflächenfestigkeit, Rauigkeit, Saugfähigkeit sowie schädliche Bestandteile bekannt sein. Danach richtet sich, wie der aufzutragende Putz beschaffen sein muss.



Bild 1
Sehr heterogener Untergrund aus alten und neuen Baustoffen, der den Einsatz von Putzträgern erfordert

Besondere Vorsicht ist bei gipshaltigem Mauerwerk geboten. Um Schäden durch Treiberscheinungen zu vermeiden, dürfen Putze keine hydraulischen Anteile enthalten [WTA-Merkblatt 2-11-07/D].

Putzgrundvorbereitung – Putzgrundvorbehandlung

Die Putzgrundvorbereitung hängt vom Ergebnis der Untersuchungen und den vorgesehenen Putzen bzw. Putzsystemen ab. Haftungsstörende Teile (schadhafte Partien, lockere Bereiche, Verschmutzungen, korrodierende Metallteile) müssen entfernt werden. Alte Abdichtungen, Putze und Farbanstriche können verbleiben, wenn sie noch funktionsfähig, erhaltenswert oder denkmalgeschützt sind. Haften Altputze und Beschichtungen so fest, dass sie nicht entfernt werden können, ohne den Untergrund zu beschädigen, muss im Einzelfall entschieden werden, wie weiter zu verfahren ist und welches Putzsystem eingesetzt wird (Bild 1).

Die Reinigung des Putzgrundes erfolgt meist mechanisch. An Musterflächen kann zunächst erprobt werden, welches Verfahren und welche Geräte am besten geeignet sind. Weitere Putzgrundvorbereitungen sind das Schließen von Rissen, das Entfernen von Putzträgerresten und lockeren Partien, das

Auskratzen von mürben Fugenmörteln und das Aufräumen von tragfähigem Altputz. Sandet oder mehlts der Putzgrund, so kann er gefestigt werden, indem neues Bindemittel zugeführt wird, z. B. mit wässrigen Silikaten oder Kieselsäureester. Die Putzgrundvorbereitung ist abgeschlossen, wenn der Untergrund fest, trocken, frei von Schmutz, Staub und anderen Trennschichten sowie von schädlichen Rissen ist.

Die Putzgrundvorbehandlung dient dazu, die Haftung des Putzes auf dem Putzgrund zu verbessern oder gar erst zu ermöglichen. Sie richtet sich nach der Beschaffenheit und der Saugfähigkeit des Untergrundes. Sowohl ein sehr stark als auch ein sehr schwach saugender Putzgrund muss vorbehandelt werden. Die einfachste Putzgrundvorbehandlung ist das Vornässen. Dadurch wird die Saugfähigkeit vermindert. Zu geringes Vornässen des Putzgrundes kann genauso schädlich sein, wie zu starkes. Ein sehr stark saugender Putzgrund entzieht dem Putz rasch das Anmachwasser, so dass die Bindemittel nicht vollständig reagieren können. Um dies zu verhindern, wird eine so genannte »Aufbrennsperre« aufgetragen.

Auf glatten oder schwach und unregelmäßig saugenden Putzgründen haften Putze nur unzureichend. Mithilfe von Haftbrücken kann eine griffige Oberfläche geschaffen werden, auf der der Putz gut haftet. Eine spezielle Form der Haftbrücke ist der Spritzbewurf. Bei sehr unterschiedlich zusammengesetztem und damit unterschiedlich saugendem Putzgrund, wie er im Altbaubereich häufig vorkommt, ist immer ein Spritzbewurf vorzusehen. Der Spritzbewurf gleicht die Eigenschaften des Putzgrundes aus und verbessert die Haftung des Putzes.

Um Unebenheiten im Putzgrund auszugleichen, wird ein Ausgleichsputz aufgetragen. Dieser muss sowohl auf das Mauerwerk als auch auf den nachfolgenden Putz abgestimmt sein, was insbesondere die Zusammensetzung und die Festigkeit betrifft. Er kann voll deckend aufgetragen werden oder auch nur die Unebenheiten und Fugen ausfüllen.

Putzträger und Putzträgerplatten werden überall dort eingesetzt, wo der Putzgrund nicht tragfähig

für einen Putz ist oder aus konstruktiven Gründen vom Putzgrund getrennt werden muss. Auf diese Weise bildet der Putz eine eigenständige Schale, die dennoch die notwendige Festigkeit besitzt und am Untergrund verankert ist.

3 Putze

Sind die Eigenschaften des Untergrundes bekannt bzw. ermittelt und die gewünschte Funktion des Putzes festgelegt worden, so kann das passende Putzsystem ausgewählt werden. Putze können sehr unterschiedliche Funktionen bzw. Eigenschaften haben. Für alle diese Funktionen/Eigenschaften gibt es entsprechende Werkmörtel (Tabelle 1).

Darüber hinaus können Putze folgende Funktionen besitzen:

- Verhinderung von Kondensation,
- Verhinderung von Schimmelbildung,
- Schutz gegen mechanische Beanspruchung,
- Widerstand gegen chemischen Angriff,
- Schutz gegen Strahlung,
- Schadstoffreduzierung,
- Geruchsbindung.

Putze mit diesen Funktionen sowie Antikondensputze, Leichtputze, Akustikputze und Brandschutzputze werden nicht näher beschrieben. Nur auf die am meisten im Altbaubereich eingesetzten Putze wird eingegangen. Deren technischen Eigenschaften fasst Tabelle 2 zusammen. Renovierputze werden nicht eindeutig definiert, so dass sie nicht erfasst sind. Für Opferputze gelten je nach Einsatzbereich unterschiedliche Anforderungen.

Es gibt Putze, die irreführende Bezeichnungen haben und Eigenschaften vorgeben, die nicht möglich sind. Entfeuchtungsputze entfeuchten nicht und Feuchteregulierungsputze regulieren nicht die Feuchtigkeit. Auch der Begriff »Sanierputz« wäre irreführend, würde man »sanieren« mit »heilen« übersetzen. Im Bauwesen ist »sanieren« jedoch ein Überbegriff für das nachhaltige Instandsetzen eines Bauwerks zum Beseitigen von Mängeln, um den Wohn- und Lebensstandard zu erhöhen.

Tabelle 1

Funktion/Eigenschaft und Zusammensetzung von Putzen (auszugsweise aus [Kollmann, 2013])

Funktion/Eigenschaft	Zusammensetzung	Putzart
druckwasserdicht	Zementputze	Dichtputze Sockelputze
wasserhemmend	Zementputze Kalkzementputze Trassputze Wasserkalkputze	Renovierputze Rissanierungsputze Opferputze Leichtputze
kapillarwasserdicht/wasserabweisend	Kalkzementputze	Sanierputze Oberputze/Edelputze
Wasser aufnehmend (nicht wasserabweisend oder wasserhemmend)	Luftkalkputze Gipsputze Lehmputze	Kompresenputze Grundputze-WTA Antikondensputze
salzspeichernd	Kalkzementputze	Opferputze Sanierputze
wärmedämmend	Kalkzementputze mit Leichtzuschlägen	Leichtputze Wärmedämmputze
schallhemmend	Zementputze Kalkzementputze mit Leichtzuschlägen Gipsputze mit Leichtzuschlägen	Akustikputze Akustikputze Akustikputze
feuerhemmend	Zementputze Kalkzementputze Gipsputze z. T. mit Leichtzuschlägen	Brandschutzputze Brandschutzputze Brandschutzputze

3.1 Dichtputze

Dichtputze werden aus Mörteln hergestellt, die als Bindemittel Zement enthalten. Sie sind wasserhemmend bzw. wasserabweisend und kommen hauptsächlich an stark durch Wasser beanspruchten Flächen zum Einsatz wie im erdberührten Bereich und an Sockeln. Obwohl die Bezeichnung »Dichtputz« den Eindruck erweckt, diese Putze seien wasserundurchlässig, müssen sie im erdberührten Bereich zusätzlich abgedichtet werden, beispielsweise durch mineralische Dichtungsschlämme gemäß [DIN 18195-2] (Bild 2).

Die Abdichtung von Bauwerken bzw. Bauteilen erfolgt in der Regel an der aktiven, also der dem Wasser zugewandten Seite. In Ausnahmefällen bzw. beim Bauen im Bestand muss oft an der Passivseite abgedichtet werden. [WTA-Merkblatt 4-6-14/D].

**Bild 2**

Sprunghafter Wechsel von Naturstein- und Kunststeinmauerwerk im erdberührten Bereich; Einsatz zementhaltiger Mörtel (Dichtputz und Dichtungsschlämme) zur Abdichtung

Tabelle 2

Technische Kennwerte von Putzen (zusammengestellt aus Literatur und Herstellerbeschreibungen)

Putzarten	Fest-mörtelrohichte ¹⁾ kg/dm ³	Biegezugfestigkeit ¹⁾ N/mm ²	Druckfestigkeit ¹⁾ N/mm ²	Haftzugfestigkeit ¹⁾ N/mm ²	E-Modul ¹⁾ N/mm ²	Schwinden ²⁾ mm/m	Wasserdampfdiffusionskoeffizient μ H ₂ O	Luftporengehalt Vol.-%	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Wasseraufnahmekoeffizient kg/m ² h ^{1/2}	Kapillare Wasseraufnahme ³⁾ kg/m ²
Zementputze	1,7 bis 2,2	2 bis 7	6 bis 30	1,0 bis 2,0	10.000 bis 50.000	0,5 bis 1,5	50 bis 100	10 bis 15	1,2 bis 1,4	0,1 bis 0,3	0,5 bis 1,5
Kalkzementputze	1,3 bis 1,8	1,0 bis 2,0	1,5 bis 5,0	0,2 bis 0,4	6000 bis 40.000	0,5 bis 2,0	10 bis 20	10 bis 20	0,9 bis 1,2	0,2 bis 0,4	1,0 bis 2,0
Grundputze-WTA	1,2 bis 1,5	1,0 bis 3,0	3,5 bis 7,5	0,3 bis 0,5	5000 bis 15.000	0,5 bis 2,5	10 bis 18	35 bis 45 ⁴⁾ 45 bis 55 ⁵⁾	0,4 bis 0,8	0,2 bis 0,4	1,0 bis 2,0
Sanierputze-WTA	0,9 bis 1,4	1,0 bis 2,0	1,5 bis 5,0	0,2 bis 0,4	5000 bis 15.000	0,5 bis 2,0	6 bis 12	40 bis 55	0,3 bis 0,6	0,06 bis 0,4	0,3 bis 1,8
Kalkputze	1,2 bis 1,6	0,5 bis 1,0	0,4 bis 3,0	0,1 bis 0,2	2000 bis 12.000	0,4 bis 0,8	9 bis 15	20 bis 30	0,8 bis 1,2	5 bis 20	25 bis 50
Gipsputze	1,2 bis 1,4	1,0 bis 3,0	2,0 bis 5,0	0,4 bis 0,9	5000 bis 15.000	0,1 bis 0,2	8 bis 12	15 bis 25	0,3 bis 0,9	3 bis 15	20 bis 40
Lehmputze	1,4 bis 1,8	1,0 bis 2,0	0,5 bis 3,0	0,1 bis 0,2	1000 bis 3000	0,3 bis 0,5	6 bis 10	20 bis 30	0,4 bis 0,8	10 bis 20	50 bis 80
Wärmedämmputze	0,2 bis 0,5	0,2 bis 0,4	0,4 bis 2,5	0,1 bis 0,2	< 1000	0,5 bis 1,0	5 bis 10	60 bis 70	0,06 bis 0,20	2 bis 5	5 bis 10

1) gemessen nach 28 Tagen

2) gemessen nach 90 Tagen

3) gemessen nach 24 Stunden

4) Ausgleichsputz-WTA

5) Porengrundputz-WTA, auszugsweise aus [Dettmering, Kollmann, 2011]

3.2 Opferputze

Es gibt zwei Arten von Opferputzen. Die einen haben die Aufgabe, Mauerwerk, Altputz oder Bauteilen Salz und Feuchtigkeit zu entziehen. Die anderen sollen den Untergrund für einen bestimmten Zeitraum vor schädlichen Einflüssen schützen. Sie werden nach sechs Monaten bis zwei Jahren wieder entfernt (»geopfert«). Das [WTA-Merkblatt 2-10-06/D] unterscheidet zwei Typen von Opferputzen:

- OP-I: Opferputz gegen Einflüsse aus dem Inneren des Bauwerks oder Bauteils,
- OP-A: Opferputz gegen Einflüsse von außen.

Bei den OP-I handelt es sich um Opferputze im »klassischen« Sinne. Die OP-A dagegen sollen das Mauerwerk kurzzeitig als Puffer gegen den Einfluss von Temperaturwechseln, Feuchtigkeitswechseln, Umweltbelastungen und mechanischen Beschädigungen schützen. Es handelt sich hierbei also um »Verschleißschichten«.

Aufgrund dieser vielfältigen Anwendungen sind auch die Zusammensetzungen und die technischen Eigenschaften dieser Mörtel ganz unterschiedlich. Über ihre Zusammensetzung macht [WTA Merkblatt 2-10-06/D] nur allgemeine Aussagen. Die technischen Daten, die erfüllt werden müssen, sind jedoch festgelegt. Opferputze werden manchmal mit Sanierputzen verwechselt, mitunter Kalkputze als Opferputze angeboten. Diese können jedoch die gestellten Anforderungen nicht erfüllen.

3.3 Sanierputze – Sanierputzsysteme

In der Bauwerksinstandsetzung und Denkmalpflege kommt den Sanierputzsystemen eine besondere Bedeutung zu, wenn es darum geht, altes Mauerwerk, das meist feucht und salzbelastet ist, zu verputzen. Mit ihnen können sehr viele Probleme gelöst werden, wenn die Anwendungsgrenzen beachtet werden und die Verarbeitung sorgfältig geschieht.

Es handelt sich hierbei um ein System aus mehreren, genau aufeinander abgestimmten Materialien und zwar:

- Spritzbewurf,
- Grundputz (Ausgleichsputz oder Porengrundputz),
- Sanierputz,
- Deckschicht (Oberputz und/oder Farbanstrich).

Außer dem Sanierputz kann je nach Anwendungsfall das eine oder andere Produkt entfallen.

[WTA-Merkblatt 2-9-04/D] beschreibt die Anforderungen und Prüfungen von Sanierputzsystemen, erklärt das Wirkprinzip und gibt Hinweise für Planung, Ausführung, Qualitätssicherung und nennt auch Anwendungsgrenzen.

Kommen Grundputze zum Ausgleich von Unebenheiten zum Einsatz, so werden sie als Ausgleichsputze bezeichnet. Sind sie sehr porenreich und können vermehrt Salze aufnehmen handelt es sich um so genannte Porengrundputze. Grundputze sind im Gegensatz zu Sanierputzen nicht wasserabweisend. Sanierputze werden definiert als »Putze mit hoher Porosität und Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitig erheblich verminderter kapillarer Leitfähigkeit« [WTA-Merkblatt 2-9-04/D].

Oft werden Kalk-Sanierputze oder Trass-Sanierputze gefordert. Da Sanierputze relativ schnell und sicher erhärten und trocknen müssen, sind sie überwiegend hydraulisch gebunden. Kalkhydrat als wesentliche Bindemittelkomponente ist nicht beständig auf salz- und feuchtebelastetem Untergrund. Auch latent-hydraulische Bindemittel und puzzolanische Stoffe sind problematisch, da sie sehr langsam abbinden und die Salze leicht an die Oberfläche geleitet werden können.

Erfüllen die Putze eines Sanierputzsystems alle Anforderungen des [WTA-Merkblattes 2-9-04/D], so dürfen sie als »Grundputz-WTA« (»Ausgleichsputz-WTA bzw. »Porengrundputz-WTA) und »Sanierputz-WTA« bezeichnet werden, was durch ein Zertifikat bestätigt wird.

3.4 Renovierputze

Mit Renovierputzen (oft auch als »Armierungsmörtel« bezeichnet) werden alte, geschädigte Putzfassaden dünnsschichtig überzogen. Sie enthalten Armierungsfasern und Kunststoffzusätze um sie hafter und flexibler zu machen. Oft werden sie eingesetzt, um Risse instand zu setzen. Hierzu wird ein Armierungsgewebe vollflächig eingebettet. Die Vorgehensweise bei der Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden ist im [WTA-Merkblatt 2-4-08/D] beschrieben.

3.5 Kalkputze

Kalkputze können sehr unterschiedlich zusammengesetzt sein und damit sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen. Durch die Wahl der Baukalkart lassen sich sowohl relativ weiche Luftkalkputze als auch hydraulisch erhärtende Kalkputze mit wesentlich höherer Festigkeit herstellen. Sowohl die Einsatzmöglichkeiten als auch die Einsatzgrenzen von Kalkputzen richten sich entscheidend nach der zu erwartenden Belastung durch Wasser.

Luftkalkputze besitzen eine besonders hohe kapillare Aktivität. Ihre Lebensdauer ist bei größerer Feuchtebelastung wegen der höheren Wasseraufnahme, sei es aus dem Untergrund oder durch äußere Einflüsse eingeschränkt [WTA-Merkblatt 2-7-01/D].

3.6 Gipsputze

Gipshaltige Putze besitzen als Bindemittel vorwiegend Stuckgips, Putzgips oder Anhydrit sowie Kalk. Sie werden meist dünnsschichtig auf ebenen Untergründen im Innenbereich verwendet. Aufgrund ihrer Fähigkeit, Wasser einzulagern, sind Gipsputze in der Lage, anfallende Oberflächenfeuchtigkeit teilweise aufzunehmen und bei Änderungen des Raumklimas wieder abzugeben. Aufgrund ihres chemisch gebundenen Wassers werden sie auch zum Brandschutz eingesetzt.

3.7 Lehmputze

Lehmputze bestehen aus Lehm als Bindemittel, Sanden als Zuschlag und Pflanzenfasern als Armierung. Durch die hohe Sorptionsfähigkeit hat Lehm gute raumklimaregulierende Eigenschaften. Er nimmt Luftfeuchtigkeit auf und gibt sie wieder ab, wenn sich das Raumklima normalisiert hat. Darüber hinaus kann er als Wärmespeicher fungieren. Andere Vorteile sind niedrige Biegezug- und Druckfestigkeiten und eine gute Wasserdampfdurchlässigkeit.

Aufgetragen werden Lehmputze auf fast alle Untergründe: Natursteine, Ziegel, Bimsbeton, Porenbeton, raue Betonoberflächen, Leichtbausteine, Kalkputze, Kalkzementputze, Gipsputze, Gipsbauplatten, Holzwolle-Leichtbauplatten, Schilfrohrdämmplatten, verklammerungsfähige Holzkonstruktionen sowie mineralisch gebundene Bauplatten. Auch auf Wandflächenheizungen können Lehmputze zum Einsatz kommen.

Da Lehmputz diffusionsoffen ist und eine hohe kapillare Leitfähigkeit besitzt, muss er im Außenbereich durch entsprechende Beschichtungssysteme (Putz und Anstrich) geschützt werden. Lehmputze sind relativ »weich«. Sie dürfen daher nur mit Oberputzen überarbeitet werden, die das Festigkeitsgefälle einhalten. Dafür eignen sich Kalkputze oder Gipsputze.

3.8 Wärmedämmputze

Wärmedämmputze (in [DIN EN 998-1] als »Wärmedämmputzmörtel« bezeichnet) sind definitionsgemäß »Mörtel mit spezifischen wärmedämmenden Eigenschaften«. Im Altbaubereich dienen sie der Verbesserung des Wärmeschutzes. In Rissinstandsetzungssystemen werden sie zum vollflächigen Überarbeiten gerissener Putzflächen aufgetragen. Bei dieser Anwendung dienen sie als dauerhaft rissfreie Putzbeschichtung, bei der es weniger auf die wärmedämmenden Eigenschaften ankommt.

Wärmedämmputze sind mineralisch gebundene, sehr leichte Putze mit niedriger Wärmeleitfähigkeit. Der Vorteil von Wärmedämmputzen gegenüber Systemen aus wärmedämmenden Platten ist, dass sie nahtlos aufgebracht werden können, selbst auf alten, unebenen Untergründen. Aufgrund ihrer Eigenschaften können Wärmedämmputze nicht ungeschützt stehen bleiben, sondern müssen immer mit einem Oberputz versehen werden, damit sie

gegen mechanische Beschädigungen und Witterungseinflüsse geschützt sind. Wärmedämmputze selbst sind relativ weich, während die Oberputze deutlich härter sind. Das übliche Festigkeitsgefälle ist hier also nicht gegeben. Die härteren Oberputze können dennoch auf die weicheren Wärmedämmputze aufgetragen werden, wenn die Druckfestigkeiten innerhalb bestimmter Grenzen liegen und der Oberputz nicht zu dick ist.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

[Kollmann, 2013] Kollmann, H., (2013): Putz kompakt. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller

[Dettmering, Kollmann, 2011] Dettmering, T., Kollmann, H., (2011): Putze in Bausanierung und Denkmalpflege. 2. überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth-Verlag

Kollmann, H. et al., (2005): Kellersanierung – Von Grund auf gut vom Fachmann. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag

Kollmann, H., (2010): Sanierungspraxis Putz. Band 4 der Reihe »Praxis aktuell«. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag

Kollmann, H. et al., (2012): Praxis-Handbuch Bautenschutz. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller

Kollmann, H., (2011): Opferputz, Sanierputz, Entfeuchtungsputz – Dient das dem Denkmal dauerhaft? Tagungsband »Nachhaltigkeit und Prävention – Konzepte für die dauerhafte Bauwerkserhaltung«. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, S. 85–95

Farben auf Naturstein

Anstriche auf Naturstein im Außenbereich haben zwei Funktionen – die Gestaltung und den Verwitterungsschutz. Es wird ein historischer Überblick über Anstriche sowie über die Eigenschaften und Funktionen von modernen Anstrichsystemen auf Naturstein dargelegt. Der Schwerpunkt liegt auf dem Anstrich auf Fassadenflächen oder Bauzier aus Naturstein.

Christoph Herm

Schlagwörter: Kalkfarbe, Leinölfarbe, Leimfarbe, Kalk-Weißzementfarbe, Silikatfarbe, Dispersions-Silikatfarbe, Siliconharzfarbe

Historischer Überblick

Eine strenge Abgrenzung der historischen Maltechniken zur Beschichtung von Naturstein von den Anstrichtechniken anderer Fassadenbaustoffe wie Putz und Holz einerseits und der künstlerischen, polychromen Fassung von Skulpturen andererseits ist nicht möglich. Typisch für den spätmittelalterlichen Anstrichaufbau in der Architekturdécoration sind Ölimprägnierung sowie eine weitere dünne Grundierung mit unterschiedlichen Pigmenten. Für die Malschichten sind als Bindemittel überwiegend Öl oder ölhaltige Tempera, Kasein und seltener Kalkbindemittel verwendet worden [Möller, 1991]. In Österreich wurden zahlreiche Befunde von Kalkfarben auf Portalen, Außenfassaden und Innenräumen der Romanik und Gotik festgestellt [Nimmrichter, Koller, 2000]. Nach [Koller et al., 1998] ist seit dem 15. Jh. in der deutschen Fachsprache der Begriff Steinfarbe nachweisbar. Seit dem 16. Jh. sind heiße Öltränken und Ölanstriche für Sandsteinobjekte belegt, die wegen ihrer kurzen Haltbarkeit alle 30 bis 50 Jahre erneuert werden mussten. Ab der Renaissance kam vermehrt Öl als Bindemittel der Anstriche zum Einsatz, bevorzugt mit Bleiweiß pigmentiert. Ein Beispiel für Fassadenmalerei der Renaissance in Ölfarbentechnik, die bis heute erhalten wurde, ist das Rathaus in Basel mit

den Wandmalereien von Hans Bock d. Ä. von 1608–1611, die zuletzt 1978–1983 restauriert worden sind [Heydrich, 1990]. Zur Architekturfassung des Barock sind Quellen bekannt, wonach an ein und derselben Fassade die Putzflächen in Kalkfarbe und die Natursteinteile in Ölfarbe gestrichen werden sollten [Koller, 1975], [Schmidt, 1790], [Kiesewetter, 2000].

Die Bauplastik des 15. Jh. nördlich der Alpen wurde oft mit Ölfarbe gefasst, während Architekturteile Kalkfarbe aufwiesen [Wihr, 1980]. Aus dem 18. Jh. sind zahlreiche Quellen überliefert, die die Behandlung von Skulpturen, vor allem für die Gartenanlagen dieser Epoche, mit Ölfarben vorschreiben. Zur Erstbehandlung, aber auch zur Restaurierung wurden sie wiederholt mit Leinöl getränkt und dann meist mit Bleiweiß in Öl (Porzellanfassung) oder einer anderen Technik (Metallauflage, Marmorimitation, Polychromie, Steinfarbe) gestaltet. Auch im Donaauraum erhielten zahlreiche Freiplastiken aus Sandstein die ölgebundenen Bleiweißfassungen zur Marmorimitation [Koller et al., 1998]. Diese Tradition ist in Einzelfällen bis etwa 1930 weiterverfolgt worden [Wihr, 1980]. Einen aufschlussreichen Einblick in die Komplexität der polychromen Fassung von Steinskulpturen und ihrer Verwitterung geben beispielsweise [Drewello, Herkner, 2009].

Eine wesentliche Neuerung in der Anstrichtechnologie stellte im 19. Jh. die Erfindung der Silikatfarbe (Mineralfarbe) durch Adolf Wilhelm Keim dar [Keim, 1881]. Diese spielte aufgrund der damals bevorzugten Materialsichtigkeit für Naturstein im Gegensatz zu heute jedoch kaum eine Rolle. Mit der Entwicklung von Kunstharzen Anfang des 20. Jh. kamen Lacke und nach dem II. Weltkrieg Kunstharz-Dispersionsfarben auf, die für Naturstein jedoch nur sporadisch verwendet wurden. Schließlich ermöglichte die Einführung von Siliconen in die Bauchemie auch die Produktion spezieller Anstrichstoffe (Siliconharz-Dispersionsfarben).

Ein prominentes Beispiel für die unterschiedliche Verwendung von Anstrichstoffen, aber auch für den Wandel der Farbtöne mit dem Stil der Zeit ist die durch restauratorische Untersuchung gut dokumentierte Abfolge von historischen Anstrichen für das 1788–95 erbaute Brandenburger Tor in Berlin. Auf einer bauzeitlichen Kalkfassung wurde der Auftrag von sieben weiteren Ölfarbeschichten mit Farbtönen von braun über grau bis sandsteinfarben nachgewiesen [Kupfer, 1991], bevor die Natursteinteile 1913 endgültig abgelautet worden sind [Stiftung Denkmalschutz Berlin, 2014].

Die Funktion von Anstrichen als Verwitterungsschutz wurde verstärkt seit der Mitte des 19. Jh. diskutiert, als besonders in England die naturwissenschaftliche Beschäftigung mit der Verwitterung und Konservierung von Naturstein allgemein einsetzte [Lewin, 1966]. Das britische »Building Research Board« hielt 1932 Ölfarbe für das beste Schutzmittel, wenn sie regelmäßig erneuert werde, ebenso die »Building Research Station« noch 1950. Dagegen propagierte die »Society for the Protection of Ancient Buildings« Kalkfarbe als geeignetes Steinschutzmittel [SPAB, 1926]. In der Diskussion der Denkmalpflege in Deutschland um die farbige Gestaltung von Architektur führte Ochs [1911] Ölfarbenanstriche als Schutz für »nicht genügend beständigen Werkstein« an; Moormann [1913] bezeichnete als wirksamsten Schutz des Sandsteins »Ölfarbanstrich, der rechtzeitig erneuert wird«. Ab dem zweiten Viertel des 20. Jh. wurde die angebliche Schutzwirkung von Anstrichen für Naturstein in Deutschland überwiegend kritisch gesehen. Tucholski [1929] folgerte aus Beobachtungen am

Schloss Hartenfels in Torgau, dass der schadhafte Ölfarbenanstrich für den Sandstein eine große Gefahr bedeute. Rathgen [1929] riet von der Verwendung von Ölfarbe auf schon vorgeschädigtem Stein ab. In der Bewertung zahlreicher Denkmäler in Sachsen schnitt der Ölfarbenanstrich im Gegensatz zur Tränkung mit heißem Leinöl und im Vergleich mit farblosen Steinschutzmitteln am schlechtesten ab [Rathgen, Koch, 1934]. Nach Wihr [1980] habe die Ölfarbe in den letzten 250 Jahren den Zerfall von Steinen im Freien nicht aufgehalten, ja ihn meistens sogar beschleunigt. Entsprechendes gelte für Kunstharz-Lacke und Dispersionsfarben. Am besten geeignet seien Silikatfarben. Kalkfarben würden die geringsten Schäden am Stein verursachen, seien aber wenig dauerhaft. Für den Elbsandstein hat Siedel [2000] von entsprechenden Schäden durch historische Ölfarben-Anstriche berichtet. Mit der Forschung zur Natursteinkonservierung in Deutschland seit etwa 30 Jahren ist auch die Neubewertung der Eigenschaften und Funktionen von Anstrichen auf Naturstein verbunden [Brandes, 1999], [Boué 2000]. Der Anstrich von Naturstein hat seitdem wieder Eingang in Abhandlungen zur Steinkonservierung [Snethlage, Pfanner, 2013] und zur Beschichtungstechnik [WTA-Merkblatt 2-12-2013] gefunden.

Die kontroversen Diskussionen über den Nutzen oder Schaden eines Anstrichs von Naturstein berücksichtigen meist nicht die Art des Untergrundes. Doch schon Platzmann [1929] hat darauf hingewiesen, »daß nur individuelle Mittel nützlich sind, welche auf die Art und Eigenschaften des zu schützenden Steins eingestellt sind und die überdies der Art zerstörender Einwirkung Rechnung tragen«. Es kann also keinen idealen Anstrich für alle Natursteine und Verwitterungszustände geben.

Kalkfarbe und Leinölfarbe

Als Grundstoff für die Zubereitung von Kalkfarbe sind Sumpfkalk, Weißkalkhydrat oder dispergiertes Weißkalkhydrat [Egloffstein, 2004] bekannt. In der historischen Literatur sind eine Reihe von Zusätzen genannt, die die Eigenschaften sowohl des Anstrichstoffs als auch der Beschichtung verbessern sollen [Herm, 2000]. Zur Verbesserung der Eigen-

schaften werden heute vor allem Kunstharz-Dispersion (max. 5 %) und Siliconharzdispersion zur internen Hydrophobierung zugesetzt. Nach [DIN 18363] dürfen Kalkfarben kalkbeständige Pigmente bis zu 10 M-% enthalten. Zur Erhöhung der Witterungsbeständigkeit ist auch eine nachträgliche Hydrophobierung möglich. Es gibt werkseitig konfektionierte Kalkfarben für den Innen- und Außenanstrich, die Stein- oder Marmormehl und organische Zusatzmittel wie Kunstharzdispersion, Leinöl oder Methylcellulose enthalten [Egloffstein, 2004].

Seit 1982 setzt das Österreichische Bundesdenkmalamt Opferschichten aus Kalk als einen wichtigen Bestandteil der Strategie zur Konservierung von Natursteinoberflächen und Skulpturen bei vorheriger Konservierung des Natursteinuntergrundes sowie regelmäßiger Wartung ein [Nimmrichter, Koller, 2000]. Die Opferschicht soll durch eigene Verwitterung die darunter liegende Substanz schützen, die Wasseraufnahme verringern sowie die Dampfdurchlässigkeit erhalten. Weitere Vorteile sollen die Absorption von Schwefeldioxid, Minderung der Aufheizung, Verfestigung des Untergrunds durch Kalkhydrat und Wiederholbarkeit sein. Sowohl die historischen Befunde als auch diese Maßnahme betreffen nur für die in Österreich vorherrschenden Kalksandsteine (z. B. Zogelsdorfer) und Kalksteine (z. B. Leithakalk). Über Jahrzehnte der Erprobung wurde eine grundsätzliche Rezeptur erarbeitet, die auf Sumpfkalk (CL90) und Steinmehl, das auch zur Farbgebung eingesetzt werden kann, im Volumenverhältnis von 1:1 sowie einem Zusatz von 5 % Acrylat-Dispersion beruht. Für die Anwendung sind bestimmte Vorschriften wie geringe Schichtstärke und Befeuchtung zu beachten. Die Dauerhaftigkeit der Kalkschlämme wird durch nachträgliche Hydrophobierung wesentlich gesteigert. Seitdem sind in Österreich zahlreiche Fassaden und Portale von kirchlichen und profanen Bauten aus der Romanik bis in das 19. Jh. aber auch freistehende Skulpturen und Denkmäler, vorzugsweise aus dem Barock, behandelt worden. Deren Evaluierung hat eine Dauerhaftigkeit der regelgerecht ausgeführten Anstriche von durchschnittlich zehn Jahren ergeben [Nimmrichter, 2007].

In Deutschland wurde seit etwa dem Jahr 2000 regional mit der wissenschaftlich begleiteten An-

wendung von Kalkfarben und Kalkschlämmen auch auf Naturstein begonnen [Egloffstein, 2004]. Zum Einsatz kamen konfektionierte aber auch individuell gemischte Kalkfarben. Darüber hinaus wurden auch Schlämmen aus natürlichem hydraulischen Kalk (NHL2, NHL5) auf Sandstein (u. a. Grauwacke) und auf vulkanischem Tuff eingesetzt. Nach Standzeiten von bis zu fünf Jahren waren die Erhaltungszustände grundsätzlich gut. Auf hoch feuchtebelasteten Sockeln und salzbelasteten Flächen sind Anstrichschäden zu beobachten gewesen. Die letzte Restaurierungskampagne an der Kalkstein-Fassade des Doms zu Passau (2008–13) wurde mit einer Kalkschlämme-Beschichtung abgeschlossen [Ueblicher, 2006]. Die Schlämme setzten sich aus Sumpfkalk, Sand, Leinölfirnis und Holzkohle zusammen.

Die chemische Natur der Pigmente hat entscheidenden Einfluss auf die Härtungs- und Filmbildungseigenschaften von Leinölfarbe. Bleiweiß ist das wichtigste Weißpigment zumindest der abendländischen Malerei und der historischen Anstrich-technik. Es führt zu einer Beschleunigung der Filmbildung (Sikkativwirkung). Inzwischen kommt Bleiweiß wegen seiner Giftigkeit nicht mehr zum alltäglichen Gebrauch. Bei Anwendungen in der Restaurierung und Denkmalpflege besteht eine Ausnahmeregelung.

Für den an der Renaissance-Fassade des Rathauses in Lübeck verbauten Gotland-Sandstein wurde durch Laboruntersuchungen [Herm, Warscheid, 1995] und Freibewitterungsversuche [Brüggerhoff et al., 2005] Siliconharzdispersionsfarbe als am besten geeignete Beschichtung gefunden. Als Kompromiss zwischen Schutzfunktion und Erscheinungsbild kam in den Jahren 2002–2003 ein Leinöl-Bleiweiß-Anstrich nach historischem Befund mit dem damit verbundenen erhöhten Pflegeaufwand zum Einsatz (Bild 1). Neben dem Basler Rathaus ist auch das Rathaus in Celle ein Denkmal, an dem die Sandstein-Fassade im Jahr 1984 erneut mit Ölfarbe auf ölhaltige Altanstrichen und Dispersionsfarben gestrichen und mit Standölfirnis imprägniert worden ist [Brandes, 1999].

Die Fassung von Skulpturen mit Leinöl-Bleiweißfarbe nach historischem Befund stellt heute eine Ausnahme dar. Einige der barocken Skulpturen aus



Bild 1 Rathaus Lübeck, Renaissance-Fassade mit Leinöl-Bleiweiß-Anstrich, Zustand 2010 nach sieben Jahren Standzeit

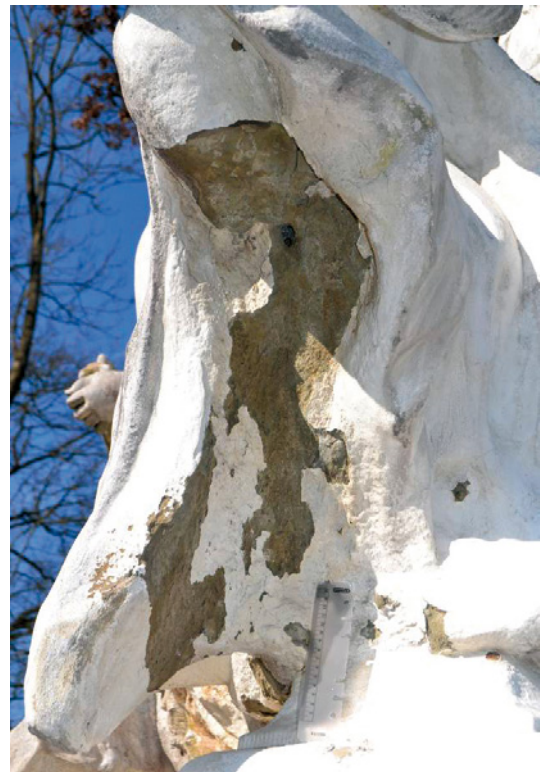


Bild 2 Schloss Seehof, Memmelsdorf, Figurengruppe »Jupiter im Kampf mit den Giganten«, Schäden am Leinöl-Bleiweiß-Anstrich und am Sandstein, Zustand 2014 nach 13 Jahren Standzeit

Schiffsandstein im Park des Schlosses Seehof in Memmelsdorf bei Bamberg wurden im Jahr 2001 derartig neu gefasst. Nach etwa zehn Jahren müssen rasch fortschreitende Schäden festgestellt werden, weil die früher übliche Einhausung im Winter nicht mehr errichtet wird und der Anstrich nicht gewartet wird [Snethlage, Pfanner, 2013] (Bild 2).

Moderne Anstrichsysteme

Unter einem Anstrichsystem versteht man die Gesamtheit einer aus verschiedenen funktionellen Schichten, z. B. Untergrundvorbehandlung, Grund- und Deckanstrich, aufgebauten Beschichtung, die in der Regel nach Herstellerangaben auszuführen ist. Die für fast alle Arten von technischen Anstrichsystemen geltende [DIN 18363] bietet eine praxisgerechte Einteilung nach der Art des Bindemittels, die auch für die Betrachtung von Anstrichmaßnahmen auf Naturstein zweckmäßig erscheint. In ihr werden Anlaugestoffe, Stoffe zur Untergrundvorbehandlung und Spachtel- und Ausgleichsmassen definiert, die unter Umständen für die Behandlung von Naturstein in Frage kommen.

Deckend pigmentierte Beschichtungsstoffe unter anderem für mineralische Untergründe werden eingeteilt in:

- Leimfarben
- Kalkfarben aus Weißkalk
- Kalk-Weißzementfarben mit maximal 20 M-% Zusatz von Zement
- Silikatfarben »... müssen aus Kaliwasserglaslösungen und kaliwasserglasbeständigen Pigmenten bestehen und dürfen keine organischen Bestandteile, z. B. Kunststoffdispersionen, enthalten.« [DIN 18363]. Dieser Anstrichtyp wird in der Regel kurz vor der Verarbeitung aus Füllstoff und Bindemittel gemischt und daher auch Zweikomponentensilikatfarbe, Reinsilikatfarbe oder Mineralfarbe genannt. Eine Abwandlung der Silikatfarbe sind Schlämmen, die mit reinem Kieselöl gebunden werden [Kaiser, 2000] sowie Schlämmen mit elastifiziertem Kieselsäureester als Bindemittel [Wendler, 2000].
- Dispersions-Silikatfarben und ähnliche Beschichtungsstoffe müssen laut [DIN 18363] aus Kaliwasserglas mit kaliwasserglasbeständigen Pigmenten und Zusätzen von Hydrophobierungsmitteln bestehen und dürfen maximal

5 M-% organische Bestandteile enthalten. Seit etwa zehn Jahren gibt es Sol-Silikatfarben, bei denen das Bindemittel eine Kombination von Wasserglas und wässrigem Kieselsäuresol mit bis zu 5 M-% Kunstharz-Dispersion ist. Sie zeigen gegenüber den Dispersionsilikatfarben eine deutlich bessere Benetzung von hydrophoben Untergründen und damit auch eine stärkere Haftung des ausgehärteten Anstrichs. Eine erfolgreiche Beschichtung auch vorbehandelter, wasserabstoßender Natursteinuntergründe soll möglich sein [Rademacher, 2004]. Bei der Anwendung von Silikat- und Dispersionsilikatfabren (einschließlich Sol-Silikatfarben) auf eisenhaltigem Sandstein können »Rostflecken« auftreten [Siedel, 2000]. Zu ihrer Vermeidung wird empfohlen, den Untergrund vorher zu hydrophobieren. Dies lässt dann allerdings nur noch die Anwendung von Dispersionsilikatfarben zu [Brandes, 1999].

- Siliconharzfarben sind Kunstharz-Dispersionsfarben, bei denen die Pigment- und Füllstoffkonzentration so weit erhöht ist (über die kritische Pigmentvolumenkonzentration), dass der Film wasserdampfdurchlässig wird. Während der Dispersionsanteil für die Bindung sorgt, führt der Siliconharzanteil zur Wasserabstoßung [Badga, 1990], [Hilbert, 2000]. Siliconharzfarben für den Außenbereich müssen nach [DIN 18636] dauerhaft wasserabweisend und gegen Schmutzverklebung resistent sein. Die Modifizierung von Siliconharzfarben kann grundsätzlich durch Zusatz von Füllstoffen, Sand (Siliconharzschlämme) oder farbloser Bindemittel-Siliconharzdispersion (Siliconharzfarbe farblos) geschehen.

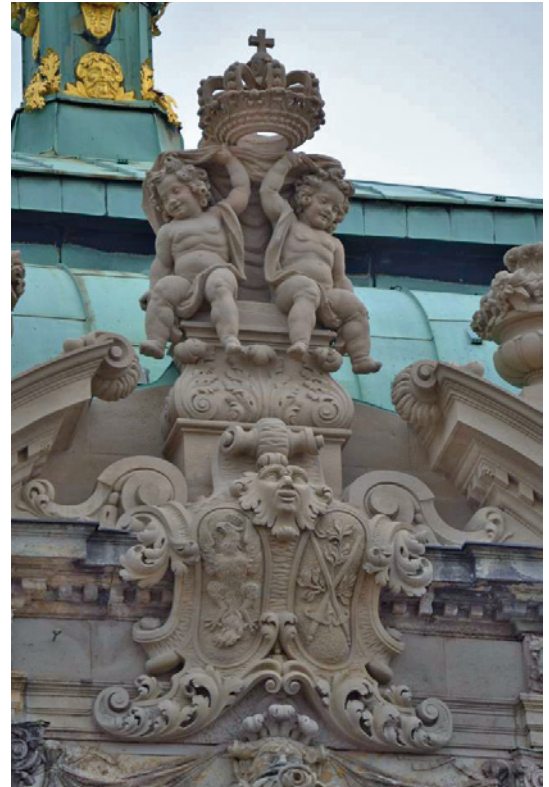
Die dokumentierte Anwendung von Siliconharzfarben auf Naturstein begann 1978 mit der Behandlung der Architekturgliederung aus Buntsandstein am Hauptbahnhof in Osnabrück [Brandes, 1999]. Nach 12 Jahren haben sich nur am Sockel Anstrichschäden gezeigt. In Niedersachsen wurde eine Reihe von Fassaden und freistehenden Sandsteinskulpturen, z. B. in Hannover, Schloss Herrenhausen, mit Siliconharzfarbe behandelt. Meist wurde der Untergrund mit einer Hydrophobierung vorbehandelt [Lenz, 2000]. Die Standzeiten sollen bis zu 20 Jahren betragen. Am Kölner Dom begann 1994

die Erprobung von Siliconharzanstrichen, die 1998 mit der Behandlung einer gesamten Strebesystemachse abgeschlossen wurde [von Plehwe-Leisen, Leisen, 2005]. Auf verschiedenen Kalksteinvarietäten und auf Trachyt kamen dort Siliconharz-Schlämmen (Siliconharz-Streichputze) zum Einsatz, deren physikalische Eigenschaften im Labor überprüft wurden. Neben der wasserabweisenden Wirkung zeigten sich teils erhebliche Dampfdiffusionswiderstände, woraufhin die Rezeptur veränderte wurde. Diese Ergebnisse zeigen die Gefahr, dass durch Veränderung der Rezeptur die Diffusionsoffenheit von Siliconharzfarbe bedenklich herabgesetzt werden kann. In diesen Fällen sind zumindest die Herstellerangaben einzuhalten und die sich tatsächlich einstellenden Diffusionseigenschaften (sd-Wert) auf dem zu behandelnden Untergrund zu prüfen [Herm, 1992]. Nach etwa fünf Jahren Standzeit waren die mit Siliconharz-Schlämmen beschichteten Flächen intakt, mit leichtem oberflächlichem Abbau. Entsprechende Siliconharz-Schlämmen wurden unter wissenschaftlicher Begleitung auch auf Elbsandstein-Teilen an der St. Bennokirche in Meißen in den Jahren 2000–2003 erprobt [Donath, 2005].

Wie auch bei anderen Ensembles barocker Gartenskulpturen waren die Figuren im Zwinger in Dresden seit dem 18. Jh. bis etwa 1910 mit Bleiweiß-Ölfarbe gefasst und wurden entsprechend gepflegt. Die Anwendung eines Abbeizers (Zwingerpaste) führte zu hoher Salzbelastung. In der Folgezeit mussten die stark geschädigten Originale durch Kopien ersetzt werden. Aufgrund der für den Elbsandstein typischen Verschwärzung (Patina) kehrte sich innerhalb weniger Jahrzehnte das ursprünglich beabsichtigte optische Erscheinungsbild wieder um. Nun stehen dunkle Figuren vor hellerem Grund (Bild 3). Aus dem Anliegen der Denkmalpflege, den optischen Eindruck zu verbessern und um den Skulpturen eine Schutzwirkung zu geben, wurden 1989 versuchsweise eine Reihe von Figuren am Kronentor mit Siliconharzfarbe lasiert [Kiesewetter, 2009]. Nach zehn Jahren war die konservierende Wirkung für den Elbsandstein nachgewiesen. Seit 2005 werden die Skulpturen aus dem 19. und 20. Jh. auf Attika und Balustraden des Zwingers mit einer Siliconharzfarbe im hellen Sandsteinton in zwei dünnen Schichten lasiert (Bild 4),

**Bild 3**

Dresden, Zwinger: Attikafiguren am Französischen Pavillon, unbeschichtet, mit schwarzer Patina (Zustand 1993)

**Bild 4**

Dresden, Zwinger: Attikafiguren am Deutschen Pavillon, mit Siliconharzfarbe (Lasur) beschichtet (Zustand 2014)

nachdem sie zuvor mit üblichen Verfahren gereinigt und konserviert worden sind.

Von praktischer Bedeutung für die Anwendung ist die Einteilung von Anstrichstoffen in wasser- verdünnbar oder lösemittelverdünnbar nach [DIN EN 1062-1], wobei für die Beschichtung von Naturstein vor allem wasser- verdünnbare Anstrich- stoffe bevorzugt werden. Darunter fallen die Kalk-, Silikat- und Dispersionssilikatfarben, aber auch alle Kunstharz- und Siliconharzdispersionen. Das [WTA-Merkblatt 2-12, 2013] bewertet die Eignung der Anstriche für mineralische Untergründe, da- runter verschiedene Natursteinvarietäten: Für dichten Sandstein oder dichten Kalkstein sehr gut bis gut geeignet sind demnach Dispersionssilikat-, Solsilikat- und Siliconharzfarbe. Für dichten Kalk- stein gut bis bedingt geeignet sind noch Dispersi- ons- und Silikatfarbe. Für weichen Sandstein oder porösen Kalkstein gut bis bedingt geeignet sind Dispersionssilikat-, Solsilikat- und Siliconharzfarbe. Für beide Sandsteinarten gut bis bedingt geeignet sind zudem noch Silikat- und Kalkfarbe, insbeson- dere modifizierte Kalkfarbe. Für magmatischen Tuffstein sind die Kalkfarbetypen und die Silicon- harzfarbe gut bis bedingt geeignet. Der am breites-

ten einsetzbare Anstrich ist folglich die Siliconharz- farbe, gefolgt von der Solsilikatfarbe. Am wenig- sten geeignet erscheinen die reine Kalkfarbe und die Silikatfarbe.

Nach der Konzeptfindung zum Anstrich benötigt die praktische Anwendung Richtlinien für die Vor- bereitung des Untergrunds und für die Ausführung [Brandes, 1999], [Snethlage, Pfanner, 2013] [WTA- Merkblatt 2-12, 2013]. Von besonderem Interesse für die Erhaltung von Naturstein an Denkmälern sind die Vorbehandlung des Untergrundes, die in der Regel mit dessen Konservierung gleichbedeu- tend ist, und die Bewahrung vorhandener, denk- malpflegerisch bedeutsamer Altanstriche. Die Be- schichtung ist als Teil eines Konservierungskonze- ptes zu sehen. Bei der Anwendung von Silikat- und Dispersionsilikatfarben ist die Gefahr der Überfes- tigung durch weiteren Bindemittelintrag aus dem Beschichtungsstoff zu berücksichtigen. Falls aus denkmalpflegerischen oder technischen Gründen die Hydrophobierung des Natursteins selbst nicht zulässig ist, bietet eine Beschichtung die Möglic- keit, die Oberfläche wasserhemmend auszustatten, ohne in die Struktur des Natursteinuntergrundes einzugreifen (Hydrophobie ohne Hydrophobie-

rungsmittel) [WTA-Merkblatt 2-12-2013]. Es ist darauf zu achten, dass der anzuwendende Anstrichstoff mit der Vorbehandlung, auch wenn sie lange zurückliegt, verträglich ist. Insbesondere betrifft dies die spätere Haftung des Anstrichs. Die wasserverdünnbaren Anstrichstoffe Kalk- und Silikatfarbe dürfen nicht auf hydrophobe Untergründe gestrichen werden [Brandes, 1999]. Für hydrophobe Untergründe oder organische Altanstriche sehr gut geeignet sind dagegen Solsilikat-, Dispersions- und Siliconharzfarbe. Dispersionssilikatfarbe ist gut geeignet [WTA-Merkblatt 2-12-2013]. Zur Pigmentierung und damit Farbgebung der modernen Systeme können kaum allgemeine Angaben gemacht werden. Zu betonen ist, dass die einzelnen Produkte nur im Rahmen der Herstellerangaben abgetönt werden dürfen.

Anforderungen

Für Anstriche auf Naturstein gelten die allgemeinen Anforderungen für Anstriche auf mineralischen Untergründen [WTA-Merkblatt 2-12-2013]. Im Besonderen sind das: Wasserdurchlässigkeit (Wasseraufnahme) nach [DIN EN 15801], Wasserdampf-Durchlässigkeit nach [DIN EN 15803], optischer Eindruck,

Reaktion mit dem Natursteinuntergrund, Möglichkeit der Lasurtechnik, Anforderungen an den Verarbeiter, Reversibilität (Denkmalpflege), Überarbeitbarkeit und Überstreichbarkeit [Brandes, 1999]. Hinweise zur Feststellung der originalen Farbe und Kontrolle des Neuanstrichs geben [Snethlage, Pfanner, 2013]. Das [WTA-Merkblatt 2-12-2013] widmet sich der Veränderung der optischen Eigenschaften im Verlaufe der Bewitterung. Ein bewitterter Anstrich und der Untergrund können von mikrobieller Besiedlung betroffen sein [Herm, Warscheid, 1995], [Warscheid, 2000], [Snethlage, Pfanner, 2013]. Der allgemeinen Forderung nach »Reversibilität« aus der Denkmalpflege begegnet die Diskussion bei [Brandes, 1999] mit der Prüfung der »Überarbeitbarkeit«. Der Einsatz von historischen Anstrichtechniken nach dem historischen Befund erscheint wegen der fraglichen Dauerhaftigkeit historischer Anstrichtechniken problematisch. Als Kompromiss biete sich an, die originale Farbigkeit mit moderner, witterungsbeständiger Beschichtung zu imitieren. Der Untergrund soll vor einer Beschichtung untersucht werden im Hinblick auf: Oberflächenfestigkeit, Schadsalzbelastung, Feuchtegehalt, aufsteigende Feuchtigkeit, Rauigkeit, Saugfähigkeit, Schmutz sowie Art und Tragfähigkeit der Altanstriche [Brandes, 1999].

Literatur und Quellen

- [Badga, 1990] Badga, E., (1990): Echte und weniger echte Siliconharzfarben. Farbe + Lack, 96, S. 934–938
- [Boué, 2000] Boué, A. (Hrsg.), (2000): Farbe in der Steinrestaurierung – Fassung und Schutz. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag
- [Brandes, 1999] Brandes, Ch., (1999): Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein – Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendung. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag
- [Brüggerhoff et al., 2005] Brüggerhoff, St., Ochwat, Ch., Seebach, J., (2005): Instandsetzung der Renaissance-Fassade des Lübecker Rathauses unter besonderer Berücksichtigung des Aspektes Farbfassung. In: Siegesmund, Siegfried et al. (Hrsg.): Stein – Zerfall und Konservierung, Edition Leipzig
- [Donath, 2005] Donath, G. (Hrsg.), (2005): Siliconharz-schlämme als Oberflächenschutz für Sandstein am Beispiel der St. Bennokirche in Meißen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag
- [Drewello, Herkner, 2009] Drewello, R., Herkner, S. (mit einem Beitrag von Dietemann, P., Baumer, U., Fiedler, I.) (2009): Zwischen Diagnose und Therapie: Der Wandel historischer Anstrichsysteme am Weltgerichtportal und Optionen der Erhaltung. In: Die Konservierung kalk- und ölgebundener, umweltgeschädigter Malschichten auf frei bewitterten Natursteinoberflächen am Beispiel des Weltgerichtsportals von Sankt Sebald in Nürnberg. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 25–45
- [Egloffstein, 2004] Egloffstein, P., (2004): Kalk – ein altes Anstrichsystem für morgen? Praxisbeispiele für beschichtete Fassadenflächen. In: Kalkmörtel und Kalkfarbe Gestern, heute und morgen? Mainz: Institut für Steinkonservierung e. V., S. 91–100

- [Hilbert, 2000] Hilbert, G., (2000): Farbfassung von Natursteinen im Siliconfarbsystem. In: Boué, 2000, S. 57–65
- [Herm, 1992] Herm, Ch., (1992): Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Anstrichen auf Naturstein. In: Snethlage, Rolf (Hrsg.): Jahresbericht aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung 2 (1990). Berlin, Verlag Ernst & Sohn, S. 169–177
- [Herm, 2000] Herm, Ch., (2000): Kalkfarbetechniken eine Literaturstudie. Arbeitsblätter für Restauratoren, 33, Nr. 2, Gr. 7, S. 153–168
- [Herm, Warscheid, 1995] Herm, Ch., Warscheid, T., (1995): Freibewitterung von Anstrichen auf Gotland-sandstein – Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Mikrobiologie. In: Snethlage, Rolf (Hrsg.): Jahresbericht aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung 3 (1993). Berlin, Verlag Ernst & Sohn S. 159–173
- [Heydrich, 1990] Heydrich, Ch., (1990): Die Wandmalereien Hans Bocks d. Ä. von 1608–611 am Basler Rathaus. Bern/Stuttgart: Haupt Verlag
- [Kaiser, 2000] Kaiser, E., (2000): Dünnschichtige Schlämmen auf originalen Oberflächen mit kieselsol-gebundenen Massen. In: Boué, 2000, S. 49–56
- [Keim, 1881] Keim, A. W., (1881): Die Mineralmalerei – Neues Verfahren zur Herstellung witterungsbeständiger Wandgemälde (Chemisch-Technische Bibliothek Bd. 78). Wien/Leipzig, Verlag A. Hartleben
- [Kiesewetter, 2000] Kiesewetter, A., (2000): Zur Farbfassung von Denkmalen aus Naturstein und Problemen ihrer Wiederherstellung. In: [Boué, 2000, S. 11–19]
- [Kiesewetter, 2009] Kiesewetter, A., (2009): Zur Konservierung und farblichen Aufhellung des Figurenschmucks am Dresdner Zwinger. In: Grassegger, Gabriele et al.: Natursteinsanierung Stuttgart 2009 Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 99–108
- [Koller, 1975] Koller, M., (1975): Architektur und Farbe – Probleme ihrer Geschichte, Untersuchung und Restaurierung. Maltechnik Restauo, 81, S. 177–198
- [Koller et al., 1998] Koller, M., Nimmrichter, J., Paschinger, H., Richard, H., (1998): Opferschichten in der Steinkonservierung – Theorie und Praxis. Restauratorenblätter, Wien, 17, S. 143–150
- [Kupfer, 1991] Kupfer, M., (1991): Untersuchungen zu den Farbfassungen der Sandsteinarchitektur und der Sandsteinskulpturen, zu den Farbschmierereien und dem Graffiti-Schutz. In: Arenhövel, Willmuth, Bothe, Rolf (Hrg.): Das Brandenburger Tor 1791–1991, Berlin, Verlag Willmuth Arenhövel, S. 184–185
- [Lenz, 2000] Lenz, H., (2000): Erfahrungen mit Farben in der Fassung und Lasur auf Stein. In: [Boué, 2000, S. 27–32]
- [Lewin, 1966] Lewin, S. Z., (1966): The Preservation of Natural Stone 1839–1965. Art and Archaeological Technical Abstracts, 6, S. 185–277
- [Möller, 1991] Möller, R., (1991): Oberflächengestaltungen auf Stein und Putz – Aspekte ihrer Bedeutung und Erhaltung bei Konservierungsmaßnahmen. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, 2, S. 67–77
- [Moormann, 1913] Moormann, Ch., (1913): Der Schutz von Sandstein gegen die Verwitterung. Zentralblatt Bauverwaltung, 33, S. 85–87
- [Nimmrichter, 2007] Nimmrichter, J., (2007): Evaluierungen von Konservierungsmaßnahmen an steinernen Denkmälern in Österreich. In: Diekamp, Anja (Hrsg.): Naturwissenschaft & Denkmalpflege, Innsbruck University Press, S. 245–262
- [Nimmrichter, Koller, 2000] Nimmrichter, J., Koller, M., (2000): Opferschichten auf Kalksandstein und Kalkstein – Langzeitperspektiven einer präventiven Konservierungsmethode. In: Weidinger, Wilhelm (Hrsg.): Turm Fassade Portal, Regensburg, Verlag Schnell und Steiner, S. 121–126
- [Ochs, 1911] Ochs, N., (1911): Der Anstrich von Bausteinen als Schutz gegen Verwitterung. Die Denkmalpflege, 13, S.18–19
- [Platzmann, 1929] Platzmann, C. R., (1929): Steinschutz und Steinkonservierung, Denkmalpflege und Heimatschutz, 31, S. 41–42
- [von Plehwe-Leisen, Leisen, 2005] von Plehwe-Leisen, E., Leisen, H., (2005): Die Erhaltung des Chorstrebenwerks am Dom zu Köln. In: [Donath, 2005, S. 54–59]
- [Rademacher, 2004] Rademacher, I., (2004): Die Sol-Silikat-Technologie. WTA-Journal, Nr. 2, S. 217–227
- [Rathgen, 1929] Rathgen, F., (1929): Steinschutz durch Leinöl und Wachs, Denkmalpflege und Heimatschutz, 31, S. 51–52
- [Rathgen, Koch, 1934] Rathgen, F., Koch, J., (1934): Verwitterung und Erhaltung von Werksteinen – Beiträge zur Frage der Steinschutzmittel. Verlag Zement und Beton, Berlin, S. 61–62
- [Schmidt, 1790] Schmidt, F. Ch., (1790): Von der Farbe oder dem äußerlichen Anstrich der Häuser Gotha

- (Kommentiert und mit einem Nachwort versehen von Urs Boeck). Deutsche Kunst und Denkmalpflege, 29 (1971), S. 35–40
- [Siedel, 2000] Siedel, H., (2000): Zur Problematik alter Ölfarbanstriche auf Sandstein. In: [Boué, 2000, S. 97–105]
- [Snethlage, Pfanner, 2013] Snethlage, R., Pfanner, M., (2013): Leitfaden Steinkonservierung (4.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [SPAB, 1926] Committee of the Society for the Protection of Ancient Buildings: Limewash as Stone Preservative, London, 1926
- [Stiftung Denkmalschutz Berlin] Stiftung Denkmalschutz Berlin: Das Brandenburger Tor.
URL: <http://www.stiftung-denkmalschutz-berlin.de/projekte/brandenburger-tor/> [30.04.2014]
- [Tucholski, 1929] Tucholski, R., (1929): Oelfabenanstrich auf Sandstein. Denkmalpflege und Heimatschutz, 31, S. 48
- [Ueblacker, 2006] Ueblacker, M., (2006): Die Kalkfassung des Doms in Passau – Schutz vor Romantik? *Schönere Heimat*, 95, Nr. 1, S. 19–25
- [Warscheid, 2000] Warscheid, T., (2000): Mikrobielle Probleme mit Farbe auf Stein. In: [Boué, 2000, S. 107–112]
- [Wendler, 2000] Wendler, E., (2000): Entwicklung und Eigenschaften moderner silikatgebundener Systeme. In: Boué, 2000, S. 41–48
- [Wihr, 1980] Wihr, R., (1980): Restaurierung von Steindenkmälern. München, Verlag Callwey, S. 168–180
- Der Autor bedankt sich herzlich bei folgenden Personen für die Überlassung von Materialien und Dokumentationen sowie Literaturhinweise: Dipl. Rest. (FH) Klaus Häfner, Dr. Arndt Kiesewetter, Mag. Johannes Nimmrichter, Dr. Ester von Plehwe-Leisen, Restauratorin Christiane Kern.

Grundlagen für Standsicherheitsnachweise an bestehendem Natursteinmauerwerk

Ein Bauwerk gilt als standsicher, wenn rechnerisch nachgewiesen werden kann, dass unter den maximal anzunehmenden Lasteinwirkungen weder das Tragwerk noch einzelne Bauteile versagen. Für Natursteinmauerwerk im Bestand ist dieser Nachweis oft schwierig zu führen. Die geltenden Mauerwerksnormen wurden für den Neubau entwickelt. Sie legen Materialkennwerte und Tragmodelle zugrunde, denen historische Baustoffe und Konstruktionsweisen nicht entsprechen. Es liegt in der Verantwortung des Tragwerksplaners, abweichende Randbedingungen zu erkennen und ein Nachweisverfahren zu wählen, mit dem Tragreserven sicher berechnet und Ertüchtigungsmaßnahmen zielgerichtet geplant werden können.

**Claudia Neuwald-Burg
Ralph Egermann**

Schlagwörter: Natursteinmauerwerk, Tragfähigkeit, Standsicherheit, Berechnungsverfahren, Schaden, Eurocode, Fugenbohrkernverfahren, Trockenmauerwerk, Mauerwerksfestigkeit

1 Notwendigkeit von Standsicherheitsnachweisen

Bei Gebäuden, in den sich sehr viele Menschen gleichzeitig aufhalten können bzw. an die hohe Schutzziele gerichtet sind, ist eine regelmäßige Überprüfung der Standsicherheit bauordnungsrechtlich vorgeschrieben. Bei allen übrigen Bauwerken liegt es im Ermessen und der Verantwortung des Eigentümers, eine Überprüfung vornehmen zu lassen. Ein Standsicherheitsnachweis an einem Bauwerk aus Natursteinmauerwerk wird nötig, wenn Zweifel an seiner Tragfähigkeit aufkommen, etwa weil Risse oder Verformungen sichtbar werden, Steine herabfallen oder Erosionserscheinungen festgestellt werden. Auch Umbau, Nutzungsänderung oder Veränderung der Einwirkungen auf das Bauwerk können eine rechnerische Überprüfung notwendig machen. Gebäude altern und mit dem Alter verändern sich auch die Baustoffeigenschaften. Diese Veränderungen müssen beim Nachweis besonders beachtet werden.

2 Tragwerksrelevante Zustandserfassung

Grundlage für eine zutreffende Tragfähigkeitsanalyse ist zunächst eine sorgfältige Zustandserfassung. Dabei werden alle Informationen über die Gebäudesituation, die Abmessungen, die Tragstruktur, die verwendeten Materialien und den Erhaltungszustand zusammengetragen. Potentiell schädliche Einwirkungen werden ebenfalls aufgenommen. Wie detailliert die Erfassung erfolgen muss, hängt von den Untersuchungszielen und dem jeweiligen Befund ab. Die ersten Untersuchungsschritte sind bei Bauwerken aus Naturstein ähnlich. Zunächst wird in einer Sichtprüfung das Gesamtsystem nach Abrissen von Gebäudeteilen, fehlenden Aussteifungen und ähnlichen Schäden mit Einfluss auf die Stabilität des Tragsystems abgesehen. Risikoträchtige Tragelemente sind z. B. schlanke Pfeiler und Bögen, bei denen sich ein plötzliches Versagen ohne Vorankündigung einstellen kann. Liegen sichtbare Schäden wie Verwitte-

rungs- und Zerfallserscheinungen vor, so ist ihr aktueller und zukünftiger Einfluss auf die Standsicherheit zu bewerten. Je nach Art und Schwere der Schäden ist dann zu entscheiden, ob quantitative Untersuchungen notwendig werden oder ob eine qualitative Bewertung ausreicht. Eine Schadensanalyse ist zwingend, wenngleich die Schadensursachen an alten Bauwerken aufgrund ihrer Komplexität nicht immer leicht zu klären sind.

3 Schadensaufnahme und Bewertung

Bei der Schadensaufnahme werden alle tragenden Bauteile auf Verformungen, Risse, Feuchteschäden, Ausblühungen etc. inspiziert. Verfahren zur Analyse von Mauerwerkschäden beschreibt das WTA-Merkblatt *Mauerwerksdiagnostik*, das zurzeit neu überarbeitet wird [WTA 4-5-99]. Tragwerkrelevante Schäden an einschaligem Mauerwerk lassen sich oft bereits mit einfachsten Mitteln feststellen. Das Auffinden verdeckter Schäden z. B. in dicken Bauteilquerschnitten und/oder mehrschaligen Konstruktionen ist mit Hilfe der in Kap. I (Patitz, S. 33) beschriebenen zerstörungsarmen Verfahren möglich.

3.1 Verformungen und Materialalterung

Verformungen und Querschnittsveränderungen müssen im Tragmodell berücksichtigt werden. Typische statisch relevante Schäden an Bauteilen aus Natursteinmauerwerk sind Schiefstellungen, Risse, Ausbauchungen sowie Erosionserscheinungen. Bestimmte Schäden sind konstruktionsbedingt bei Gebäuden einer bestimmten Stilepoche anzutreffen. Andere werden durch Lasteinwirkung oder durch Materialalterung hervorgerufen. Bindemittelverlust von Steinen und Mörteln, Gefügezerstörung durch Kristallisation von Salzen, Frost-Tau-Wechsel und thermische Spannungen sind die am häufigsten anzutreffenden festigkeitsmindernden Ursachen. Bei statisch hoch ausgenutzten Bauteilen kann zusätzlich Materialermüdung auftreten.

3.2 Risse

Mauerwerkrisse reduzieren die Dichtigkeit von Bauteiloberflächen und verändern das Tragsystem. Um ihren Einfluss auf das Tragverhalten und letztlich die Tragsicherheit zu untersuchen, wird bei komplexem Rissbild eine Risskartierung erstellt, aus der die Verteilung und der Verlauf der Risse hervorgehen. Aufgenommen werden die Rissbreite, die Risstiefe und der Rissuferversatz parallel oder senkrecht zur Bauteiloberfläche und ggf. auch das Rissalter. Letzteres ist in manchen Fällen an datierten Rissmarken ablesbar oder anhand alter Bauaufnahmen oder Fotos herzuleiten. Eine Prognose über das zukünftige Rissverhalten ist entweder über die Klärung der Schadensursache oder über zyklische Rissweitenmessungen möglich.

4 Materialkennwerte

Für die statische Berechnung werden Festigkeits- und Verformungskennwerte von Mauerwerk benötigt. Sie können experimentell direkt an Mauerwerkprüfkörpern ermittelt werden oder indirekt über die Materialeigenschaften der Komponenten Stein und Mörtel. Die wichtigsten Kennwerte sind dabei die Stein- und Mörteldruckfestigkeit. Für eine wirklichkeitsnahe Mauerwerksberechnung sind weitere Kennwerte relevant, wie die Steinzugfestigkeit, der E-Modul und die Querdehnzahlen. Diese sind aufwändig zu ermitteln und werden daher in der Regel nur abgeschätzt.

Die meisten Baustoffkennwerte sind technische Kenngrößen, deren Betrag von den Prüfbedingungen abhängt. Einflussgrößen sind Form, Größe und Gestalt der Prüfkörper, die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) und die Prüfeinrichtung (Belastungsvorrichtung, Lasteinleitung, Belastungsgeschwindigkeit). Die Materialprüfung ist deshalb in Normen geregelt. Für die Druckfestigkeit von Naturstein im Mauerwerksbau gilt DIN EN 771-6. DIN EN 18555-9 enthält Verfahren zur Druckfestigkeitsbestimmung von Mörtelproben aus der Lagerfuge. Normgerechte Prüfkörper lassen sich aus Fugen im Bestand nur mit großem Aufwand gewinnen. Die Mörteldruckfestigkeit wird deshalb meistens nur geschätzt. Bei der Prüfung

von Proben aus dem Bestand sind Abweichungen von den gültigen Normen unvermeidbar. Im Prüfbericht sind diese aufzuführen und zu begründen. Der Tragwerksplaner muss sich über den Aussagewert einer solchen nicht-Norm-gerechten Untersuchung im Klaren sein.

4.1 Bestimmung der Steindruckfestigkeit

Anders als bei der Baustoffprüfung üblich, erfolgt die Probennahme von Werksteinen aus bestehendem Mauerwerk nicht nach dem Zufallsprinzip, sondern an subjektiv ausgewählten, repräsentativen Stellen. Ausnahmen bilden Massenaubauwerke unter hoher statischer Belastung wie beispielsweise Brücken oder Staudämme, bei denen ein hoher Stichprobenumfang unabdingbar ist. Filigrane Bauteile müssen möglichst substanzschonend beprobt werden. Normalerweise werden aus Naturwerksteinen Bohrkern mit Durchmessern von 50, 70 oder 100 mm entnommen. Der erforderliche Durchmesser richtet sich nach der Homogenität des Gefüges. Er sollte das 5-fache der größten Inhomogenität (Einschlüsse, Lunker) betragen. Nach DIN EN 771-6 sind für eine Festigkeitsprüfung von Mauersteinen zehn Proben nötig. Diese Anzahl ist an denkmalgeschützten Bauwerken oft nicht realisierbar. Mindestens drei, besser fünf Proben aus unterschiedlichen Steinen sind für eine Auswertung allerdings erforderlich. Vergleichswerte an bruchfrischen Steinen, die z. B. in der Online-Datenbank des Deutschen Naturstein-Archivs (vgl. Hornauer, S. 289) verfügbar sind, ermöglichen bei geringer Probenanzahl eine Plausibilitätskontrolle [Steinzentrum, 2012]. Mit entsprechender Erfahrung kann die Repräsentanz einer Probe auch am Bruchverhalten im Druckversuch erkannt werden. Die Steindruckfestigkeit wird aus den Einzelwerten der Druckprüfung nach Umrechnung auf den Normprüfkörper als mittlere Druckfestigkeit und als charakteristische Druckfestigkeit angegeben. Maßgebend für den Tragfähigkeitsnachweis ist das 5%-Quantil der Steindruckfestigkeit bei 95%iger Aussagewahrscheinlichkeit. So soll sichergestellt sein, dass höchstens 5% einer (theoretisch unendlichen) Anzahl von Versuchskörpern die angenommenen Festigkeitswerte unterschreiten. Berechnet werden charak-

Tabelle 1

k(n)-Werte zur Bestimmung charakteristischer Werte (5%-Quantil bei 95% Aussagesicherheit) bei normalverteilten Versuchsergebnissen nach DIN EN 1990 Tabelle D.1

Prüfkörperanzahl n	1	2	3	4	5	6	8	10
k(n)	–	–	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92

teristische Festigkeitswerte f in Abhängigkeit von der Prüfkörperanzahl n nach der Formel

$$f = e \cdot (\mu - k(n) \cdot \sigma)$$

aus dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ der logarithmierten Versuchsergebnisse sowie dem Faktor $k(n)$ für das verlangte Vertrauensniveau $\alpha = 95\%$ (Tabelle 1).

4.2 Abschätzung des E-Moduls

Für Stabilitäts- und Riss sicherheitsnachweise wird der statische Druck-E-Modul des Mauerwerks benötigt, der aufgrund des nichtlinearen Verhaltens als Sekantenmodul definiert ist. Im Vergleich zum modernen Verbundwerkstoff Mauerwerk bestehen bei historischem Natursteinmauerwerk große Steifigkeitsunterschiede zwischen den Steinen und den Mörteln. Der E-Modul ist bei Bruchsteinmauerwerk aus kleinformatischen Steinen mit dicken Fugen daher niedriger, bei großquadrigem Mauerwerk deutlich höher als der sich nach der Norm aus der charakteristischen Druckfestigkeit ergebende Wert (DIN EN 1996 1-1, Abschnitt 3.7.2). Für genauere Analysen empfiehlt es sich deshalb, die E-Moduln der Mauersteine und wenn möglich auch der Mörtel experimentell zu bestimmen und den Mauerwerks-E-Modul nach einem Phasenmodell aus den Volumenanteilen von Stein und Mörtel abzuschätzen [Neuwaldburg, Pfeifer, 2012]. Für nichtlineare numerische Berechnungen komplexer Strukturen aus Natursteinmauerwerk sollten vollständige Spannungs-Dehnungslinien vorliegen. In Sonderfällen ist auch der steifigkeitsmindernde Kriech Einfluss zu berücksichtigen.

4.3 Haftscherfestigkeit von Mauerwerk

Die Haftscherfestigkeit zwischen Mauerstein und Mörtel ist das Maß für die Verbundfestigkeit von

Mauerwerk und hängt wesentlich von der Mörtelart, vom Mauerstein und von der Ausführung ab. Für den Nachweis auf Schub und auf Biegung wird sie normalerweise anhand festgelegter Werte nach Tabelle NA.11 der DIN EN 1996-1-1/NA angesetzt. Die Tabelle enthält keine Werte für Mörtel mit einer Festigkeit unter $2,5 \text{ N/mm}^2$, sodass für ggf. dort angesiedelte historische Mörtel im Bedarfsfall eine experimentelle Überprüfung notwendig werden kann.

5 Nachweiskonzepte für einschaliges Natursteinmauerwerk

Der Nachweis der Tragfähigkeit ist rechnerisch zu führen. Eine qualitative Aussage kann diesen nur dann ersetzen, wenn keine Schäden sichtbar sind, keine Nutzungsänderung vorgesehen ist und an ähnlichen Gebäuden ausreichend gute Erfahrungen vorliegen oder wenn das Risiko im Versagensfall hinnehmbar ist (selten). Ein Bauwerk gilt als stand-sicher, wenn die Stabilität des Gesamtbauwerks gewährleistet ist und alle mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit eintretenden Beanspruchungen die Tragfähigkeit der einzelnen Bauteile mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten. Die rechnerische Tragfähigkeitsermittlung erfolgt anhand von Modellen für die Einwirkungen, das Tragwerk und die Materialien. Die Modelle basieren auf den Vorgaben der gültigen Normen.

Während die Schweiz mit der SIA 269/6-1: 2011 eine eigenständige Norm zum Nachweis von Bestandsbauten aus Natursteinmauerwerk besitzt, gibt es in Deutschland keine baurechtlich eingeführten Normen für diese Aufgabe. Grundlage für die Nachweisführung war hier bislang die DIN 1053-1. Diese nationale Norm wird in naher Zukunft durch die bereits eingeführte Europäische Mauerwerksnorm DIN EN 1996-1-1/NA Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – ersetzt. Natursteinmauerwerk wird im Nationalen Anhang dieser Norm, dem NA.L: Konstruktion, Ausführung und Bemessung von Mauerwerk aus Natursteinen – behandelt. Anforderungen an die Qualität der Mauersteine und die

Mörteleigenschaften schränken die Anwendung auf Bestandsmauerwerk jedoch sehr stark ein. Mit dem Wechsel vom globalen zum Teilsicherheitskonzept kann derzeit bei Bestandsbauten aufgrund unzureichender Parameterangaben das Sicherheitsniveau nur unzutreffend ermittelt werden, weshalb im Grenzfall eine Nachweisführung nach beiden Konzepten angeraten ist.

5.1 Nachweis nach DIN EN 1996

Der Bezug ist auf den Nachweis der Tragfähigkeit bei zentrischer Druckbeanspruchung gerichtet. Allgemein gilt die Tragfähigkeit eines Bauteils als erbracht, wenn an der ungünstigsten Querschnittsfläche nachgewiesen wird, dass der Bemessungswert N_{Ed} der einwirkenden Normalkraft kleiner ist als der Bemessungswert N_{Rd} der aufnehmbaren Normalkraft (Tragwiderstand).

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$\text{mit } N_{Rd} = \phi \cdot A \cdot f_d \text{ und } f_d = \frac{\zeta \cdot f_k}{\gamma_M}$$

Dabei ist

- ϕ ein Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Schlankheit,
- A die Bruttoquerschnittsfläche des Bauteils,
- f_d der Bemessungswert der Mauerwerkdruckfestigkeit,
- ζ ein Faktor zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen ($\zeta = 0,85$),
- f_k die charakteristische Druckfestigkeit und
- γ_M der Teilsicherheitsbeiwert für Mauerwerk im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

γ_M hat für Mauerwerk aus Naturwerksteinen gemäß DIN EN 771-6 und Mörtel nach Eignungsprüfung den Wert 1,5 für ständige und häufige Einwirkungen und 1,3 für außergewöhnliche Beanspruchungen. Im Bestand entsprechen Material und Ausführung selten den heute geltenden technischen Regeln. Der Planer muss in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Schadensanalyse sinnvolle Sicherheitsbeiwerte ermitteln und erforderlichenfalls mit der Bauaufsichtsbehörde absprechen. Fehlendes Überbindemaß, ungünstige Steinformate und hohe Streuungen der Materialkennwerte

Tabelle 2 Teil 1

Anforderung an Verbandsarten: Tabelle NA.L.1 aus DIN EN 1996

Mauerwerksverbände		Polygonale Mauerwerksverbände		
Kriterien		Findlingsmauerwerk	Bruchstein-Zyklopenmauerwerk	Zyklopenmauerwerk
1. Güteklasse ^a		—	N1	
2. Steinform		rundlich	polyedrisch	polyedrisch
3. Steinbearbeitung	3.1 Bearbeitung	keine – gering	bruchrauh	hammerrecht
	3.2 Dicke ^b der Lagerfuge d _L	—		≤ 30 mm
	3.3 Verhältnis der Lagerfugendicke d _L zur Steinlänge l _u	—	≤ 25 mm	≤ 20 mm
4. Verband und Fugenverlauf	4.1 Übertragungsfaktor η _t	—	≥ 0,5	≥ 0,5
	4.2 Fugenneigung α _L	—	—	—
	4.3 Fugenverlauf, Stein- und Schichthöhen	wilder Polygonalverband (opus incertum)		—
		—		Polygonalverband (opus antiquum)
		keine differenzierbaren Lager- und Stoßfugen		

^a Diese Güteklassen stellen Grundeinstufungen dar. Je nach Ausführung (insbesondere Steinform, Verband und Fugenausbildung) sind in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen auch abweichende Güteklasseneinstufungen möglich.

^b Gilt auch für tragendes Mauerwerk aus maßgerechten Steinen der Toleranzklassen D1 bis D3 nach DIN EN 771-6:2011-07, Tabelle 1.

Tabelle 2 Teil 2

Anforderung an Verbandsarten: Tabelle NA.L.1 aus DIN EN 1996

Mauerwerksverbände		Orthogonale Mauerwerksverbände			
Kriterien		Bruchstein-Schichtenmauerwerk	Schichtenmauerwerk		Quadermauerwerk
1.		N1	N2	N3	N4 (b)
2.		quaderförmig bis annähernd wildförmig polyedrisch	quader- bis annähernd quaderförmig	quaderförmig	quaderförmig
3.	3.1	bruchrauh	hammerrecht, min. 120 mm Tiefe	bearbeitet min. 150 mm Tiefe	maßgerecht auf ganzer Tiefe
	3.2	—	≤ 30 mm	≤ 30 mm	nach Maß ≤ 20 mm
	3.3	≤ 25	≤ 20	≤ 13	≤ 0,07
4.	4.1	≥ 0,5	≥ 0,65	≥ 0,75	≥ 0,8
	4.2	tanα ≤ 0,30	tanα ≤ 0,15	tanα ≤ 0,10	tanα ≤ 0,05
	4.3	unregelmäßiges Schichtenmauerwerk mit versetzten Lagerfugen und wechselnden Stein- und Schichthöhen			
		—	regelmäßiges Schichtenmauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen und wechselnden Schichthöhen		
		—		regelmäßiges Schichtenmauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen und konstanten Schichthöhen	



Bruchstein-Zyklopenmauerwerk N1



Bruchstein-Schichtenmauerwerk N1



Angabe der Güteklasse erst nach Untersuchung der Lagerflächen möglich

Bild 1

Einordnung von Mauerwerksverbänden in Güteklassen

können durch einen höheren Sicherheitsbeiwert kompensiert werden. Eine zutreffende Abschätzung wird aber nur erreicht, wenn auch die traglaststeigernden Randbedingungen berücksichtigt werden. Bauteilquerschnitte historischer Gebäude gestatten z. B. oft Lastumlagerungen, die bei schlanken modernen Wänden ausgeschlossen sind.

Charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit

Anhand des Mauerverbandes, der charakteristischen Steindruckfestigkeit und der Mörtelgruppe kann die charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit aus Tabelle NA.L.2 der DIN EN 1996-1-1 entnommen werden. Wie schon in DIN 1053 wird der Verband über Güteklassen berücksichtigt (Bild 1) (Tab.NA.L.1). Die Einteilung erfolgt unabhängig von den Sichtflächen nach geometrischen Parametern

im inneren Mauerquerschnitt: dem Verhältnis der Fugendicke zur Steinlänge, der Bearbeitungstiefe der Lagerfugen, der Neigung der Lagerfuge gegenüber der Horizontalen ($\tan\alpha$) und dem sogenannten Übertragungsfaktor η . Dieser im Bestand unzureichend bestimmbare Wert gibt das Verhältnis der »Überlappungsfläche« der Mauersteine am Gesamtquerschnitt im Grundriss an (Tabelle 2).

DIN EN 1996 enthält keine Angaben zur Festigkeit verschiedener Natursteinarten. Es ist Aufgabe des Planers, die charakteristische Steindruckfestigkeit konkret für das jeweilige Objekt zu ermitteln.

5.2 Nachweis mit Bruchmodellen

Die Festigkeitswerte aus Tabelle NA.L.2 enthalten sehr hohe Sicherheitsabstände, weil eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Materialien und Füge- tech-

Tabelle 3

Druckfestigkeit von Natursteinmauerwerk nach DIN EN 1996-1-1 Tabelle NA.L.2

Güteklasse	Stein- festigkeit ^b	Werte der Druckfestigkeit f_k^a in N/mm ² in Abhängigkeit von den Mörtelgruppen nach DIN V 18580			
	f_{bk}	NM I	NM II	NM II	NM III
N1	≥ 20	0,6	1,4	2,2	3,3
	≥ 50	0,8	1,7	2,5	3,9
N2	≥ 20	1,1	2,5	3,9	5,0
	≥ 50	1,7	3,0	4,4	5,5
N3	≥ 20	1,4	4,2	5,5	6,9
	≥ 50	1,9	5,5	6,9	9,7
	≥ 100	2,8	6,9	8,3	11,1
N4	≥ 20	3,3	5,5	6,9	8,3
	≥ 50	5,5	9,7	11,1	13,9
	≥ 100	8,3	12,5	15,2	19,4

^a Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

^b 5 %-Quantil der Druckfestigkeit bei 95 % Aussagewahrscheinlichkeit

niken berücksichtigt werden (Tabelle 3). In der Praxis kann es daher vorkommen, dass nicht einmal für den Lastfall »ständige Last« eine ausreichende Tragsicherheit nachgewiesen werden kann, obwohl das Bauteil offenbar zufriedenstellend allen einwirkenden Belastungen standhält. Die Tragsicherheiten sollten dann über Bruchmodelle ermittelt werden, in die die Materialeigenschaften der vorhandenen Baustoffe direkt einfließen [Sabha, Pöschel, 1996], [Huster, 2000].

5.3 Verfahren der Fugenbohrkerne

Die Mauerwerkfestigkeit kann aber auch unmittelbar experimentell bestimmt werden. Durch das mittige Überbohren der Lagerfuge werden zerstörungssarm Fugenbohrkerne ($d \approx 100$ mm) gewonnen. Das Verhältnis der Spaltzugfestigkeit der Fugenbohrkerne zur Spaltzugfestigkeit der Mauersteine korreliert mit dem Verhältnis der Mauerwerks- zur Steindruckfestigkeit [Wenzel, Kleinmanns, 2000]. Die Mauerwerksfestigkeit kann so unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Mörtleigenschaften sowie der Stein- und Fugen geometrien bestimmt werden (Bild 2).

5.4 Probelastungen

An gemauerten Bauteilen, bei denen zufriedenstellende Nachweise mit den genannten Methoden nicht zu führen sind, können Probelastungen durchgeführt werden. Dazu sind über Gewichte oder über hydraulische Pressen schrittweise definierte Lasten aufzubringen. Die dabei auftretenden Verformungen werden gemessen und rechnerisch analysiert [Steffens, Toralf, 2009]. Eine Richtlinie für Belastungsversuche an Mauerwerk gibt es nicht, weswegen eine Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie: 2000-09 Belastungsversuche an Betonbauwerken – möglich ist [DAfStb, 2000].

6 Mehrschaliges Mauerwerk

Mehrschalig sind Mauern, bei denen im Verband gemauerte Außenschalen die Sichtflächen bilden, während das Mauerwerk dazwischen aus andersartigen Materialien und Steinformaten geschichtet,

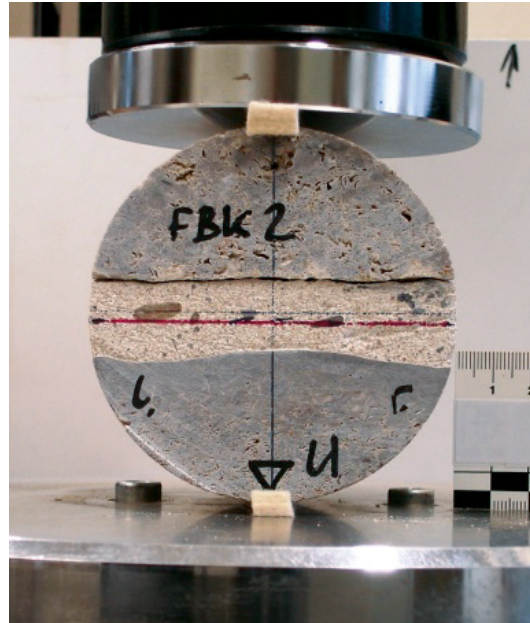


Bild 2
Fugenbohrkern im
Spaltzugversuch

geschüttet oder trocken gemauert wurde. Der Wandaufbau ist am äußeren Mauerverband nicht ablesbar. Er kann großflächig mit dem Radarverfahren (vgl. Kapitel I, Patitz, S. 33) zerstörungssarm erkundet werden, wobei eine lokale Verifizierung über Endoskopie oder Kernbohrung stets angeraten ist. Bei der Bewertung der Tragfähigkeit ist abhängig vom Spannungsniveau und Erhaltungszustand zwischen den grundlegenden Zuständen intakt und gestört zu unterscheiden. Die Zuordnung erfolgt über folgende Kriterien:

- Der Verbund von Außenschalen und Zwischenschicht ist intakt (festzustellen durch Erkundungsbohrungen bzw. Radaruntersuchung).
- Die Steine der Außenschalen zeigen keine lastbedingten Schäden wie Risse oder Abplatzungen (Untersuchung nach Augenschein).
- Die Mörtelfugen sind weder stark gequetscht noch klaffend (Untersuchung nach Augenschein).
- An den Außenschalen sind weder Schiefstellungen noch Krümmungen messbar (Untersuchung durch Ablotungen oder geodätische Messungen).

Sind diese Kriterien erfüllt, wird das Mauerwerk als intakt klassifiziert. Ein rechnerischer Tragfähigkeitsnachweis ist möglich [Egermann, 1995].

Sind die Kriterien nicht erfüllt, ist das Mauerwerk gestört, und es besteht dringender Handlungs-

bedarf: Es ist die Standfestigkeit der Zwischenschicht wiederherzustellen, um ein Versagen der Außenschalen zu verhindern. Biegeeweiche Außenschalen kündigen ihr Versagen durch Ausbauchungen an, während bei sehr steifen Außenschalen die Gefahr eines plötzlichen Versagens ohne Vorankündigung besteht.

7 Trockenmauerwerk

Trockenmauern werden vorwiegend als Schwergewichtsmauern zur Geländeabfangung eingesetzt. In historischen Gebäuden sind ebenfalls Fundamente häufig in Trockenmauerwerk ausgeführt worden, und regional kommen Trockenmauern

auch bei einfachen Wohnhäusern und landwirtschaftlichen Gebäuden vor. Auch die Zwischenschicht mehrschaliger Wände wurde mitunter trocken geschichtet. Nach DIN EN 1996 NA. L.4.5 ist Mauerwerk ohne Mörtel für tragende Bauteile nicht zulässig. Zum Nachweis von Schwergewichtsmauern darf maximal 75 % des Rohgewichts der Mauersteine angesetzt werden. Detailliertere Empfehlungen zur Bewertung von Trockenmauerwerk hat die Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, FLL 2013, herausgegeben. Das Trockenmauerwerk wird in Anlehnung an die Mauerwerksnorm nach dem Verband und dem Bearbeitungsgrad der Mauersteine klassifiziert und in Güteklassen eingeteilt. Es ist damit eine differenzierte Bewertung möglich.

Literatur und Quellen

- [Huster, 2000] Huster, U., (2014): Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbelastung: Entwicklung und Anwendung eines Finite Elemente Programmes. Diss. Universität Gh Kassel, kassel univ. press, 2000
URL: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-933146-34-2.volltext.frei.pdf>
[Stand 04.07.2014]
- [Neuwald-Burg, Pfeifer, 2012] Neuwald-Burg, C., Pfeifer, M., (2012): Problems in the assessment of the stress-strain-relationship of masonry. In: Válek, J., Hughes, J. J., Groot, C.: Historic mortars; characterisation, assessment and repair. Rilem Bookseries Vol 7, New York, London, S. 343–357
- [Sabha, Pöschel, 1996] Sabha, A., Pöschel, G., (2003): Ein theoretisches Modell zum Tragverhalten von Elbsandsteinmauerwerk. In: Wenzel, F. (Hrsg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahrbuch 1993 des SFB 315, Karlsruhe, S. 111–118
- [Wenzel, Kleinmanns, 2000] Wenzel, F., Kleinmanns, J. (Hrsg.), (1995): Historisches Mauerwerk, Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen. Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Empfehlungen für die Praxis, Karlsruhe
- [Egermann, 1995] Egermann, R., (1995): Tragverhalten mehrschaliger Mauerwerkskonstruktionen. In: Aus Forschung und Lehre, Institut für Tragkonstruktionen, Heft 29, Karlsruhe
- [Steinzentrum, 2012] Steinzentrum Wunsiedel: Datenbank des Deutschen Naturstein Archivs am Steinzentrum in Wunsiedel.
URL: <http://www.efbz.de> [Stand : 04.07.2014]
- [Steffens, Toralf, 2009] Steffens, K., Toralf, B., (2009): Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk, Teil 7: Experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit von Mauerwerk – Belastungsversuche an Mauerwerksbauten in situ. In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk-kalender 2009, Berlin, S. 243–270.

Ingenieurtechnische Sicherung von Natursteinmauerwerk

Ralph Egermann

Ingenieurtechnische Sicherungen werden dann notwendig, wenn sich für gemauerte Strukturen keine ausreichende Standsicherheit und damit meist einhergehend keine ausreichende Verkehrssicherheit mehr nachweisen lassen. Aufgrund der großen Vielfalt von Mauerwerkskonstruktionen, aufgrund der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen und den damit verbundenen Schadensbildern, aber auch aufgrund der unterschiedlichen Wertvorstellungen über den Baubestand ist es notwendig, die Ausführungen zur ingenieurtechnischen Sicherung thematisch einzugrenzen. Diese Beschränkung findet dahingehend statt, dass hier nur Methoden beschrieben werden, deren Tauglichkeit über Zeiträume von meist mehr als zwanzig Jahren im denkmalgeschützten Bestand nachgewiesen werden konnte und die als behutsam gelten. Die Methoden können auch auf gemauerte Konstruktionen aus künstlichen Steinen angewandt werden, sofern die Einflussparameter den anderen Steineigenschaften und der anderen Fügechnik angepasst werden [Wenzel, Kleinmanns, 2000].

Schlagwörter: Abdichten, Verfugen, Verpressbohrungen, Ankerbohrungen, Verpressen, Injizieren, Verpressanker, Vernadeln, Injektionsanker, Spiralanker, Vorspannen

1 Ingenieurtechnische Sicherungsmethoden

Mit den dargestellten Methoden soll erreicht werden, eine denkmalgeschützte Mauerwerkskonstruktion vor dem bereits eingesetzten Zerfall zu bewahren oder sie für neue Aufgaben zu ertüchtigen. Dadurch wird sie vor dem Abriss bzw. Austausch geschützt. In denkmalpflegerischer Hinsicht bedeutet dies, dass der Tragwerksplaner durch die von ihm als notwendig erachteten Instandsetzungs- bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen die geschichtliche Entwicklung der Konstruktion umformt [Eckert, Wenzel, Kleinmanns, 2000]. Damit wird dem planenden Ingenieur eine hohe Verantwortung auferlegt, was sich in seinem Planungsaufwand niederschlägt. Er hat seine Lösungen auf deren Notwendigkeit, deren Effektivität und deren Dauerhaftigkeit zu hinterfragen und zu prüfen.

Die Sicherungsmethoden werden in der Reihenfolge, in der sie in der Praxis durchgeführt werden, behandelt:

- Abdichten, Verfugen,
- Verpressbohrungen (Injektionsbohrungen),
- Verpressen (Injizieren),
- Ankerbohrungen,

- Einbau von Verpressankern (Vernadeln),
- Vorspannen.

Die jeweiligen Kapitel behandeln den Zweck und die Voraussetzungen, und es wird eine kurze Verfahrensbeschreibung gegeben, bei der jeweils auch auf die empfohlenen Baustoffe eingegangen wird. Für die Dimensionierung der Anker und ihrer Verankerungen werden Bemessungshinweise gegeben.

2 Abdichten, Verfugen

Zweck des Abdichtens und Verfugens ist es, keine Verunreinigungen auf Wandoberflächen zu bekommen, wenn Bohrungen mit Wasser gekühlt werden oder wenn das Mauerwerk mit einer Suspension verpresst wird. Das Abdichten ist somit für den Bauzustand von Bedeutung.

Das Abdichten muss dann vorgenommen werden, wenn die Gefahr besteht, dass im Bauzustand neu eingebrachte Flüssigkeiten aus dem Mauerwerk austreten können. Undichte Stellen können dabei Risse im Mauerwerk oder offenen Fugen sein. Verputztes Mauerwerk besitzt i. d. R. eine ausreichende

de Dichtigkeit gegenüber dem Austreten von Suspensionen. Der Putz muss jedoch vor dem Bohren und/oder Injizieren auf Hohllagen überprüft werden. Sollten diese gefunden werden, muss darüber gemeinsam mit der zuständigen Denkmalbehörde und ggf. dem Putzrestaurator befunden werden, ob der Putz örtlich abgenommen werden darf oder ober er so gesichert werden muss, dass ein Bohren und Injizieren gefahrlos durchgeführt werden kann. Eine Analyse von Putz und Fugmörtel ist ebenfalls angeraten, um rechtzeitig möglichen Unverträglichkeiten zwischen den vorhandenen und neu einzubringenden Baustoffen entgegen zu wirken und vor allem die neuen Baustoffe auf die vorhandenen abzustimmen.

Risse im Mauerwerk sind bis auf das 2–3fache ihrer Breite auszuräumen. Dies erfolgt entweder von Hand, mit leichten Stemmhämmern, mit Pressluft oder mit Hochdruckwasserstrahl. Da bei dem zuletzt genannten Verfahren zusätzlich Feuchtigkeit in das Mauerwerk eingebracht wird, muss dessen Einsatz im Hinblick auf die Bauwerksverträglichkeit besonders geprüft werden.

Wenn bei unverputztem Mauerwerk offene Fugen als undichte Stellen identifiziert werden, müssen diese ebenfalls geschlossen werden, allerdings nicht nur aus Gründen der Abdichtung im Bauzustand sondern auch aus statisch-konstruktiven Gründen: den Fugen wird im Mauerwerksbau lastabtragende Funktion zugewiesen, so dass der Art der Nachverfugung eine hohe Bedeutung zukommt. Beim Ausräumen muss darauf geachtet werden, dass auch im Bauzustand ausreichend lastübertragende Fugenfläche stehen bleibt und lose Steine vorgesichert werden. Bei einem unregelmäßigen Fugenverlauf wie bei Bruchstein- oder unregelmäßigem Schichtenmauerwerk muss das Werkzeug für das Ausräumen darauf abgestimmt werden, dass die vorhandene Struktur möglichst unverändert bleibt.

Risse werden zunächst nur oberflächlich abgedichtet. Je nach Wert der gerissenen Wandoberfläche wird diese Abdichtung entweder ein Putzrestaurator oder ein mit dem Umgang historischer Bausubstanz erfahrener Handwerksbetrieb ausführen. Ob die Abdichtung bereits das Finish der Oberfläche darstellt oder ob diese später noch überputzt oder

überfugt wird, ist im Einzelfall zu entscheiden. Bei besonders wertvollen Putzoberflächen können Restauratoren Abdichtungen vornehmen, die nur für eine kurze Zeit ihre Wirkung behalten, bevor sie sich dann rückstandsfrei wieder auflösen [Egermann, 2009].

Für das Abdichten von Fugen und damit für das Nachverfugen können drei Verfahren zur Anwendung kommen: die Handverfugung, das Trockenspritzverfahren und die Maschinenverfugung.

Bei der *Handverfugung* ist eine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten am besten möglich. Von der Tiefe heraus wird die Verfugung mit einem geeigneten Mörtel vorgenommen. Provisorische Abdichtungen werden mit Flachsschwingwerk ausgeführt.

Beim *Trockenspritzverfahren* werden das Bindemittel und Wasser über getrennte Düsen in der Luft gemischt und treffen auf den zu verfugenden Bereich auf. Bei diesem Verfahren, das sich schon allein aus wirtschaftlichen Gründen insbesondere für das Verfugen großer Wandflächen wie z. B. Stützmauern anbietet, wurden in der Tiefe von Fugen schlechte Durchmischungen beobachtet. Ferner entstehen zwangsläufig Verunreinigungen der benachbarten Oberflächen, so dass, wenn die Oberflächen nicht vorab entsprechend durch einen Lehmantrag o. ä. geschützt waren, zu diesem Verfahren noch eine entsprechende Reinigung hinzugezählt werden muss. Diese Reinigung erfolgt i. d. R. mechanisch durch Strahlen mit einem entsprechend auf die Stein- und Mörteloberflächen abgestimmten Strahlgut (Bild 1). Durch die mechanische Reinigung kommt es je nach Strahlgut zu einem mehr oder weniger Aufrauen der Steinoberflächen, was zukünftig zu schnelleren Verschmutzungen und damit zu schnelleren Verfärbungen führen kann.

Bei der *Maschinenverfugung* erfolgt die Mörtelförderung zur Fuge maschinell. Der Einbau selber wird händisch oder von der Tiefe heraus über Lanzen vorgenommen. Schneckenpressen fördern die meist vorkonfektionierten, kunststoffvergüteten Mörtel an die Einbaustelle.

Ein Vornässen ist je nach Wasseranspruch des Bindemittels ebenso erforderlich wie eine Nachbe-

handlung. Durch sie werden die Mörtel über eine gewisse Zeit feucht gehalten, um Schwindrisse, die der gewünschten Abdichtung entgegenwirken würden, zu vermeiden. Das Aufbringen von feuchten Jutesäcken hat sich als eine einfache Methode zur Verhinderung zu schneller Austrocknung bewährt.

Die Ausbildung der Fugen und damit das optische Erscheinungsbild sind zum einen in der Ausschreibung darzustellen, zum anderen zu Beginn der Ausführungsarbeiten über Musterflächen zu verifizieren. Fugen können vertieft, bündig, erhaben oder der alten Struktur adäquat ausgebildet werden.

Als Materialien zum Abdichten und Verfugen werden derzeit Mörtel mit mineralischen Bindemitteln empfohlen, weil für diese ausreichende Langzeiterfahrungen vorliegen und diese auch von den Denkmalbehörden als »artgerecht« anerkannt werden. Zur Anwendung kommen hochhydraulische Kalke, Trasskalke oder Romanzemente. Die Größe der Zuschläge richtet sich nach den Breiten der Risse bzw. Fugen. Eine farbliche Anpassung des Mörtels ist insbesondere bei sichtbaren Fugen von Bedeutung. Hier ist darauf zu achten, dass sich nachverfugte Bereiche nicht zu sehr von den nicht nachverfugten Bereichen abheben. Je nach Bindemittel fällt die Grundfarbe des Mörtels sehr unterschiedlich aus und verändert sich u. U. während der Aushärtezeit noch in ihrer Intensität. Die Farbe kann über den Zuschlag und über Pigmente beeinflusst werden, wobei dem Zuschlag der Vorzug gegeben wird, da er besser reproduzierbar ist. Eine vertiefende Darstellung zu der Verwendung mineralischer Mörtel zur Sanierung von Mauerwerksbauten enthält [Egloffstein, 2013].

3 Verpressbohrungen (Injektionsbohrungen)

Verpressbohrungen dienen dazu, Aufschlüsse zu Rissen und Hohlräumen zu bekommen und diese über die Bohrkanäle zu verpressen. Über den Widerstand bei der Herstellung einer Verpressbohrung erhält der Ausführende einen lokalen Aufschluss über das Mauerwerksgefüge, weshalb auch dieser Tätigkeit eine große Verantwortung auferlegt



Bild 1

Im Trockenspritzverfahren nachverfugt, Ruhrsandsteinoberflächen mit Granulat gereinigt

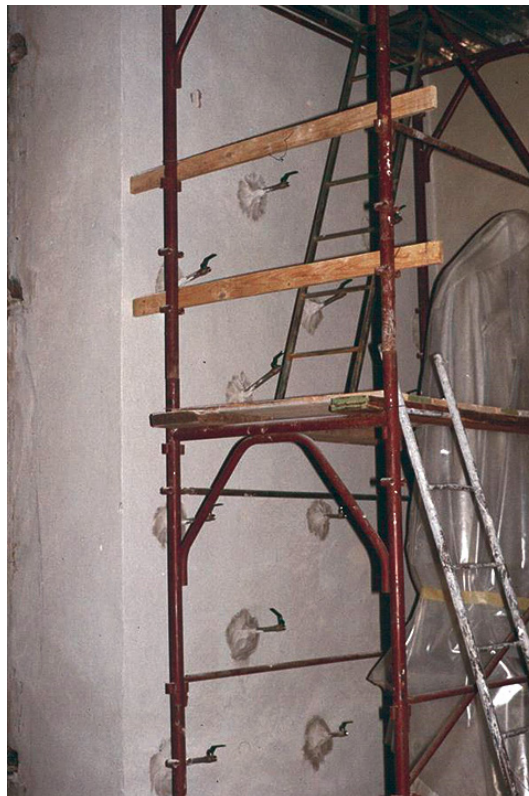


Bild 2

Injektionspacker für Rasterinjektion

wird. Die Planer sind auf die Rückinformationen von der Baustelle angewiesen und können entsprechend reagieren, wenn z. B. bei einer Injektionsbohrung ein bisher nicht bekannter Hohlraum o. ä. erschlossen wird.

Um Verpressbohrungen ausführen zu können, sollten dennoch folgende Voraussetzungen erfüllt sein: das Mauerwerksgefüge sollte zumindest prinzipiell bekannt sein, eine Abstimmung mit den Denkmalbehörden über die zu erwartenden lokalen Oberflächenzerstörungen sollte stattgefunden haben, lose Steine müssen gesichert sein und die Abdichtungen sollten durchgeführt worden sein.



Bild 3
Handpumpe zum Einbringen
von Verpressgut

Die Ausführung von Injektionsbohrungen ist bautechnisch einfach: Es werden i. d. R. Vollbohrungen mit einem Durchmesser zwischen 20 und 30 mm drehend oder drehend schlagend hergestellt. Nur bei extrem lockerem Gefüge sind die erschütterungsärmeren Kernbohrungen angeraten. Injektionsbohrungen werden horizontal, d. h. normal zu den Wandoberflächen geteuft und bis auf mittlere Bauteiltiefe geführt. Je nach Ausführungsziel sollte der Abstand der Injektionsbohrungen zwischen 0,5 und 1 m entlang von Rissen betragen und bei einer flächigen Injektion ein Raster von 1×1 m versetzt zueinander entstehen (Bild 2).

4 Verpressen (Injizieren)

Über das Verpressen wird erreicht, dass

- Risse druckfest geschlossen werden,
- ein Verbund zwischen einem nachträglich in das Mauerwerk eingebrachten Zugelement und dem Mauerwerk hergestellt wird,
- eine Zustandsverbesserung eines aufgelockerten Bereichs geschaffen wird,
- über die Reduktion des Hohlraumvolumens die Widerstandsfähigkeit eines Mauerwerksbereichs erhöht wird.

Das Verpressen verändert aber auch das thermische und hygrische Verhalten eines Bauteils, d. h.

der Wärme- und Feuchtedurchgang wird nach dem Verpressen ein anderer sein als vorher. Dagegen bleiben die Komponenteneigenschaften unverändert. Es können somit weder die mechanischen Eigenschaften der Steine noch die der Mörtel verbessert werden, da beide Komponenten eine so dichte Struktur aufweisen, dass in diese kein Verpressgut eindringen kann.

Verpressgut darf nur eingebracht werden, wenn eine ausreichende Erkundung in Hinblick auf das Mauerwerksgefüge, auf Hohlräume und auf die Zusammensetzung der vorhandenen Baustoffe stattgefunden hat und die geforderten Abdichtungen ausgeführt worden sind. Eine Abstimmung mit den Denkmalbehörden ist im Hinblick auf das irreversible Einbringen von Verpressgut zwingend erforderlich.

Im Gegensatz zum modernen Betonbau wird das Verpressgut auf der Baustelle in schnelllaufenden Rührwerken aufbereitet, ggf. kurzfristig in Vorratsmischern zwischengelagert und über Pumpen in Kleinmengen kontrollierbar eingebaut. Es ist von einer mittleren Verarbeitungszeit von 30 bis 60 Minuten auszugehen. Zur Förderung kommen Kolben-, Membran- oder Schneckenpumpen zum Einsatz, wobei nach wie vor der Handpumpe aufgrund der gefühlvollen Dosierbarkeit der Vorzug zu geben ist (Bild 3). Der Verpressschlauch wird an in das Mauerwerk temporär eingedichtete Packer angeschlossen, wobei darauf zu achten ist, dass die vom Verpressgut verdrängte Luft entweichen kann. Der Arbeitsdruck ist vom Ausführenden dem Zustand des Mauerwerks anzupassen. Er liegt i. d. R. bei 1–2 bar am Packer und wird über Manometer kontrolliert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass außer bei den Handpumpen die Manometer direkt am Aggregat installiert sind und damit mit zunehmender Förderhöhe auch höhere Drücke anzeigen. Maßgebend ist aber der Druck am Packer, den ein erfahrener Polier auch ohne Anzeigegerät verlässlich abschätzen kann. Verpresst wird grundsätzlich von unten nach oben. Dabei ist zu beachten, dass das Verpressgut bis zum Erstarrungsbeginn einen hydrostatischen Druck auf die umgebenden Mauerwerkspartien ausübt. Sie müssen in der Lage sein, diesem Druck zu widerstehen. Ein mehrstufiges Verpressen ist daher ggf. notwendig. Der Verpresserfolg ist dann gegeben, wenn der Druck an einem

Packer über ca. fünf Minuten bestehen bleibt ohne abzusinken.

Das Verpressgut soll flexibel in der Herstellung, verarbeitbar, injizierbar, beständig und verträglich mit den Bestandsmaterialien sein. Es sollten nur mineralische Bindemittel zum Einsatz kommen. Sie haben ihre Tauglichkeit, Verträglichkeit und vor allem ihre Dauerhaftigkeit bereits über viele Jahre nachgewiesen. Organische Bindemittel im Verpressgut verbieten sich bei der Hohlraumverfüllung im denkmalgeschützten Bestand aufgrund der Unverträglichkeit mit den Bestandsmaterialien und der Dauerhaftigkeit. Die Zusammensetzung des Verpressguts wird seinem Einsatzzweck angepasst: Beim Verpressen von Zugelementen mit dem Ziel der Verbundherstellung müssen die Druck- und damit die Zugfestigkeit wesentlich höher sein als beim Verfüllen von Hohlräumen, bei denen das Verpressgut auf die mechanischen Eigenschaften des Mauerwerks eingestellt wird. Zur Herstellung des Verbunds wird auch vor dem Hintergrund des Einbringens von Kleinmengen Zement als Bindemittel verwendet. Bei der Hohlraumverfüllung kommen Kalke mit hydraulischen Eigenschaften oder Romanzemente zum Einsatz. Generell ist bei den Bindemitteln eine hohe Sulfatbeständigkeit (HS) angeraten. Bei gipshaltigem Mauerwerk ist die Verwendung hochsulfatbeständiger Bindemittel wegen der Gefahr von Treibmineralbildungen (Ettringit, Thaumasit) zwingend erforderlich. Da aber bereits durch die Wasserzugabe nachteilige Quelldrücke entstehen können, erfordert eine Sanierung gipshaltiger Mauern extrem hohe Sorgfalt bei Verfahrensdurchführung. Unabhängig von Gips im Mauerwerk ist bei der Auswahl des Bindemittels darauf zu achten, dass der Anteil an auslaugbaren Alkalien, die je nach geologischer Herkunft der Ausgangsmaterialien unterschiedlich ausfallen, gering bleibt. Dadurch ist die Neigung zu Salzausblühungen geringer, wenngleich diese kaum vollständig unterbunden werden können. Dem Bindemittel werden je nach Hohlraumgehalt noch Zuschläge zugemischt. Diese können Gesteinsmehl, Trass, Bims, Ziegelsplitt oder Feinsand sein. Als inerter Zuschlag empfehlen sich Glasperlen. Über die Zuschläge werden das Fließ- und Schwindverhalten sowie die Festigkeit beeinflusst. Die von den Herstellern als Fertigmischung gelieferten Trocken-

massen enthalten häufig auch einen geringen Anteil an Fließmitteln, wenn diese auch nicht offiziell ausgewiesen werden. Der Wasseranspruch des Verpressguts kann über die Zugabe von Luftporenbildner als Zusatz reduziert werden, ohne dabei die Fließfähigkeit zu reduzieren [Stürmer, 1997]. Diese sogenannten Injektionsschaummörtel (ISM), die ebenfalls auf der Baustelle aufbereitet werden, haben aufgrund ihres Hohlraumgehalts ein reduziertes spezifisches Gewicht. Der Wasser-Binderwert liegt beim Verpressgut bei 0,8 bis 1,0, was in Bezug auf den geringst möglichen Wert von 0,36 sehr hoch ist. Daher erscheint das Verpressgut auch beim Einbau als sehr flüssig.

5 Ankerbohrungen

Um Zugelemente nachträglich in Mauerwerk einzubauen, sind Bohrungen erforderlich. An die Herstellung und Beschaffenheit der Bohrkanäle werden Anforderungen gestellt, die aus dem Zweck und dem Material der Zugelemente resultieren. Je größer die Kräfte sind, die die Zugelemente aufnehmen haben, umso höher sind die Anforderungen an den Verbund, der die Lasten vom Mauerwerk an das Zugelement zu übertragen hat. Die aufnehmbaren Ankerkräfte ergeben sich aus den Festigkeiten der Zuganker selber, aber auch aus den Festigkeiten der Verbundwerkstoffe und den Verbundflächen. Damit spielen die Durchmesser der Bohrungen eine entscheidende Rolle, denn daraus ergibt sich zusammen mit der Länge der Bohrung und einer Abminderung über die nicht wirksamen Verbundbereiche die wirksame Verbundfläche. An die Herstellung von Bohrkanälen, in die schlaaffe Anker eingelegt und verpresst werden (Verpress- bzw. Nadelanker), werden geringere ingenieurtechnische Anforderungen gestellt als an Bohrkanäle, die Zugglieder aufnehmen, die vorgespannt und damit aktiv unter Last gesetzt werden.

Für Verpressanker (Nadeln), deren Durchmesser i. d. R. zwischen 10 mm und 16 mm schwanken, müssen Bohrkanäle hergestellt werden, die im Mittel einen Durchmesser von 55 mm haben, meist nicht länger als 4 m sind und deren Ansatzpunkte zumindest auf einer Wandseite im Stein liegen. Ziel

**Bild 4**

Herstellung langer Kernbohrungen: Bohrmaschine auf am Gerüst befestigter Lafette

dabei ist es, die Anker mit den äußersten Steinen so zu verbinden, dass diese wie Ankerplatten wirken und damit die konzentrierten Ankerlasten besser verteilen. Die Festlegung des Bohrdurchmessers ergibt sich aus dem Durchmesser des Zugelementes und der notwendigen Überdeckung des Zugelementes aus Gründen des Korrosionsschutzes. Bei schwarzem Stahl wird eine Überdeckung von mindestens 20 mm empfohlen, so dass sich beispielsweise bei einem Anker mit 16 mm Durchmesser und einer Überdeckung von beidseits 20 mm ein Mindestbohrdurchmesser von $16 + 20 + 20 = 56$ mm ergibt. Wenn die Zuganker über Muffen gestoßen werden, sollte die Überdeckung im Bereich der Muffen ebenfalls mindestens 20 mm haben. Damit erhöhen sich die Mindestdurchmesser von Bohrungen für zu stoßende Anker um 15 mm, d. h. bei obigem Beispiel auf 71 mm. Beim Einsatz von nichtrostenden Ankern richtet sich der Mindestbohrdurchmesser allein nach der notwendigen Verbundfläche.

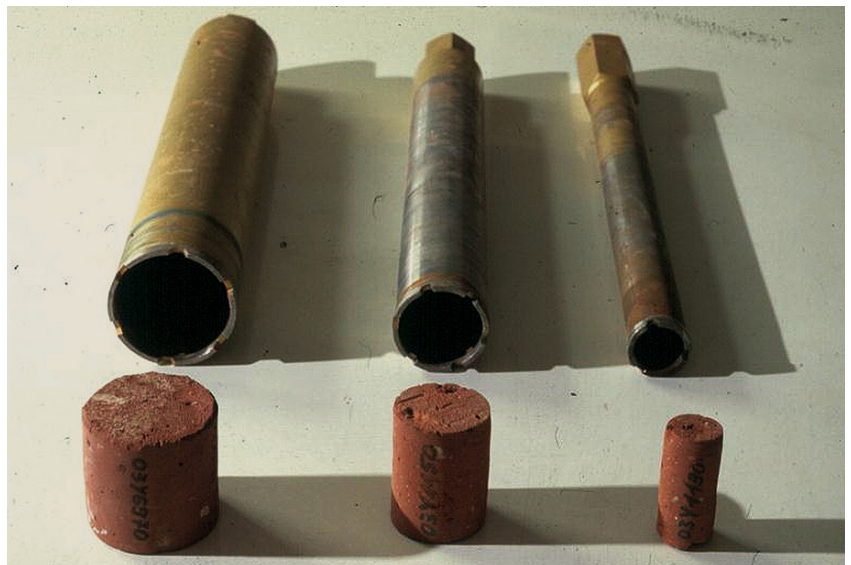
Bei den Bohrverfahren ist zwischen Vollbohrungen und der Kernbohrungen zu unterscheiden. Für Vollbohrungen ist zwangsläufig ein größerer energetischer Aufwand erforderlich, da das Mauerwerk

über den gesamten Bohrdurchmesser abgespannt bzw. abgefräst werden muss. Daher ist bei Vollbohrungen in hartem Mauerwerk der Einsatz von Schlagenergie erforderlich: Man spricht vom drehend-schlagenden Bohren. Um die damit verbundenen Erschütterungen zu vermeiden, kommen hochfrequente Bohrverfahren mit sogenannten Imlochhämmern zum Einsatz. Die hohen Schwinggeschwindigkeiten dieser Bohrgeräte sind bauwerksverträglicher als die klassischen Schlagbohrverfahren. Um die Schlagenergie beim Hochfrequenzbohren möglichst effizient zu nutzen, sind die Bohrgestänge tailliert: Auf einem relativ dünnen Bohrgestänge sitzt ein Bohrkopf mit dem Durchmesser der gewünschten Bohrung. Die taillierten Bohrgestänge haben damit eine geringe Biegesteifigkeit, was sich negativ auf die Zielgenauigkeit bei heterogenem Mauerwerk und auf den Bohrfortschritt bei Nachfall auswirkt. Nachfall im Bohrkanal kann dazu führen, dass der Bohrkopf nicht mehr zurückgezogen werden kann, weil sich ein Stein im Bohrkanal verklemmt hat. Im Gegensatz dazu hat eine Kernbohrung, bei der das Bohrgestänge bzw. Bohrröhr nur wenige Millimeter kleiner ist als das zukünftige Bohrloch, und bei dem das Schneidwerkzeug vorne auf dem Bohrröhr aufgeschweißt ist, aufgrund der hohen Biegesteifigkeit eine sehr hohe Zielgenauigkeit. Die zu spannende Oberfläche ist wesentlich geringer, da nur ein dünner Schlitz zu schneiden ist und ein zu entsorgender Bohrkern übrig bleibt. Spannankerbohrungen erfordern eine sehr hohe Zielgenauigkeit, um nicht ungewollte Exzentrizitäten in Wandquerschnitten zu erzeugen. So darf z. B. bei einer 60 cm dicken, zentrisch vorzuspannenden Wand die Abweichung der Bohrachse nicht mehr als ein Sechstel der Wanddicke ($= 1/6$ Kernweite), also 10 cm sein, was bei einer 25 m langen Bohrung, wie sie in Kirchenschiffwänden nicht ungewöhnlich ist, eine Zielgenauigkeit von 0,4 % voraussetzt. Bei derart langen Bohrungen ist es erforderlich, die Zielgenauigkeit über zusätzliche Kontrollöffnungen zu überprüfen, deren Abstand zwischen 3 m und 8 m liegen sollte.

Der Vortrieb der Bohrungen erfolgt entweder händisch oder ölhydraulisch. Dem händischen Vortrieb wird bei sensiblem Mauerwerk der Vorzug gegeben, da der Bohrmeister über die unterschiedlichen Widerstände beim Niederteufen den Mauerwerks-

aufbau und seine Widerstände fühlt. Die Bohrmaschinen sind aus Gründen der Arbeitssicherheit, aber auch aus Gründen der Zielgenauigkeit entweder über das Gerüst (Bild 4) oder durch direktes Andübeln am Bauwerk (Bild 5) zu befestigen, sofern dies auf schützenswerten Oberflächen überhaupt möglich ist. Für längere Bohrungen sind Bohrlafetten notwendig, auf die die Bohrmaschinen aufgesetzt und die mit dem Gerüst befestigt werden. In dem Falle ist darauf zu beachten, dass auch das Gerüst ausreichend gut mit der zu bohrenden Wand befestigt und ausgesteift ist. Nur bei kurzen Bohrstrecken, weichem Mauerwerk und wertlosen Wandoberflächen empfiehlt sich ein Festdübeln der Bohrstände an der Wand.

Als Schneidmaterialien kommen Hartmetall (Widia) oder Diamanten zum Einsatz. Die »Schneidezähne« werden in einem gewissen Abstand untereinander auf den Rand der Kronen aufgeschweißt (Bild 6). Je nach Härte des Mauerwerks wird die Matrix, in der die Diamanten eingebunden sind, und der Abstand der Schneidezähne untereinander vom Bohrkronenhersteller konfektioniert. Da je nach Anwendungsfall unterschiedlich Bohrkronen zum Einsatz kommen können, ist es wichtig, im Rahmen des Leistungsverzeichnisses den Aufbau des Mauerwerks und die Härte der Steine möglichst genau zu beschreiben. Durch den Abrieb beim Spanen bzw. Schneiden entstehen Wärme und Bohrklein. Somit ist ein Kühlen und Spülen unumgänglich. Als Medien hierfür stehen Wasser oder Luft zur Verfügung. Dem Nassbohren, also Kühlen und Spülen mit Wasser, sollte der Vorzug gegenüber dem Trockenbohren gegeben werden. Durch das Nassbohren wird das Bohrloch automatisch vorgenässt und gereinigt, was dem Verbund des später einzubringenden Verpressguts zu Gute kommt. Das Nassbohren hat allerdings den Nachteil, dass Bereiche durchfeuchtet werden, die ggf. nicht durchfeuchtet werden dürfen, weil sie nicht mehr richtig abtrocknen können, wie z. B. Auflager hölzerner Tragelemente. Es können auch ungewünschte Verunreinigungen von Wandoberflächen unterhalb des Bohrlochs entstehen, die selbst durch lokales Absaugen nicht zuverlässig vermieden werden können. Das Trockenbohren ist i. d. R. teurer als das Nassbohren, weil der Verschleiß der Kronen höher und der Bohrfortschritt geringer ist.



Das Spülen mit Luft, die über einen Kompressor an die Bohrkronen gefördert und dort ausgeblasen wird, führt zu einer erheblichen Staubentwicklung, weswegen Schutzmaßnahmen für wertvolle Oberflächen wie Putze, Gemälde oder Zierrat, aber auch für Orgeln und für die Umgebung außen obligatorisch sind.

Bild 5
Herstellen kürzerer Kernbohrungen: Bohrstände an Wand gedübelt

Bild 6
Diamantbesetzte Bohrkronen mit dem zugehörigen Bohrkernen

6 Einbau von Verpressankern (Vernadeln)

Mit dem Einbau von Verpressankern soll erreicht werden, dass diese zukünftig Zugkräfte aufnehmen, wozu das Mauerwerk nicht in der Lage ist.

Als Anwendungsfälle sind hierzu zu nennen:

- Beschränkung von Rissweiten, was nur bedingt möglich ist,
- Befestigung von Einzelbauteilen wie Konsolen, Laibungssteine, Gesimssteine,
- Herstellen schubfester Verbindungen, was aufgrund der kleinen Schubflächen der Nadeln nur wenig wirkungsvoll ist,
- Aufnehmen von Spaltzugkräften hinter Lasteinleitungsstellen wie z. B. Spannankern,
- Knicksicherung von Außenschalen bei mehrschaligem Mauerwerk durch Quervernadelung.

Bei der Instandsetzung von Mauerwerk sind verschiedene Ankertechniken im Einsatz:

Injektionsanker

Im Gegensatz zu den Verpressankern sind Injektionsanker Fertigprodukte, die von verschiedenen Dübelherstellern auf dem Markt sind und für die z. T. eine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt. Je nach Ankergrund werden bei Injektionsankern Vollbohrungen hergestellt, die nur wenige Millimeter größer sind als der Durchmesser des nichtrostenden Ankers. In die Löcher werden die Anker über vorkonfektionierte, kunststoffmodifizierte Injektionsmörtel eingeklebt. Je nach Heterogenität des Ankergrunds kommen Siebhülsen zum Einsatz, die ein unkontrolliertes Abfließen des Injektionsmörtels verhindern sollen. Diese können aber auch bei falscher Anwendung den Verbund zwischen Anker und Mauerwerk verhindern. Aufgrund der geringen Verbundflächen können die Injektionsanker nur geringe Kräfte übernehmen, so dass ihr Einsatz eher der Befestigungstechnik als der ingenieurtechnischen Sicherungstechnik von Mauerwerk zuzuweisen ist [Müller, Scheller, 2014].

Spiralanker

Spiralanker wurden in Großbritannien entwickelt und werden zwischenzeitlich auch auf dem Europäischen Festland eingesetzt. Mit ihrem Einbau wird das Ziel verfolgt, Rissweiten in Scheibenebene dauerhaft zu begrenzen. Verdillte, nicht rostende Zugelemente werden hierzu rissüberbrückend in freigeräumte Lagerfugen eingelegt und über vor-

konfektionierte, modifizierte Fugmörtel der Verbund zwischen den Steinen und den Zugelementen hergestellt [Jahn, Meichsner, 2013]. Die Anker wurden für den Einsatz bei Ziegelmauerwerk entwickelt, da hier von horizontalen Lagerfugen und auch in der Tiefe von ebenen Lagerflächen der Steine ausgegangen werden muss. Bei Natursteinmauerwerk werden diese Anforderungen nur von einem Quadermauerwerk erfüllt, so dass schon allein deshalb die Anwendung der Spiralanker bei Natursteinmauerwerk sehr begrenzt ist. Hinzu kommt die Notwendigkeit, die Fugen zum Einbau der Anker auf mindestens eine Tiefe von 30 mm auszuräumen und mit einem Mörtel zu schließen, der die Verbundanforderungen des Ankers mit dem Mauerwerk erfüllt. Seine mechanischen Eigenschaften können damit aber nicht zwingend an den Bestandsmörtel angepasst werden. Die bisherigen Spiralankeruntersuchungen haben sich mit deren Verbund- bzw. Ausziehfestigkeit beschäftigt. Die nachteilige Wirkung steifer Zugelemente in Lagerfugen vertikal beanspruchter Natursteinwände, wie sie Stiglat [1984] schon nachgewiesen hat, müsste für die Spiralanker noch versuchstechnisch widerlegt werden, bevor diese für ingenieurtechnische Sicherungen im denkmalgeschützten Bestand zur Anwendung kommen.

Im Weiteren werden lediglich die *Verpressanker* behandelt, da ihr Einsatz und ihre Wirkungsweise bei der ingenieurtechnischen Sicherung von Mauerwerk wissenschaftlich untersucht und für die Praxisanwendung im denkmalgeschützten Bestand ausreichend nachgewiesen wurde.

Voraussetzung zum Einbau von Verpressankern ist, dass das Konstruktionsgefüge und die Schadensursachen bekannt sind und wenn möglich eine Schadensprognose für den Fall ohne Sicherung gegeben werden kann. Beim Vernadeln wird ein »Bewehrungsstab« mit Hilfe von Abstandshaltern zentrisch in ein Bohrloch eingelegt und über Injektion von Zementleim nachträglich ein Verbund zwischen Anker und Mauerwerk hergestellt. Es wirken Haft-, Reibungs- und Scherverbund gleichzeitig, wobei je nach Oberflächenstruktur des Bohrloches die eine oder andere Verbundart wirkungsvoller ist: Bei glatten und hohlraumarmen Bohrlochwandungen können nur Haft- und Reibungsverbund wirken,

bei unregelmäßigen hohlraumreichen Bohrungen dringt beim Verpressen das Injektionsgut auch in die Kavernen ein und bildet beim Aushärten entsprechende Scherflächen aus. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei Stahlüberdeckungen von 20 mm bereits ein ausreichender Haftverbund ausbilden kann.

Die Widerstandsfähigkeit der Verpressanker wird von den Parametern Mauerwerksart, Mauerwerksqualität, vorhandenem Spannungszustand, die durch Injektion erreichbare Vergütung sowie von dem Ankergrund (Stein oder Fugen) beeinflusst. Bei kurzen zur Verfügung stehenden Verbundstrecken wie z. B. in schmalen Steinen kann die Verbundwirkung über Endverankerungen geringfügig erhöht werden. Hierbei kommen z. B. Unterlagscheiben zum Einsatz, die auf Gewindestäben über Muttern gehalten oder angeschweißt werden. Die Ankerstäbe werden zwar wie Bewehrungsstäbe in verschiedenen Längen geliefert, die Regel ist jedoch auch aufgrund des einfacheren Einbaus, diese in Meterstücken zu liefern und über Muffen beim Einbau zu stoßen. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Bohrungen dann ca. 15 mm größer sein müssen. Sowohl aus Gründen des Korrosionsschutzes als auch aus Gründen der vollständigen Verbundflächen müssen die Anker mit Abstandshaltern zentrisch in die Bohrlöcher eingebaut werden. Die Abstände der Abstandshalter sollten 2,50 m nicht überschreiten.

Für die Bemessung der Verpressanker hat Gigla [1999] aufbauend auf frühere Untersuchungen und die Verbundtheorie bei Stahlbeton mit eigenen Ausziehversuchen entsprechende Empfehlungen bereitgestellt [Gigla, 1999], [Gigla, 2014]. Die Bemessung baut darauf auf, dass das Versagen durch die Bruchdehnung des Stahls erreicht wird. Für den Verbund im Mauerwerk wird als Bruchkriterium eine Verschiebung des Verbundsystems von 1 mm angesetzt. Als Parameter fungieren der Nadel-durchmesser, das Verhältnis des Nadel- zu Bohrl Lochdurchmesser, die Verbundlänge und die Druckfestigkeit des Verpressguts. Die für die Nachweisführung notwendigen Formeln sowie Bemessungsbeispiele finden sich in [Gigla, 2014].

Als Materialien für die Anker kommen die klassischen Bewehrungsstäbe BSt 500-S oder Gewindestäbe in Frage. Letztere sind vorteilhaft bei der Verlängerung über Muffen und bei der Notwendigkeit von Endverankerungen in Form von Unterlagscheiben und Muttern. Da zwischenzeitlich die Kosten für nichtrostende Stähle erheblich gesunken sind, empfiehlt sich vor allem aufgrund möglicher korrosionsbegünstigender Klimate die Verwendung von Stählen mit hohen Chrom-Nickel-Gehalten (Werkstoff-Nr. 1.4401 oder 1.4301). Als Festigkeitsklasse sollte mindestens 50 gefordert werden.

Glasfaserverstärkte Kunststoffstäbe sind zwar korrosionsbeständig, sie sind aber empfindlich gegen Nachfall und es ergeben sich aufgrund ihres gegenüber den Stählen viermal geringeren E-Moduls große Dehnwege. Daher könnten derartige Stäbe nur vorgespannt zum Einsatz kommen. Wegen der Dauerhaftigkeit und Fremdartigkeit des Materials werden GFK-Stäben auch von den Denkmalbehörden Bedenken entgegengebracht. GFK-Stäbe kommen somit bei der ingenieurtechnischen Sicherung von Mauerwerk nicht zum Einsatz.

Werden Nadelanker im klüftigen Mauerwerk verpresst, kommt es häufig zum unkontrollierten Abfluss des Verpressguts und damit nicht zu dem gewünschten Verpresserfolg. Die Verbundwirkung ist dann nicht in dem erforderlichen Umfang vorhanden, die Ankerwirkung erreicht nicht das erwartete Maß. Außerdem »verunreinigt« und versteift das Verpressgut unkontrolliert Zonen in Mauerwerk. Um dies zu vermeiden, können Anker bestrumpft werden (Bild 7). Hierzu kommen speziell konfektionierte Geotextilien zum Einsatz, die eine sehr hohe Reißfestigkeit aufweisen und eine Maschenweite haben, die noch ein geringfügiges Durchdringen des Verpressguts zulassen, das sich dann saugnapfartig an den glatten Bohrlochwänden festsetzen kann. Der Strumpfdurchmesser muss so konfektioniert sein, dass er sich mit dem Verpressgut in die Spalten und Klüfte hereindrücken kann, um dort nach dem Erhärten entsprechend wirksame Scherflächen auszubilden.



Bild 7 Beim Verpressen der Anker ist dafür zu sorgen, dass das Verpressen von der Tiefe aus erfolgt und dass die durch das Verpressen verdrängte Luft entweichen kann. Dies wird über die Verwendung von Verpress- und Entlüftungsschläuchen erreicht.

7 Vorspannen

Historisches Mauerwerk vorzuspannen gehört zu den ingenieurtechnisch schwierigsten Instandsetzungsverfahren. Daher darf die Vorspanntechnik nur dann zum Einsatz kommen, wenn sich der Tragwerksplaner ausreichend sicher ist, welche Schadensursachen vorhanden sind, welchem zukünftigen Schadensfortschritt er begegnen will, welchen Aufbau das Mauerwerk hat und wie zuverlässig die Eingangsparameter für die Bemessungen sind. Durch das Vorspannen sollen gerissene Mauerwerkspartien wieder druck- und schubfest zusammengefügt, eine dehnungsarme Abtragung von Zugspannungen erreicht und der Kraftfluss beein-

flusst werden. Die Bohrkanäle müssen frei von Nachfall und so zielgerichtet hergestellt sein, dass sich weder ungewollte Verkürzungen der freien Spannweiten noch nachteiligen Biegespannungen für die Wandquerschnitte ergeben.

Bei der Vorspannung *mit Verbund* werden die Bohrkanäle nach dem Vorspannen verpresst, so dass über die dann eintretende Verbundwirkung die Endverankerungen entlastet werden. Bei der Vorspannung *ohne Verbund* bleiben die Ankerkanäle offen, die Anker müssen daher doppelt vor Korrosion geschützt werden. Die Vorspannkraften werden bei diesem Verfahren nicht nur im Bauzustand konzentriert über die Endverankerungen in das Mauerwerk eingeleitet, sondern sie wirken auch nach dem Vorspannen weiterhin lokal an diesen Stellen. Die Vorteile des Vorspannens ohne Verbund werden darin gesehen, die Vorspannkraften jederzeit nachregulieren zu können und die Anker sogar wieder ausbauen zu können. Auch kann ein ungewolltes Abfließen des Verpressguts gar nicht auftreten. Nachteilig sind allerdings die ständig wirkenden hohen konzentrierten Einzelkräfte, die das unverbesserte Mauerwerk in Scheibenebene beanspruchen und große Kriechverformungen hervorrufen, die dann einen Abbau der Vorspannkraften zur Folge haben. Die Reversibilität ist bei Mauerwerkssicherungen eine unangemessene Anforderung, denn wenn aus ingenieurtechnischer Sicht eine Sicherung erforderlich wird, muss diese wirkungsvoll und dauerhaft sein, um das reduzierte Sicherheitsniveau wieder anzuheben.

Für die Endverankerungen der Spannglieder bieten sich die Möglichkeiten, diese entweder aus Stahlbeton herzustellen oder stählerne Ankerplatten einzubauen, die entweder sichtbar an der Wandoberflächen bleiben oder im Mauerwerk versenkt und zugemauert werden. Die Endverankerungen aus Stahlbeton reichen i. d. R. tiefer in das Mauerwerk hinein als die Stahlplatten, die dafür auf einer dünnen mineralischen Mörtelausgleichsschicht aufgesetzt werden (Bild 8). Die Bemessung der Stahlbetonpolster erfolgt nach der Stahlbetonnorm (DIN 1045-1 bzw. DIN EN 1992). Für die Bemessung der Stahlplatte empfiehlt Pieper [1983], einen Kreisringträger aus Stahl gem. DIN 18800 bzw.

DIN EN 1993 durchzuführen. Er leitet hieraus die einfache Bemessungsformel für die Plattendicke (d) ab:

$$d = D \cdot \text{zul } \sigma_{\parallel} / 1,3$$

D ... Plattendurchmesser in cm
 zul σ_{\parallel} ... zulässige Mauerwerkspressung parallel zu den Lagerfugen

Bei hohen Vorspannkräften ergeben sich große, dicke und damit sehr schwere Ankerplatten. In den Fällen, dass aus geometrischen oder substanzschonenden Gründen auf einer Seite keine Ankerplatten gesetzt werden können, müssen die Anker zunächst über eine definierte Verbundstrecke verankert werden, was bautechnisch sehr anspruchsvoll ist. Erst dann kann die Vorspannung von der anderen Seite aufgebracht werden. Bei der Einleitung der konzentrierten Lasten sind die Lasteinleitungsbereiche dahingehend zu bemessen, dass die hinter den Lasteinleitungsbereichen auftretenden Spannungen mit ausreichender Sicherheit aufgenommen werden können. Hierbei ist auch zu untersuchen, ob die hinter den Einleitungsbereichen entstehenden Querkzugkräfte vertikal überdrückt und horizontal aufgenommen werden können. Zur Aufnahme der horizontalen Umlenkkkräfte müssen i. d. R. Querkzugnadeln eingebaut werden. Die vertikal auftretenden Umlenkkkräfte werden je nach Abstand des Spannglieds von der Mauerkrone von der Auflast des Mauerwerks überdrückt oder es muss eine vertikale Vernadelung eingebaut werden, die einem »Aufklappen« der Mauerkrone nach oben entgegenwirkt. Die Bemessungen der Verbundverankerung sowie der Querkzug- und Vertikalvernadelung erfolgen nach Haller [1982], und sie wurden in den Empfehlungen für die Praxis »Historisches Mauerwerk« des Sonderforschungsbereichs 315 der Universität Karlsruhe aufbereitet [Wenzel, Kleinmanns, 2000]. Hier wir beschrieben, wie die Größe der Vorspannkräfte prinzipiell zu ermitteln ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die Quervorspannung einer Mauerwerkswand auf einer definierten Fläche eine mittlere Druckspannung parallel zu den Lagerfugen von $0,1 \text{ N/mm}^2$ wirkt. Für die theoretischen Verluste der Vorspannkräfte aus Kriechen hat Haller [1982]



eine entsprechende Bemessungsgleichung bereitgestellt, die sich ebenfalls in [Wenzel, Kleinmanns, 2000] findet.

Bild 8

Stahlplattenendverankerung für geringe Vorspannkräfte, im Bohrloch versenkt

Als Spannanker werden die im Spannbetonbau üblichen Systeme verwendet, für die i. d. R. auch eine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt. Spannanker werden in Längen von maximal 8 m geliefert. Verlängerungen über entsprechend zugelassene Muffen sind möglich. Als Spannstäbe kommen schwarze Stähle hoher Festigkeitsklassen mit durchgängig aufgewalzten Gewinderippen in Durchmessern zwischen 15 und 36 mm zur Anwendung. Für die Vorspannung werden von den Herstellern auch nichtrostende hochfeste Stähle mit glatter oder gerippter Oberfläche bereitgestellt. Glasfaserstäbe, die für die hohen Zugbeanspruchungen durchaus ausgelegt sind, haben bisher bei denkmalgeschützten Bauwerken keine baupraktische Anwendung gefunden.

Literatur und Quellen

- [Wenzel, Kleinmanns, 2000] Wenzel, F., Kleinmanns, J. (Hrsg.), (2000): Historisches Mauerwerk. Untersuchen, Bewerten, Instandsetzen. In: Empfehlungen für die Praxis. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe (TH)
- [Eckert, Wenzel, Kleinmanns, 2000] Eckert, H., Wenzel, F., Kleinmanns, J. (Hrsg.), (2000): Denkmalpflege und Bauforschung. Aufgaben, Ziele, Methoden. In: Empfehlungen für die Praxis. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe (TH)
- [Egermann, 2009] Egermann, R., (2009): Statische Sicherung von Wackenmauerwerk. In: Europäischer Sanierungskalender 2009, 4. Jahrg., S. 293–307
- [Egloffstein, 2013] Egloffstein, P., (2013): Mineralische Mörtel und Putze zur Sanierung historischer Mauerwerksbauten. In: Mauerwerk-Kalender 2013, S. 107–133, Verlag Ernst & Sohn
- [Stürmer, 1997] Stürmer, S., (1997): Injektionsschaum-mörtel für die Sanierung historischen Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze., Diss. Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät für Bauingenieurwesen
- [Müller, Scheller, 2014] Müller, M., Scheller, E., (2014): Befestigungsmittel für den Mauerwerksbau. In: Mauerwerk-Kalender 2014, S. 89–138, Verlag Ernst & Sohn
- [Jahn, Meichsner, 2013] Jahn, T., Meichsner, H., (2013): Instandsetzung von gerissenem Mauerwerk mit Spiralankern. In: Mauerwerk-Kalender 2013. S. 191–212, Verlag Ernst & Sohn
- [Stiglat, 1984] Stiglat, K., (1984): Zur Tragfähigkeit von Mauerwerk aus Sandstein. In: Bautechnik 2/1984, S. 51–59, und 3/1984, S. 94–100, Ernst & Sohn, Berlin
- [Gigla, 1999] Gigla, B., (1999): Verbundfestigkeit von Verpressankern im Mauerwerk. In: Aus Forschung und Lehre, Heft 38, Institut für Tragkonstruktionen, Diss., Universität Karlsruhe (TH)
- [Gigla, 2014] Gigla, B., (2014): Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk Teil 5: Vernadeln, Verankern. In: Mauerwerk-Kalender 2014, Verlag Ernst & Sohn
- [Pieper, 1983] Pieper, K., (1983): Sicherung historischer Bauten. Verlag Ernst & Sohn
- [Haller, 1982] Haller, J., (1982): Untersuchungen zum Vorspannen von Mauerwerk historischer Bauten, Diss., Universität Karlsruhe (TH)

Bögen und Gewölbe – Bewerten und Instandsetzen

Die grundsätzliche Wirkungsweise und das Tragverhalten einfacher Bögen und Gewölbe werden kurz erläutert. Der häufigste Lastfall ist der Fall nachgebender Widerlager. Die hierfür typischen Schäden sind dargestellt und deren Ursache benannt. Mögliche Gefährdungen der Standsicherheit werden besprochen und Möglichkeiten der Instandsetzung aufgezeigt.

Rainer Barthel

Schlagwörter: Bogen, Gewölbe, Bogenbrücke, Kreuzgewölbe, Kalkmörtel, Stützlinie, Horizontalschub, Kantenpressung, Riss, Abplatzung, Instandsetzung, statische Sicherung, Denkmalpflege, Steinaustausch, Vierung, Lehrgerüst, Rückverformung

Bögen und Gewölbe aus Naturstein gehören zu der ältesten Bautechnik der Menschheit. Beim Bauen im Bestand und in besonderem Maße in der konstruktiven Denkmalpflege gehören Bögen und Gewölbe zu den grundlegenden Bauteilen. Sie sind raumbildende Architekturelemente und leistungsfähige Tragwerke, Träger wertvoller Gemälde und Stuckornamente, aber auch als Straßen- und Eisenbahnbrücken wichtige Elemente der Verkehrsinfrastruktur. Sie werden allerdings kaum noch gebaut und das Wissen und die Erfahrungen mit dieser Bauweise rücken zunehmend in den Hintergrund oder gehen verloren. Auch sind nur wenige moderne Werkzeuge für die statische Berechnung und Analyse verfügbar. In den Baunormen gibt es so gut wie keine Hinweise auf Bögen und Gewölbe. Zwar kennt jeder Architekt und Ingenieur die prinzipielle Wirkungsweise eines Bogens, die Konstruktionsweisen, die Formgebung und die Randbedingungen sind aber so vielfältig, dass es im konkreten Fall meist nicht einfach zu beurteilen ist, welcher Schaden eine Gefährdung darstellt und auf welche Weise er behoben werden kann.

Es lassen sich zwei Gruppen von Gewölben unterscheiden. Es sind zum einen die Gewölbe des Hochbaus, deren Auflager von Wänden, Stützen, Strebepfeilern und Strebewerken gehalten werden

und außer dem Eigengewicht und gegebenenfalls Deckenlasten, geringe Lasten zu tragen haben. Diese Gewölbe sind im Wesentlichen gefährdet durch Bewegungen der Widerlager. Meist sind horizontal nachgebende Widerlager Ursache für Schäden. Gewölbe des Tiefbaus und des Brückenbaus sind meist größeren Lasten, veränderlichen Nutzlasten und den Einwirkungen der Witterung ausgesetzt. Vorausgesetzt, eine Brücke und deren Widerlager sind für die auftretenden Lasten ausreichend dimensioniert, drohen die meisten Schäden durch eindringendes Wasser, Salzbelastungen, Verwitterung der Steine und gegebenenfalls pflanzlichen Bewuchs.

Die Geschichte der Wölbungen, deren Formgebung und Konstruktionsweisen sind in [Hart, 1965] und [Ungewitter, Mohrmann, 1891] dargestellt. Eine ausführliche Darstellung der statischen Berechnung und Beurteilung von Gewölben wird in [Holzer, 2013] gegeben. Grundlegend sind auch [Heyman, 1995] und [Harvey, 1991].

1 Bogen und Tonnengewölbe

Ein halbkreisförmiger Bogen oder ein halbkreisförmiges Tonnengewölbe ist meist zu einem Drittel bis

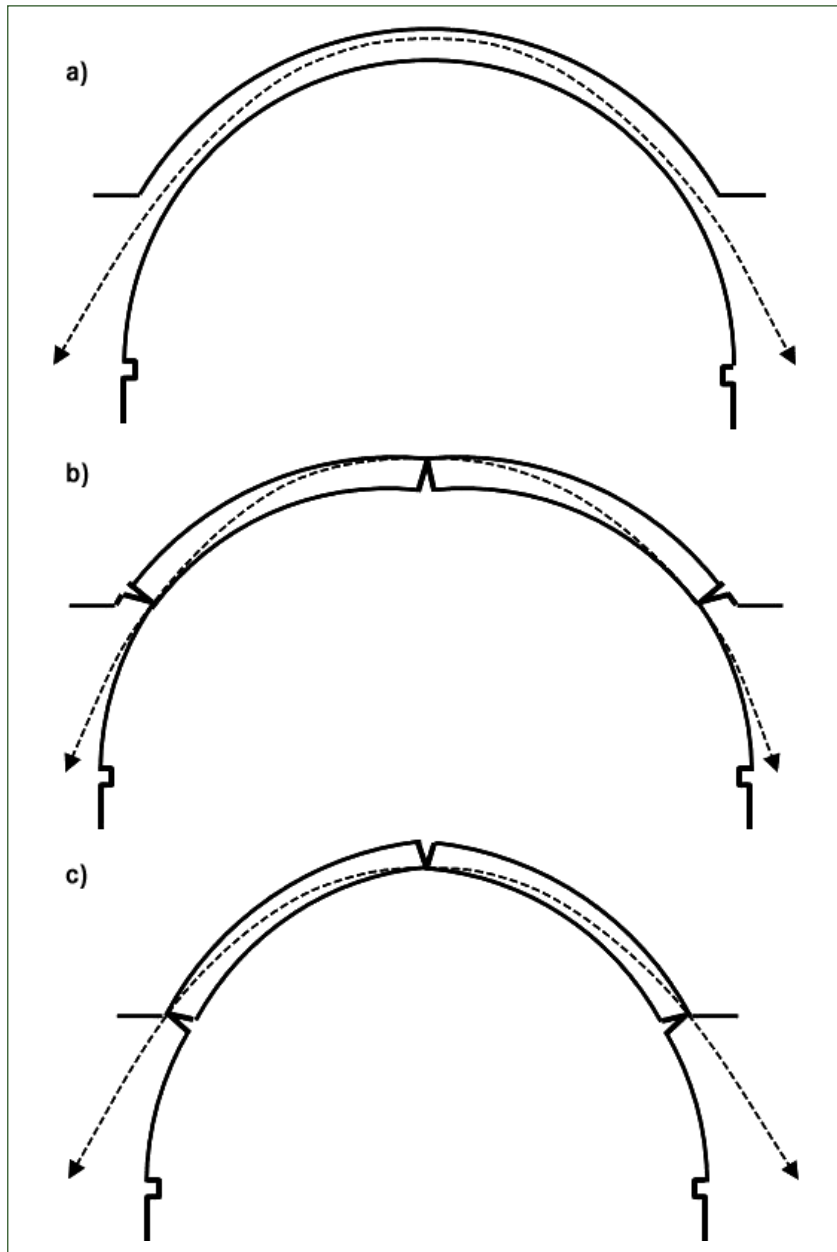


Bild 1 Stützlinien im halbkreisförmigen Bogen bei
a) starren Auflagern
b) horizontal nachgebenden Auflagern
c) zusammengedrückten Auflagern

zur Hälfte des Bogenstichs hintermauert. Die keilförmigen Steine setzen erst ab einer bestimmten Höhe über dem architektonischen Gewölbeansatz, der z. B. durch ein Kapitell markiert wird, an.

1.1 Wirkungsweise

Eine optimale Bogenform stellt die Umkehrung der hängenden Kette dar. Die Zugbeanspruchung in der hängenden Kette entspricht der Druckbeanspruchung im stehenden Bogen. Die Kettenlinie wird zur Stützlinie. Diese Erkenntnis geht auf den eng-

lischen Gelehrten Robert Hooke (1635–1702) zurück. Christopher Wren nutzte dieses Wissen bereits beim Entwurf der Kuppel von St. Pauls in London. Der katalanische Architekt Antonio Gaudi hat mit Hilfe von Hängemodellen ganze Bauwerke auf der Grundlage der Seillinie entworfen.

Allerdings sind die wenigsten Bögen streng nach der umgekehrten Kettenlinie geformt. Dies ist auch nicht erforderlich. Standsicher ist der Bogen schon, wenn eine Stützlinie überall in den Querschnitt passt und einen ausreichenden Abstand vom Rand aufweist. Die Stützlinie muss also nicht mit der Bogenachse identisch sein, sie kann in ihrem Verlauf von der Achse abweichen. Die meisten Bogenkonstruktionen sind so dimensioniert, dass sehr viele verschiedene Stützlinienlagen innerhalb der gegebenen Abmessungen möglich sind. In der Wirklichkeit stellt sich eine Stützlinie ein, die den Bedingungen der Elastizitätstheorie folgt und mit dieser ermittelt werden kann.

Für die Beurteilung der Standsicherheit eines Bogens ist es ausreichend, wenn man mögliche Lagen der Stützlinie ermittelt. Ist eine Stützlinie möglich, welche an jeder Stelle innerhalb des ersten Kernquerschnittes (beim Rechteckquerschnitt $e < d/6$) verläuft, dann entstehen keine Risse. Ist sie größer, dann entsteht auf der gegenüberliegenden Seite ein Riss. Bei einer Exzentrizität von einem Drittel der Bogenstärke ($e = d/3$) reißt der Querschnitt bis zur Schwerachse, also bis zur Hälfte auf. Der theoretische Grenzwert für die Exzentrizität ist die Hälfte des Querschnittes ($e = d/2$). Die Druckkraft würde dann auf der äußeren Kante des Querschnitts übertragen, die Spannung wäre an dieser Stelle unendlich groß. In Wirklichkeit kann die Spannung nicht größer werden als die Druckfestigkeit des Steins bzw. des Fugenmörtels. Die Stützlinie muss demnach einen entsprechenden Abstand von der Außenkante aufweisen. Wenn in den Querschnitt keine Stützlinie passt, ist kein Gleichgewicht möglich und der Bogen stürzt ein.

Neben der Form (Kreisabschnitt, Spitzbogen etc.) sind die Querschnittsabmessungen im Verhältnis zur Spannweite und der Öffnungswinkel des Bogens vom Scheitel bis zum Auflager für die Wirkungsweise des Bogens entscheidend. Ist der Öffnungswinkel klein, dann wird die Stützlinie meist

nur an drei Punkten sich dem Querschnittsrand nähern. Bei größeren Öffnungswinkeln kann sie sich an fünf Punkten an den Querschnittsrand nähern. Diese Situation ist ungleich gefährlicher, da schon kleine Auflagerverschiebungen die Gefahr eines Gelenkmechanismus bedeuten können.

1.2 Horizontal nachgebende Auflager

Eine häufige Schadensursache ist das horizontale Nachgeben der Widerlager. Dies ist insbesondere bei Hochbauten der Fall, bei denen der Horizontalschub von Wänden oder Pfeilern aufgenommen und über Fundamente in den Baugrund eingeleitet werden muss. In vielen Fällen ist die gesamte Konstruktion von sich aus so weich, dass infolge des Horizontalschubes erhebliche Verformungen entstehen, ohne dass eine Überlastung der Pfeiler oder Fundamente vorliegen würde. So werden in gotischen Kathedralen oft Horizontalverschiebungen an den Gewölbeanfängern gegenüber einer gedachten Vertikalen von mehreren cm bis dm gemessen, ohne dass die Standsicherheit der Gesamtkonstruktion gefährdet wäre. Für Bögen und Gewölbe bedeuten diese Verformungen jedoch eine Vergrößerung der Spannweite, die zwangsläufig zu Rissbildungen führt. Bögen und Gewölbe reagieren besonders empfindlich auf Auflagerverschiebungen.

Die Wirkungsweise unter Eigengewicht und horizontal nachgebenden Widerlager wird am Beispiel eines halbkreisförmigen Bogens beschrieben (Radius 5 m, Querschnittsstärke 25 cm, Ausmauerung bis ungefähr auf die Hälfte der Höhe) (Bild 1). Im Ausgangszustand mit starren Auflagern verläuft die Stützlinie überall im ersten Kern, der Querschnitt ist durchgehend druckbeansprucht, die Spannungen sind im Vergleich zur Steifigkeit sehr gering.

Nach einer Auflagerverschiebung von nur wenigen mm entstehen bereits tiefe Risse. Die Stützlinie nimmt die steilste mögliche Lage ein. Der Stich vergrößert sich und die horizontale Auflagerkraft wird etwas kleiner. Dabei nähert sich die Stützlinie am Scheitel an den oberen Bogenrand und es entstehen Risse auf der Unterseite. In Auflagernähe



tritt die Stützlinie an den unteren Bogenrand heran, hier entstehen Risse auf der Oberseite. In diesen Querschnitten reicht der Riss weit über die Schwerachse und es treten große Druckspannungen an den Querschnittsrändern auf. Diese Spannungen werden durch die Druckfestigkeit des Mörtels begrenzt. Wird die Druckfestigkeit des Mörtels überschritten, entstehen plastische Verformungen, man spricht von plastischen Gelenken. Der Bogen bildet einen statisch bestimmten Dreigelenkmechanismus.

Die horizontale Auflagerkraft ändert sich bei weiteren Auflagerverschiebungen zunächst kaum mehr. Erst bei Auflagerverschiebungen im Bereich von 1 bis 2 dm senkt sich der Scheitel überproportional ab (Bild 2). Die Stützlinie wird damit flacher, der Horizontalschub nimmt jetzt kräftig zu. Der Bogen stürzt ein, wenn der Scheitelbereich nach unten durchschlägt. Bei dem gewählten Beispiel ist dies bei ungefähr 20 bis 30 cm Auflagerverschiebung der Fall.

Der beschriebene Mechanismus ist weitgehend unabhängig von den Materialeigenschaften der Steine und des Mörtels. Bei einer großen Druckfestigkeit des Mörtels ist die Exzentrizität der Druckkraft sogar größer als bei einem früh plastifizierenden Mörtel. Die Risse an den Gelenken sind dann tiefer. Gibt es gar keinen Mörtel, dann stehen die Steine in den Gelenken direkt auf den Kanten. Bei größeren Querschnitten bildet sich der Dreigelenkmechanismus schon bei kleineren Auflager-

Bild 2
Klaffende Fuge am Scheitel
infolge großer Auflagerverschiebungen [Jagfeld, 2000]



Bild 3 verschiebungen. Generell bilden sich die Risse früher und ausgeprägter je steifer die Konstruktion ist.
Bogen im Seitenschiff der Abteikirche Fontenay



Bild 4 Der Mechanismus ist relativ gutmütig, da er mit recht großen Auflagerverschiebungen und auffälligen Rissbildungen einhergeht. Sehr viel gefährlicher ist es, wenn die Ausmauerung niedriger ist. Dann kann es sein, dass schon ohne Auflagerverschiebung die Stützlinie an zwei weiteren Stellen weiter unten an den äußeren Querschnittsrand reicht. Dann kann schon bei kleineren Verschiebungen ein instabiler Fünfgelenkmechanismus entstehen. Die zusätzlichen unteren Bogensegmente rotieren dabei nach außen.
Gelenkbildung und typischer Schaden (Detail aus Bild 3)

1.3 Schäden

Aus dem Verständnis der Wirkungsweise wird deutlich, dass tiefe Risse für sich genommen noch keine Anzeichen für eine Gefährdung darstellen, vorausgesetzt, es besteht nicht die Gefahr eines Fünfgelenkmechanismus. Auflagerverschiebungen von wenigen mm oder auch cm lassen sich in der Praxis nicht vermeiden. Sie entstehen oft schon durch Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter. Die in der DIN 1053-1 formulierte Bestimmung, dass der Mauerwerksquerschnitt nicht über den halben Querschnitt hinaus aufreißen darf, kann auf Bögen nicht angewendet werden. Die Situation des Dreigelenkmechanismus muss bei den meisten Bögen als Normalzustand betrachtet werden.

Trotzdem können im Zusammenhang mit derartigen Rissen Schäden und Gefährdungen entstehen: An den Rissufern kommt es häufig zu Lockerungen des Mörtels und gegebenenfalls des Putzes. Im Scheitelbereich, wo die Stützlinie nahe der Oberseite verläuft und Risse auf der Unterseite klaffen, können diese Teile abstürzen. Eine Sicherung des Materials im Bereich der Rissufer ist deshalb angezeigt. Gefährlich kann es sein, wenn nicht alle Steine über den gesamten Querschnitt durchbinden. Steine, die nicht bis in den druckbeanspruchten Teil des Querschnittes reichen, können herabstürzen.

Bei größeren Lasten können an den unteren Gelenken lokale Zerstörungen des Mörtels und der Steine auftreten (Bilder 3 und 4). Große Kantenpressungen und damit einhergehende Querzugspannungen im Stein können zu Abplatzungen führen. Diese Teile sind absturzgefährdet. Normalerweise kann sich die Stützlinie nach innen in den verbleibenden Querschnitt verlagern, sodass auch dies keine Gefährdung der globalen Standsicherheit bedeuten muss.

1.4 Sicherungsmaßnahmen

Die wichtigste Maßnahme ist die Sicherung der Auflager selbst. Am effektivsten kann dies durch eine Zugstange sichergestellt werden, welche die gegenüber liegenden Auflager miteinander verbindet und damit den Horizontalschub kurzschließt. Die Zugstange ist am günstigsten etwas oberhalb

der Auflager, innerhalb des unteren Drittels des Bogenstiches, anzuordnen. Soll die Zugkraft über dem Gewölbe kurzgeschlossen werden, ist eine biegesteife Klammer erforderlich. Eine solche Konstruktion ist meist aufwändig und macht schwere Bauteile aus Stahl oder aus Stahlbeton erforderlich.

Historische Zugglieder aus Holz müssen insbesondere dort, wo sie im Mauerwerk verlaufen, verlässlich auf Schäden untersucht werden, Anker aus Schmiedeeisen auf Kraftschlüssigkeit.

In einzelnen Fällen, vor allem dann, wenn ein Fünfgelenkmechanismus droht, kann es wünschenswert sein, bei Beibehaltung der Bogenform den Verlauf der Stützlinie zu beeinflussen. Das ist zum Beispiel durch eine Ballastierung in bestimmten Bereichen, wo eine stärkere Krümmung der Stützlinie angestrebt wird, möglich. Dies kann bei einem Spitzbogen eine Aufmauerung im Scheitel sein oder bei einem Korbbogen eine Aufmauerung im Bereich der Auflager. Zusätzliche Lasten sind allerdings immer mit größeren Kräften und damit mit einem größeren Horizontalschub verbunden.

Besser ist es, wenn durch die Reduzierung von Last die Stützlinie günstig beeinflusst werden kann. Oft ist Schutt, der sich auf dem Gewölbe angesammelt hat, unverhältnismäßig schwer. Allerdings bedarf auch das Entfernen von Lasten sorgfältiger Überlegungen. Die Standsicherheit eines Gewölbes kann von Lasten zum Beispiel in den Gewölbekesseln abhängig sein.

Es gibt historische Bögen und Gewölbe, deren zu flache Scheitelbereiche durch schmiedeeiserne Hänger nach oben in das Dachwerk gehängt werden. Damit wird Last aus dem Bogen genommen. Der große Nachteil solcher Konstruktionen ist es, dass dadurch dem Bogen zusätzliche Auflager vorgegeben werden. Diese stellen bei neuen Verformungen oder Auflagerverschiebungen Zwangspunkte dar, die eine völlig andere Bogenwirkung verursachen und neue Schäden herbeiführen. Die konstruktive Verbindung zwischen Gewölbe und Dachwerk stellt zudem eine Kopplung zwischen zwei völlig andersartigen Konstruktionen mit sehr unterschiedlichen Steifigkeiten und Einwirkungen dar. Windlasten auf das Dachwerk können Erschütterungen und wiederkehrende Verschiebungen im Gewölbe verursachen.

Eine nicht seltene historische Sicherungsmaßnahme sind hölzerne Stempel, welche zwischen dem Dachwerk und den Drittelpunkten des Gewölbes eingebaut sind und ein Ausweichen des Gewölbes nach oben verhindern. Auf diese Weise wird nur dann eine Kraft aktiviert, wenn das Gewölbe ausbrechen will; vorausgesetzt das Dachwerk setzt sich nicht auf das Gewölbe ab, was durch Feuchteschäden an den Balkenauflagern passieren kann. Auch hier werden jedoch Verformungen aus dem Dachwerk auf das Gewölbe übertragen, sodass, wenn die Standsicherheit auch ohne Stempel nachgewiesen werden kann, sich eine Lösung des Kraftschlusses empfiehlt.

Eine Zurückverformung von Bögen und Gewölben ist nur bei extremen Verformungen oder deutlich zu flachen Gewölben angemessen. Dazu ist eine vollständige Unterstützung durch ein Lehrgerüst erforderlich, welches die entsprechenden Rotationen und Translationen mitmachen können muss. Voraussetzung ist, dass der Bewegungsmechanismus detailliert vorgeplant wird und kontrolliert stattfindet. Die aufgehenden Fugen müssen nach der Rückverformung kraftschlüssig verfüllt werden.

1.5 Reparatur einzelner Steine

Der Austausch eines zerstörten Steines innerhalb eines Bogens, der nur aus einer Steinreihe besteht, ist aufwändig. Die Bogenkraft muss dazu mit Hilfe eines Lehrgerüsts aus dem Bogen genommen werden. Im Tonnengewölbe kann ein einzelner Stein einfacher ersetzt werden, vor allem wenn er aufgrund der Zerstörung schon spannungslos ist. Er muss allerdings entsprechend eingefügt und bis zur Aushärtung des Mörtels gestützt werden.

Häufig werden an den Stellen der Abplatzungen Vierungen eingesetzt (Bild 5). Die Vierung wird mit dem gesunden Teil des Steines – meist mit Epoxydharz – verklebt, die Fuge mit Mörtel verfüllt oder mit Blei verstemmt. Die Stützlinie, die sich nach dem Abplatzen nach innen verlegt hat, kann nach weiteren Auflagerverschiebungen wieder nach vorn an den Querschnittsrand wandern. Dann können erneut Schäden auftreten. Die Abplatzung hat ihre Ursache in Querspannungen, die durch die Ausbreitung der Druckkraft im Stein entstehen. Nach einer Reparatur mit Hilfe einer Vierung kommt es

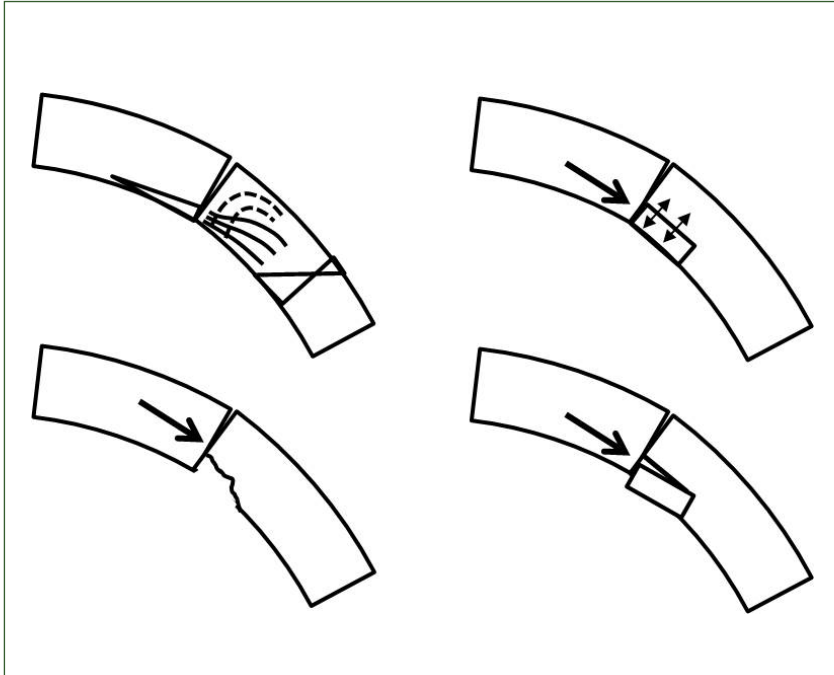


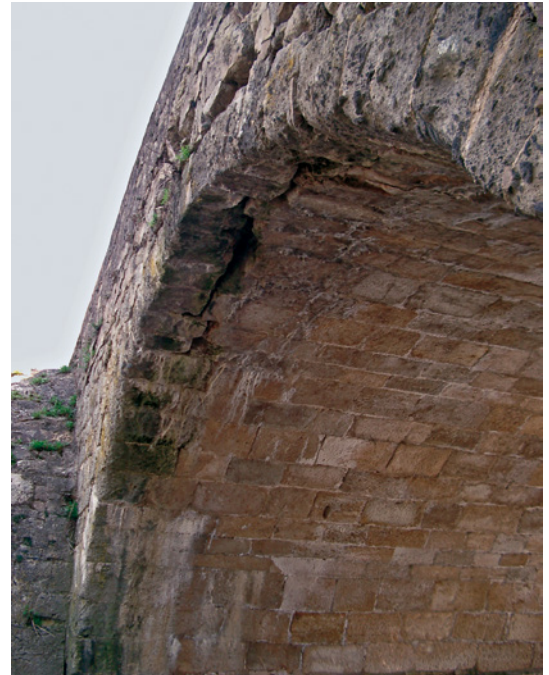
Bild 5
Reparatur eines durch
Kantenabplatzung geschädigten
Steins mit einer Vierung;
--- Zugspannungen,
— Druckspannungen

Bild 6
Längsschnitt im Tonnengewölbe
unter der Stirnmauer (Harburg,
Brücke über die Wörnitz)

wieder zu Querkzugspannungen, diesmal aber in der geklebten Fuge. Eine weitere Gefährdung kann darin liegen, dass zusätzlich zur Druckkraft eine Querkraft im Gelenk übertragen werden muss. Dann wird die Vierung zusätzlich belastet und herausgedreht. Der Ersatz des gesamten Steinquerschnittes kann deshalb in höher beanspruchten Situationen die bessere und nachhaltigere Lösung sein, auch wenn sie mit mehr Substanzverlust verbunden ist.

2 Bogenbrücken

Bogenbrücken bestehen meist aus Tonnengewölben, die hinterfüllt sind. Die Hinterfüllung kann aus losem Material wie Sand und Kies, grobem Schutt mit Bindemittel oder aus einer Hintermauerung bestehen. Dieses zusätzliche Gewicht wirkt sich auf das Tragverhalten grundsätzlich positiv aus. Gegenüber einseitigen Lasten aus Verkehr ist der vorbelastete Bogen weniger empfindlich. Die Hinterfüllung sorgt auch für eine gewisse Lastausbreitung. Stirnmauern versteifen das Tonnengewölbe ebenfalls. Allerdings entsteht hier auch ein typischer Schaden. Grobe Risse im Tonnengewölbe in Längsrichtung trennen oft den Bereich unter der Stirnmauer von dem inneren Bereich des Tonnengewölbes (Bild 6). Hierfür gibt es zwei Ursachen. Der Horizontaldruck der Hinterfüllung drückt die



Stirnmauer mit samt einem Streifen des Tonnengewölbes, auf dem sie steht, nach außen. Dies führt oft auch zu Ausbauchungen in der Stirnmauer. Das unterschiedliche Verformungsverhalten des übermauerten und dadurch versteiften Gewölbereiches im Vergleich zu dem nicht übermauerten Gewölbereich ist eine zweite Ursache. Horizontale Anker, welche die Stirnmauern zusammenhalten, sind auch in historischen Brücken häufig. Dort liegen sie meist über dem Gewölbe. Neue Anker werden durch das Gewölbemauerwerk geführt und halten das Gewölbe zusammen und damit auch die Auflagerbereiche der Stirnmauern. Das unterschiedliche Verformungsverhalten zwischen Stirnmauer und Gewölbe kann dadurch allerdings nicht unterbunden werden.

Die größte Gefährdung für Bogenbrücken ist aber das von oben eindringende Wasser. Es verursacht Auswaschungen und Auslaugungen des Fugenmörtels, was zum Herausfallen oder Absacken einzelner Steine oder ganzer Bereiche führen kann. Eine funktionierende Abdichtung ist somit grundlegender Bestandteil für jede Sanierung. Eine Entsalzung des Mauerwerks, soweit möglich, ist eine zweite, oft erforderliche Maßnahme.

Der Ersatz einzelner zerstörter oder abgestürzter Steine ist nicht ganz einfach, wenn die Oberseite des Gewölbes nicht zugänglich ist (Bilder 7 und 8).

Da die Steine nach dem Einbau noch nicht unter einer Druckkraft stehen, müssen sie während des Einbaus gesichert werden. Ein entsprechender Zugschnitt oder eine Vernadelung nach innen können erforderlich sein.

3 Kreuzgewölbe

Die geometrisch einfachste Form des Kreuzgewölbes entsteht aus der Verschneidung zweier kreiszylindrischer Tonnengewölbe. Die Kreuzgrade ergeben sich dabei zu liegenden Ellipsen. Der mittlere Gewölbebereich ist sehr flach. Beides ist für die Lastabtragung sehr ungünstig. Sehr viel besser ist die Lastabtragung, wenn die Kreuzgrade halbkreisförmig sind. Die Gurtbögen und Schildbögen sind dann meist Spitzbögen, sodass die Scheitelhöhe überall am Gewölbe gleich hoch sein kann.

Die Form der Kappenflächen ist meist sehr komplex und hängt von der Bauausführung ab. Wurden die Kappen auf einer Schalung aus geraden Brettern gemauert, sind sie einfach gekrümmt. Freihändig gemauerte Kappen sind kuppelartig gebust und damit doppelt gekrümmt.

Die Gewölbekessel über den Auflagern sind meist bis auf die Hälfte der Gesamthöhe des Gewölbes oder sogar noch höher aufgemauert. Darüber befindet sich in alten Gebäuden oft Schutt und Staub aus Jahrhunderten. Die Schildkappen sind meist nicht mit den Schildwänden im Verband gemauert. Dies erklärt sich zum einen aus dem Bauablauf. Zuerst wurden die Wände hochgemauert und damit im Verband die Gewölbeauflager hergestellt, anschließend das Dachwerk errichtet und dann das Gewölbe eingezogen. Ein zweiter wesentlicher Grund liegt im Bewegungsmechanismus bei nachgebenden Auflagern.

Im Allgemeinen sind Kreuzgewölbe aufgrund der Faltwerkwirkung und der gegebenenfalls doppelten Krümmung der Kappen sehr steife Gebilde. Wirkliche Gefährdungen entstehen oft durch Einzellasten aus dem darüber liegenden Dachwerk, wenn Lasten unsachgemäß auf das Gewölbe abgesetzt werden.

Ansonsten ist der wichtigste Lastfall wieder das horizontale Nachgeben der Auflager (Bilder 9, 10 und 11). Es bildet sich dabei im Prinzip der gleiche



Bewegungsmechanismus wie beim Bogen aus. Im Scheitel entsteht anstatt eines Gelenks eine Gelenklinie entlang des Scheitels der Gurtkappen, welche durch einen auf der Unterseite klaffenden Riss sichtbar wird. Die unteren Gelenke sind kurze Gelenklinien in den Gurtkappen mit oben klaffenden Rissen. Die Schildkappen bewegen sich mit den Gurtkappen. Sie lösen sich deshalb von den Schildwänden ab. Es bilden sich Klaffungen zwischen Schildkappe und Schildwand, die oben am größten sind, nach unten kleiner werden und dann

Bild 7

Neu eingebaute Steine (hellere Farbe) und Vorbereitung zum Verpressen der Hohlräume in einem Brückengewölbe [Foto: H. Maus]

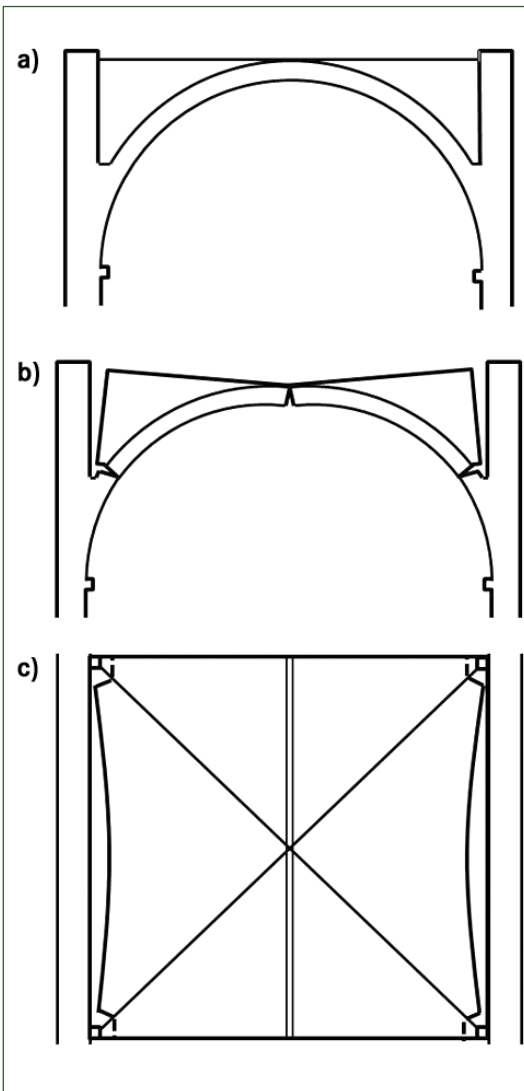
Bild 8

Einbau eines neuen Steines in einem Brückengewölbe [Foto: H. Maus]

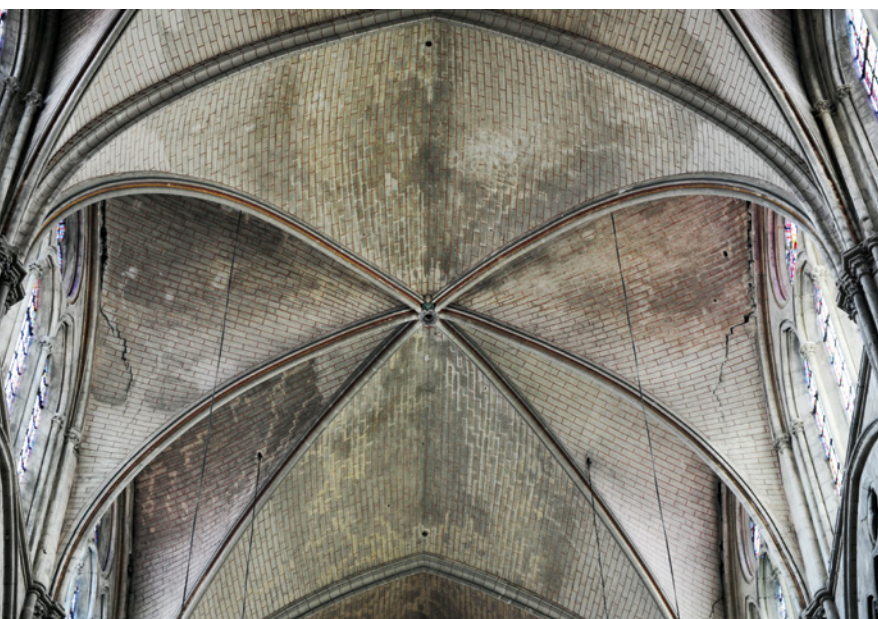
Bild 9

Kreuzgewölbe

- a) starre Auflager
- b) horizontal nachgebende Auflager
- c) Untersicht

**Bild 10**

Mittelschiffgewölbe der Kathedrale Saint-Étienne in Bourges;
die Schildkappen reißen von der Schildwand ab



als dünner werdende Risse nach innen zu den unteren Gelenken springen. In manchen Fällen entstehen auch Risse in den Schildkappen parallel zu den Schildwänden. In der damit entstandenen Konfiguration wird somit das gesamte Gewicht des Gewölbes über die vier unteren Gelenke abgetragen.

Gefährdungen entstehen am Riss entlang dem Scheitलगelenk, wenn Mörtel- oder Stuckteile abstürzen. Die Klaffungen zwischen Schildkappe und Schildwand sind oft mehrere cm groß, in Kirchenschiffen auch einmal 10 cm oder noch mehr. Oft wurde der Spalt in früheren Zeiten schon mit Steinen ausgezwängt. Bei weiteren Verformungen können diese herausfallen. Überhaupt muss dieser Bereich als Bewegungsfuge gesehen werden. In hohen Kirchenschiffen kann die Spannweite der Gewölbe zwischen Sommer und Winter um mehrere mm schwanken, was Feinmessungen immer wieder ergeben. Diese Verformungen machen sich entlang der Fugen zwischen Schildkappe und Schildwand bemerkbar. Ein dauerhaftes Schließen der Risse kann somit nicht erzwungen werden, sinnvoller ist es, die Rissufer zu sichern und Bewegungen zuzulassen.

4 Rippengewölbe

Mächtige Rippen unter Tonnen- oder Kreuzgewölben wirken oft, als ob sie die allein tragenden Bauteile seien. Filigrane Rippen unter spätgotischen Gewölben wirken wie leichte Schmuckteile, die am Gewölbe nur angehängt sind. In Wirklichkeit gibt es alle Zwischenstufen und immer wieder konstruktive Überraschungen.

Als ein grundsätzliches Charakteristikum kann die konstruktive Verbindung zwischen Rippe und Gewölbe dienen. Rippen, die im Verband mit dem Gewölbe gemauert sind, übernehmen den Anteil an der Lastabtragung, der dem Verhältnis der Steifigkeiten zwischen Rippe und Gewölbe entspricht. Als allein tragende Teile können sie nicht bezeichnet werden. Auch im Kreuzgewölbe wirken Kreuzrippen, die im Verband gemauert sind, lediglich als Verstärkung und sind hauptsächlich aus dem Bauablauf erklärbar. Die Ausbildung eines Verbandes im Sinne einer Verzahnung mit dem Gewölbe

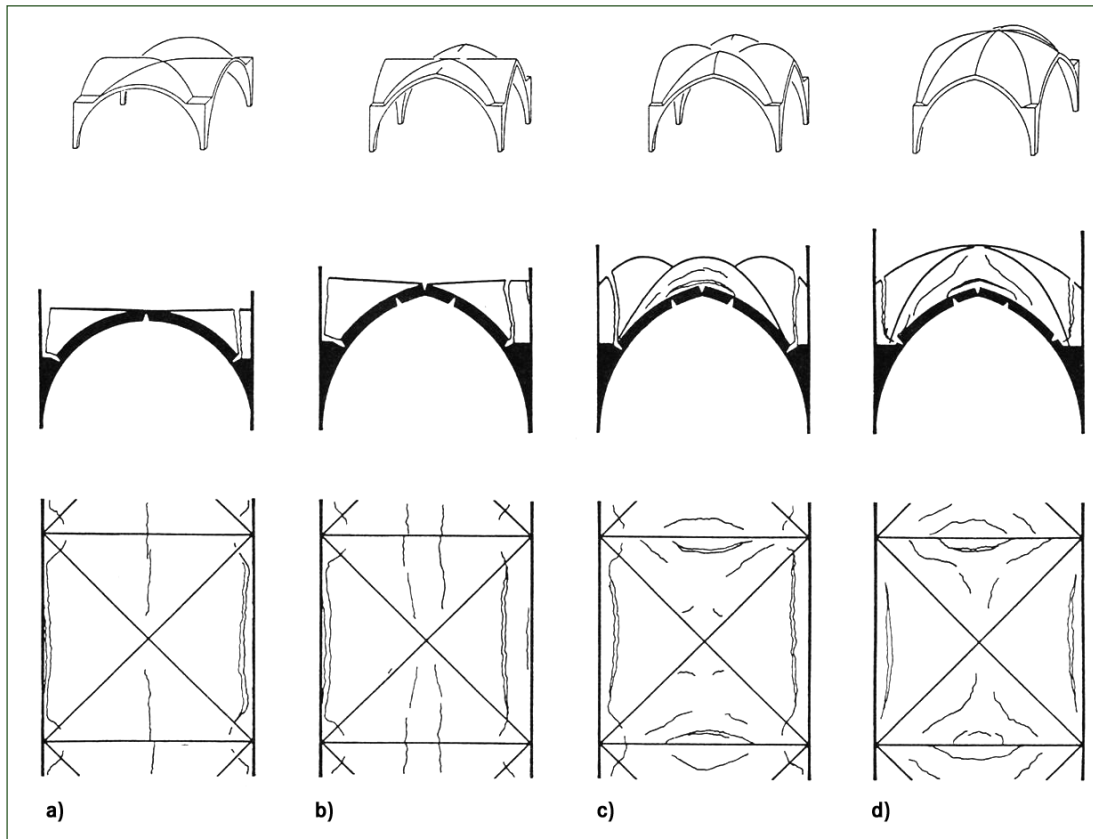


Bild 11
Rissbildungen in Kreuzgewölben
a) kreisförmiges Kreuzgewölbe
b) spitzbogiges Kreuzgewölbe
c) Kreuzgewölbe mit gebogenen Rippen
d) kuppelartiges Kreuzgewölbe
[Barthel, 1991]

ist geometrisch sehr schwierig herzustellen. Einfacher herzustellen sind Rippen, die mit ihrem Rücken in das Gewölbe einbinden und ein Auflager für die Kappen bilden. Der Begriff Auflager gilt auch hier nur für den Bauablauf. Im fertigen Gewölbe tragen die Kappen im Allgemeinen ihre Lasten selbst oder im Verbund mit den Rippen ab.

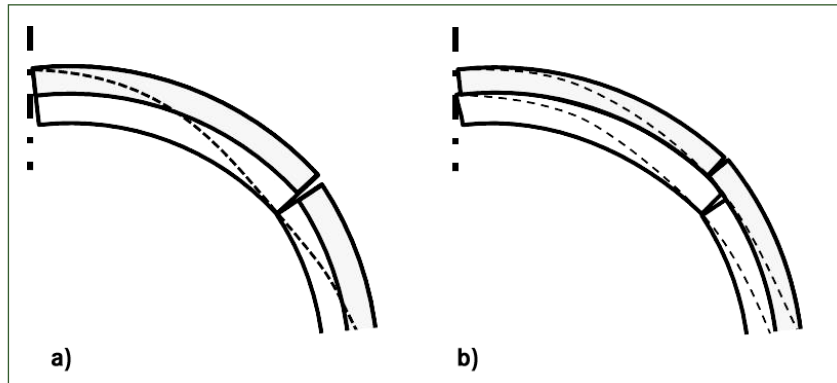
Rippen ohne konstruktiven Verbund sind nur über eine Mörtelfuge mit dem Gewölbe in Kontakt. Die Rippen müssen deshalb eine eigene Bogenwirkung ausbilden. Über die Kontaktfläche zum Gewölbe ist lediglich eine gewisse Stabilisierung möglich.

Bei horizontal nachgebenden Auflagern reagieren die beiden Systeme sehr unterschiedlich (Bild 12). Rippen im Verbund mit dem Gewölbe können, wenn sich die Gelenke in Auflagernähe an der Innenseite der Rippe einstellen, an dieser Stelle tatsächlich zum allein tragenden Element werden. Das Gewicht des Gewölbes wird dann über große Druckkräfte über das Gelenk an der Unterkante der Rippe abgetragen. Hier können dann Schäden infolge Abplatzungen am Gelenk entstehen. Das Versagen tritt durch die Überschreitung der Quersug-

festigkeit des Steines ein. Die Stützlinie verlagert sich dann nach innen in die Rippe oder sogar in das Gewölbemauerwerk. Am oberen Gelenk klappt die Rippe über den gesamten Querschnitt auf. Wenn hier die Rippensteine nicht bis in den überdrückten Bereich an der Oberseite einbinden, besteht die Gefahr, dass solche Steine herabstürzen. Besonders gefährdet sind hier schwere Schlusssteine.

Rippen ohne Verbund können bei nachgebenden Auflagern ihren eigenen Gelenkmechanismus ausbilden. Es entsteht dann eine Ablösung von dem Gewölbe entlang dem Rücken der Rippe, da hier gegenseitige Verschiebungen stattfinden. Dies kann bei größeren oder sich wiederholenden Auflagerverschiebungen zu einer völligen Loslösung der Rippen führen. Auch hier entstehen Schäden an den Gelenken in den Rippen in Form von Abplatzungen, auch wenn die Kräfte wesentlich kleiner sind.

Die Reparatur von geschädigten oder zerstörten Rippen hängt von der konstruktiven Situation ab. Im Verband mit dem Gewölbe gemauerte Rippensteine werden oft ohne größere Baubehelfe ausge-

**Bild 12**

- a) Stützlinie in einer Rippe mit Verbund zum Gewölbe
 b) getrennte Stützlinien in Gewölbe und in Rippe ohne Verbund bei nachgebenden Auflagern

baut und ersetzt. Dies ist selbstverständlich nur dann möglich, wenn die Kraft sich bereits in das Gewölbe verlagert und damit im Gewölbemauerwerk verteilt hat. Zum Austausch von Rippensteinen ohne Verbund muss die gesamte Rippe mit Hilfe eines Lehrgerüsts unterstützt werden.

Häufig werden sich lösende Rippen mit Hilfe von Eisenschlaudern in das Gewölbe hochgehängt. Dies kann eine sinnvolle lokale Maßnahme sein, wenn dadurch die Tragwirkung unterstützt wird. Kontraproduktiv ist die Maßnahme, wenn dadurch ein Festpunkt innerhalb einer Rippe geschaffen

wird, die ihren eigenen Bewegungsmechanismus ausbilden können muss.

Voraussetzung für jede sachgemäße Instandsetzung eines Gewölbes ist eine sorgfältige Bau- und Schadensaufnahme, welche ein verformungsgeRechtes Aufmaß, Erkundungen zu konstruktiven Details, eine Rissaufnahme und Materialuntersuchungen einschließt. Bögen und Gewölbe sind Tragwerke. Die Beurteilung von Schäden, Verformungen und schließlich der Standsicherheit sollte grundsätzlich von einem erfahrenen Ingenieur vorgenommen werden. Dies gilt auch, wenn »nur« einige Putzteile heruntergefallen sind oder sich »nur« eine Rippe etwas gelöst hat. Vom Ingenieur ist allerdings zu fordern, dass er die Ursachen der Schäden lückenlos aufklärt und diese auch den anderen Beteiligten verständlich erläutern kann. Eine entsprechende Darstellung und Dokumentation ist zwingend. Die Einholung einer zweiten Meinung in Form eines zweiten Gutachtens sollte nicht als ehrenrührig empfunden werden. Auch kann zum Beispiel das Heranziehen eines Prüfindgenieurs sinnvoll sein, auch wenn dies formal nicht zwingend ist.

Literatur und Quellen

- [Hart, 1965] Hart, F., (1965): Kunst und Technik der Wölbung. München
- [Ungewitter, Mohrmann, 1890-91] Ungewitter, G., Mohrmann, K., (1890-91): Lehrbuch der gotischen Konstruktionen. 3. Auflage, Leipzig
- [Holzer, 2013] Holzer, St. M., (2013): Statische Beurteilung historischer Tragwerke. Band 1 Mauerwerkskonstruktionen, Berlin
- [Heyman, 1995] Heyman, J.: The stone skeleton: structural engineering of masonry architecture, Cambridge 1995
- [Harvey, 1991] Harvey, W.: Stability, strength, elasticity and thrustlines in masonry structures. In: The Structural Engineer, 69, 1991, S. 181-184
- [Barthel, 1991] Barthel, R., (1991): Tragverhalten gemauerter Kreuzgewölbe. Institut für Tragkonstruktionen, Univ. Karlsruhe (Hrsg.): Aus Forschung und Lehre, Heft 26
- [Jagfeld, 2000] Jagfeld, M., (2000): Tragverhalten und statische Berechnung gemauerter Gewölbe, bei großen Auflagerverschiebungen – Untersuchungen mit der Finite-Element-Methode. Aachen

Sanierung von Stützmauern – Statik und Verfahren

Die Standsicherheit historischer Stützmauern aus Natursteinen kann auf der Grundlage heutiger Normen oft nicht beurteilt werden. Derartige historische Bauwerke sind gesondert zu untersuchen und von Fall zu Fall zu bewerten. Dennoch erlauben neue Verfahren aus dem Bereich der Mauerwerkssanierung eine denkmalgerechte, technisch korrekte und kostengünstige Sicherung und Sanierung. Untersucht wird z. B. das Verhalten von Stützmauern und ihre geotechnischen Sicherung.

Erwin Schwing

Schlagwörter: Mauerwerk, Naturstein, Versagensmechanismen, Stützmauern, Standsicherheitsberechnungen, Grenzzustände, Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Bodenvernagelung

1 Gefährdete Stützmauern

Viele alte Stützmauern bedürfen der Sanierung. Überhänge, Ausbauchungen und Risse treten hervor. Doch das ist nicht immer so. Oft kommt es auch zu Einstürzen von sanierten Mauern, bei de-

nen keine sichtbaren Spuren zu erkennen waren (Bild 1). Einer erforderlichen Sicherung muss eine umfassende Untersuchung vorausgehen. Die Aufnahme der Bauwerksschäden und alte Aufzeichnungen leisten dabei wertvolle Hilfe. In der Regel muss im Einzelfall ein maßgeschneidertes



Bild 1
Teileinsturz einer Natursteinmauer durch Verlust der Tragfähigkeit



Bild 2 Versagen der Mauer in Teilen – Untersuchungprogramm erarbeitet werden
Verlust der Gebrauchstauglichkeit [Schwing, 1991]. Ein allgemeingültiges Konzept kann nicht angegeben werden.



Bild 3 Starke Verformungen der Mauer bedingen Risse
Die momentane Standsicherheit aus geotechnischer Sicht lässt sich am genauesten mit statistisch – probabilistischen Nachweisverfahren erklären [Gudehus, 1987]. Ausreichende Daten müssen dazu vorliegen. Der Nachweis mit einem globalen, auf Kräfte bezogenen Sicherheitsbeiwert ist in den meisten Fällen ungeeignet, die Standsicherheit richtig zu beurteilen [Schwing, 1991].

Wenn Mauern gefährdet sind, ist eine Therapie erforderlich, um sie zu sanieren. Zweck der Therapie

muss sein, das Versagen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit auszuschließen. Mit Hilfe eines Sicherheitsnachweises auf statistischer Grundlage gelingt es, das Sicherheitsniveau der alten Stützkonstruktion nach der Sanierung zu quantifizieren und dem von Neubauten anzugleichen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die dazu erforderlichen Kennwerte vorliegen und alle beanspruchten Bauteile ausreichende Tragfähigkeit aufweisen.

Leider ist dem nicht so beim Mauerwerk. Altes Mauerwerk lässt sich nicht in ein Normkorsett zwingen, was allerdings oft fälschlicherweise getan wird. Angaben über die Festigkeit sind nicht möglich, da eine Eignungsprüfung grundsätzlich nicht durchgeführt werden kann. Die Anwendung von Tabellenwerten ist nicht zulässig, da die dazu erforderlichen Voraussetzungen in keiner Weise eingehalten werden. Hinzu kommen zeitliche Veränderungen in der Zusammensetzung des Mörtels z. B. durch Wasserwirkung, Verwitterung der Steine selbst und Störungen im Gefüge durch die Wurzelbildung bei bewachsenen Mauern.

2 Schadensbilder

2.1 Ausblühungen

Die Folgen früherer missglückter Sanierungsversuche sind oft zu erkennen. Falsch eingesetzte Materialien führten zu unverträglichen Mischungen und haben mit chemischer Umsetzung tragende Steine gelöst und den Zerfall beschleunigt. Ausblühungen lassen auf mineralogisch-chemische Unverträglichkeit und Belastungen schließen.

2.2 Ausbauchungen

Ständige Durchfeuchtungen infolge des Niederschlagswassers haben die ehemals kompakte mineralische Verbindung der Steine mit dem Füllmörtel im Innern der Wand gestört und die Festigkeit des Mauerwerksverbandes nahm ab. Frostwirkungen im Kernbereich können den Zerfall beschleunigen. Beim Übergang von darin eingeschlossenem Wasser zu Eis findet eine Volumenvergrößerung statt, Steine werden gesprengt und/oder heraus getrieben. Alle diese Prozesse über-

lagern sich und führen dann allmählich zu Ausbauchungen und schließlich zum Ausknicken (Abplatzen) von Mauerwerksteilen (Bild 2).

2.3 Überhänge

Selbst die bei ihrer Errichtung leicht zum Erdreich hin geneigten Mauern können sich zum Teil stark über die Vertikale nach vorn neigen. Die Auslenkung wächst dabei vom Fuß der Wand nahezu linear. Oft wurden an der Krone bis zu 15 % der Wandhöhe gemessen [Schwing, 1991]. Aufgrund der räumlichen Tragwirkung haben diese Kopfverschiebungen bei lang gestreckten Wänden im Grundriss einen in etwa parabelförmigen Verlauf. Oft in der Nähe einer steiferen Wandecke beginnend, wachsen sie mit zunehmendem Abstand an, erreichen ein Maximum und gehen dann wieder zurück. Bei kürzeren Wandabschnitten ist dieser Verlauf nicht zu erkennen. Der Überhang der Mauer ist über die ganze Wandlänge gleichmäßig. Überstände von Steinen in den einzelnen Lagerfugen sind meist nicht zu erkennen. Die Annahme, dass sich die Mauer als Block verhält, ist dadurch gerechtfertigt.

2.4 Risse

Mit den Verformungen gehen Risse in den Mauern einher. Deren Ausprägung hängt stark von der Festigkeit des Mauerverbandes ab (Bild 3). Je schwächer er ist, umso duktiler verhält sich die Mauer. Bis es zur Rissbildung kommt, hat die Wand bereits große Verformungen erlitten. Weitere Verschiebungen des Erdreichs z. B. sind dann die Ursache für ein Aufweiten der Risse. Ist der Verband fester, weist die Mauer sprödes Verhalten auf. Bei geringen Verschiebungen treten dann ohne Vorankündigung durchgehende Risse in der Wand auf, die selbst durch die Steine verlaufen können [Schwing, 1991]. Dieses Verhalten ist gefährlicher, da sich ein Kollaps ohne merkliche äußere Zeichen einstellen kann.

Von besonderem Interesse ist die Lage der Risse. Die Mauern haben im Grundriss selten einen geraden Verlauf. Sie weisen Ecken und Rundungen auf und sind oft durch Aufgänge unterbrochen. Beim Überschreiten der mit der Zeit abnehmenden Zug-

festigkeiten entstehen Risse in den abseitigen Wänden. Mit der Rissbildung ist eine Lastumlagerung verbunden. Das Verhalten der Mauer nähert sich ebenen Bedingungen. Gleichzeitig entstehen – genügend große Verformungen vorausgesetzt – an der Oberfläche der Hinterfüllung ebenfalls Abrisskanten. Solche Art von Rissen ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass sich die Wand in der Nähe des Grenzzustandes der Tragfähigkeit befindet und dass sich ihr Verhalten wiederum als Monolith beschreiben lässt.

Aufgrund des äußeren Erscheinungsbildes kann nicht ohne weiteres gesagt werden, wie groß der Abstand zum Grenzzustand des Versagens ist. Weitergehende Untersuchungen sind dringend erforderlich.

3 Statischer Nachweis der Standfestigkeit einer unverstärkten Gewichtsmauer

3.1 Bruchmechanismus

Durch Zerfall und Erosion des Mörtels (selten auch der Steine) kann das Mauerwerk so schwach werden, dass es sich stark verformt oder bricht. Dann ist eine schonende Injektion zur Stabilisierung angebracht. Die Injektion kann aber wiederum zu weiteren Versagensmechanismen führen. Schon die Erschütterungen beim Bohren können loses Mauerwerk zu Bruch bringen, Spülen und Einpressen zum hydraulischen Bruch führen. Unverträgliche Mischungen können tragende Steine heraus treiben und den Zerfall sogar beschleunigen.

Ein allmähliches Versagen des Bodens ist denkbar, aber bei alten Stützmauern wohl eher auszuschließen. Der Boden wurde ja schon so lange beansprucht, dass er sich kaum weiter verschlechtern kann. Vorauszusetzen – und in Zweifelsfällen nachzuweisen – ist aber, dass die Entwässerung des Bodens nach der Sanierung nicht schlechter als vorher ist, sondern allenfalls besser.

Durch ein Aufmaß lassen sich nur die Höhe der Hinterfüllung, die Böschungsneigungen sowie die Ausformung der Wand an ihrer Vorderseite zuverlässig ermitteln. Andere geometrische Größen

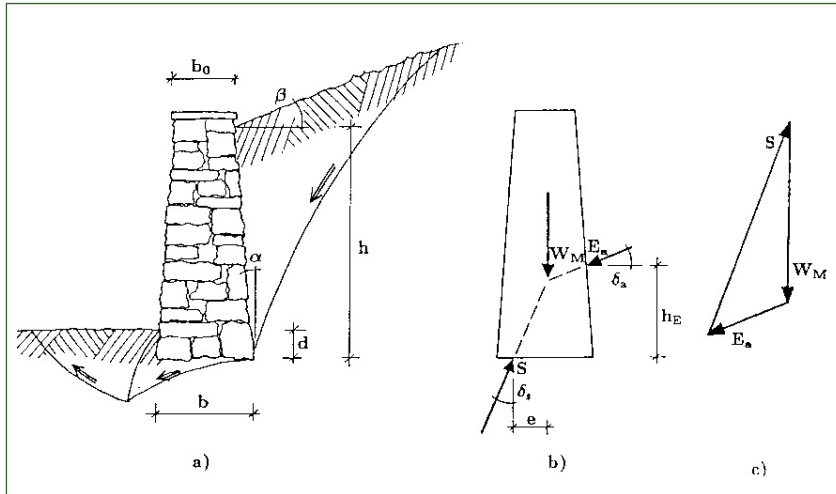
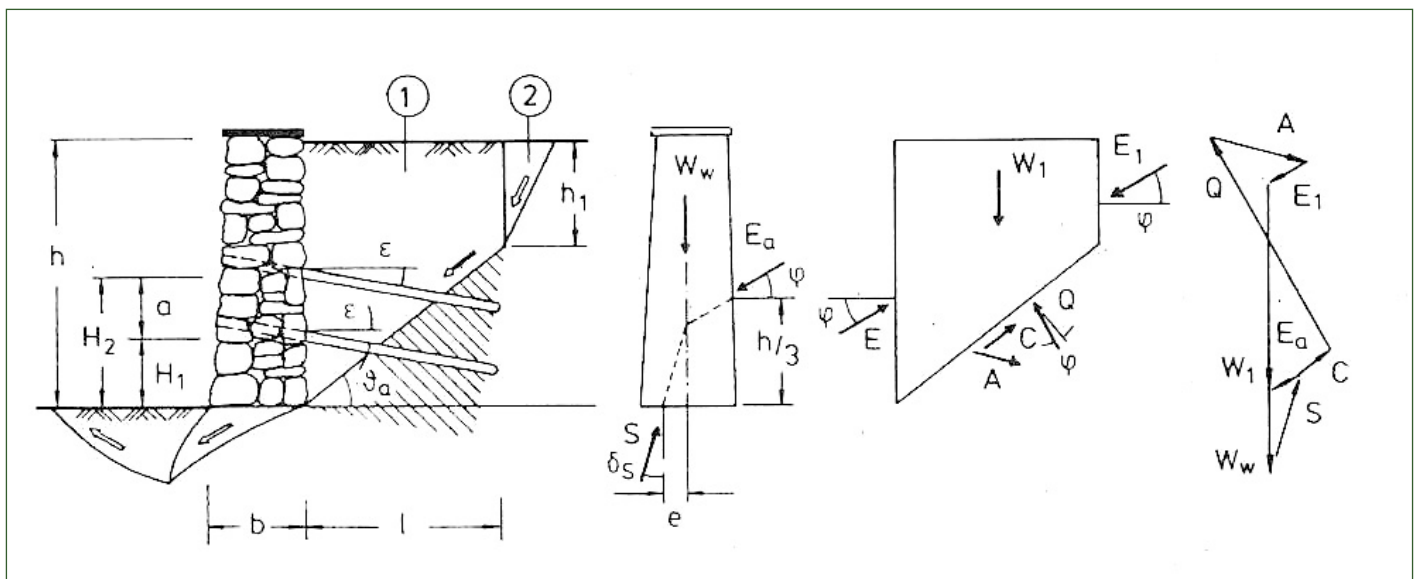


Bild 4 (Mauerstärke, Ausbildung an der Rückseite, Gründungstiefe), die wichtige Informationen zur Beurteilung liefern, erfordern geringfügige Eingriffe in die Bausubstanz (Stichproben).

Wenn eine so genannte Gewichtsmauer in sich heil bleibt, kann sie als Monolith versinken, abgleiten oder kippen. Bei rauer Rückseite und Sohle ist bevorzugt ein kombinierter Bruch zu erwarten, bei dem gekrümmte Gleitflächen im Boden auftreten (Bild 4). Im Grenzzustand stehen drei Kräfte im Gleichgewicht (Bild 4b und c): das Mauergergewicht, der aktive Erddruck und der Sohlerdrück. So bleibt als Bedingung für das Grenzggleichgewicht, dass die Resultierende aus dem Erddruck und dem Mauergergewicht ebenso groß wie die Grundbruchlast ist. Der Mechanismus in den Grenzzuständen Gleich-

Bild 5 Versagensmechanismus einer vernagelten Gewichtsmauer



ten, Kippen und zum Grundbruch unter schräger außermittiger Last ist mit ausreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen, wenn die Grenzbedingungen auch mit passend abgeminderten Widerständen nicht verletzt ist. Dazu dienen die Teilsicherheitsbeiwerte, die in der Norm DIN 1054 festgelegt sind.

3.2 Sicherungsverfahren

Die Untersuchung der Standsicherheit einer alten Stützmauer muss eindeutig klären, ob und wie die Mauer zu sichern ist, damit die Wand über eine absehbare Zeit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit nicht versagt. Falls die Mauer gerade noch hält, die Sicherheit also etwa »1« beträgt, wird das Versagen verhindert, indem zum Beispiel die Scherparameter erhöht beziehungsweise die Mauer verbreitert oder vertieft werden. Wenn die Mauer offensichtlich nahe dem Mechanismus von Bild 4 ist, sind die mittleren Scherparameter zu berechnen. Auf dieser Grundlage ist dann die Sicherung ausreichend zu dimensionieren.

Die Erhöhung der Scherfestigkeit bedeutet nichts anderes als eine Verfestigung des Bodens. Dazu eignet sich eine Injektion, die aber oft zu teuer ist. Es ist auch möglich, Teile des Bodens hinter der Mauer als Verbreiterung des Querschnitts oder darunter als Unterfangung mit hohem Druck auszuspülen und mit Mörtel zu verfüllen. Dieses so genannte Düsenstrahlverfahren ist ebenfalls teuer

und für die meisten Stützmauern wegen der hohen Druckbelastung auch gefährlich.

Einfacher, schonender und zudem weniger gefährlich ist es, wenn die vorhandene Mauer mit dem dahinter liegenden Erdreich mit Bodennägeln verbunden wird. Diese bewehren den Hinterfüllboden und erhöhen damit dessen Festigkeit. Die Wirkungsweise gleicht den Stahleinlagen beim Stahlbetonbau. Im Gegensatz zu Verankerungen im Grundbau werden die Erd- bzw. Bodennägel nicht vorgespannt, sondern schlaff eingebaut und über die gesamte Länge mit dem umgebenden Erdreich vermörtelt. Mittels Verpressen erreicht man einen besseren und gleichmäßigeren Verbund zwischen Nagel und Boden [Gäbler, 1987].

4 Sicherung der Gewichtsmauer mit Bodennägeln

4.1 Bruchmechanismus der Vernagelung

Wenn die Mauern nicht ausreichend standsicher sind, muss die Belastung aus Erddruck auf sie reduziert werden. Zur Belastungsminderung wird das Verfahren der Bodenvernagelung gewählt. Das System der Bodenvernagelung wurde vor ungefähr dreißig Jahren zur Sicherung von Baugruben entwickelt und hat sich seither vielfach bewährt. Die Grundlagen zum Tragverhalten vernagelter Erdkörper sind von [Gäbler, 1987] ausführlich beschrieben worden. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit kann vereinfacht mit Translationsmechanismen aus einem bzw. zwei starren Körpern wiedergegeben werden (Bild 5).

Es bildet sich ein so genannter zusammengesetzter Bruchmechanismus aus zwei kombinierten Teilsystemen, einen mit Bodennägel verstärkten Erdkörper und der Gewichtsmauer auf nachgiebigem Untergrund, wiederum mit den Grenzzuständen Gleiten, Kippen und zum Grundbruch unter schräger außermittiger Last. Die Grenzzustandsgleichung wird aus dem Gleichgewicht aller Kräfte formuliert [Schwing, 1991].

4.2 Standsicherheitsnachweis

Durch die Anordnung von Bodennägeln wird die Wand zu einem großen Teil vom Erddruck entlastet. Soll die Mauer ganz vom Erddruck entlastet werden, muss sie sich nur noch selbst tragen. Für den vernagelten Bodenkörper gelten dann die Ausführungen von [Gäbler, 1987] uneingeschränkt.

Mit der Mauerhöhe, der Wandneigungen an der Vorder- und Rückseite, der Böschungsneigung, den Bodenkennwerten der Hinterfüllung, der Nagelanordnung und dem resultierenden Herausziehwiderstand ergibt sich der reduzierte Erddruck aus dem Gleichgewicht aller Kräfte [Schwing, 1991].

Bisher fehlte ein objektives, bauwerkübergreifendes Sicherheitsmaß. Mit den »Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen« (GruSiBau) liegt seit 1981 eine Richtschnur für bauartübergreifende Sicherheitsuntersuchungen vor. Mit einem geforderten Sicherheitsniveau besteht ein eindeutiger Zusammenhang [Hasofer, Lind, 1974]) mit der Versagenswahrscheinlichkeit. Die neue DIN 1054 aus 2010 lässt einen Nachweis der vorgestellten Art nicht zu. Sie schreibt für die in die Berechnung eingehende Größen feste Teilsicherheitsbeiwerte vor. Wie bereits 1990 in [Schwing, 1991] gezeigt wurde, kann mit der Wahl von konstanten Teilsicherheitsbeiwerten, die allerdings von denen der Norm abweichen, ein ausreichend homogenes Sicherheitsniveau erreicht werden. Abweichungen von einem vorgegebenen Sicherheitsmaß nach oben oder unten sind jedoch unvermeidlich. Auch die Ermittlung der Bemessungsgrößen ist verschieden.

Das Hauptproblem bei der Vernagelung einer alten Stützmauer stellt der Anschluss der Nägel an die Wand dar. Damit die Sanierung erfolgreich verläuft, sind alle Kräfte, die sich im Boden aufbauen, am Nagelkopf sicher einzuleiten. Der Anschluss lässt sich dabei unterschiedlich ausbilden. Optische Vorbehalte oder denkmalpflegerische Bedenken sprechen meist gegen Befestigungselemente an der Vorderseite der Stützmauer. Um keine sichtbaren Spuren zu hinterlassen, können die Nägel somit nur in oder hinter der Wand befestigt werden.

4.3 Sanierungsablauf

Für jedes Bauwerk ist ein maßgeschneidertes Sanierungskonzept zu entwerfen und zu bemessen. Bisher hat sich folgende Vorgehensweise bei der Sanierung historischer Gewichtsmauern aus Naturstein bewährt:

- Zunächst sind der vorhandene lose Fugenmörtel und/oder der Bewuchs der Ansichtsfläche zu entfernen. Nach der vorsichtigen Reinigung der Steinoberfläche in den Stoß- und Lagerfugen zur Erzielung einer sauberen Kontaktfläche wird der neue Fugenmörtel maschinell vollflächig aufgebracht. Nach kurzer Abbindezeit werden die Steinflächen vom überschüssigen Material mit Wasserstrahl gereinigt.
- Die bisherige Erfahrung zeigt, dass der Zustand des Mauerwerkverbandes bei den meisten alten Mauern mehr als schlecht zu beurteilen ist. Zur Verbesserung des Mauerwerkverbandes werden daher die Hohlräume im Mauerkern verfüllt. Eine nur qualitative – nicht

quantifizierbare – Verbesserung ist durch die Vermörtelung des Mauerkerns zu erreichen. Unter geringem und kontrolliertem Druck wird ein hochfließfähiger und schwindarmer Mörtel verpresst. Als Verpressgut und für den Fugenmörtel haben sich einige Trasskalke bewährt, die mit den vorhandenen Materialien mineralisch verträglich sind. Ausblühungen können bei Zutritt von Feuchtigkeit nicht sicher ausgeschlossen werden, da durch die Verwitterung der Zuschlagstoffe des Altmörtels Komponenten, die Salze aufbauen, freigesetzt wurden.

- Anschließend werden die statisch erforderlichen Verstärkungsmaßnahmen durchgeführt. Nagellängen und Anordnung der Nägel sind, um die Eingriffe so gering wie möglich zu halten, zu optimieren. Der dabei zu Grunde gelegte Herauszieh Widerstand der Nägel ist durch Probelastungen zu bestätigen. In der Berechnung angenommene, nicht nachweisbare und/oder belegbare Rechenannahmen sind durch Bauteilversuche zu erbringen.

Literatur und Quellen

[Gäbler, 1987] Gäbler, G., (1987): Vernagelte Geländesprünge – Tragverhalten und Standsicherheit. Veröffentlichung des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 108

[Gudehus, 1987] Gudehus G., (1987): Sicherheitsnachweise für Grundbauwerke. Geotechnik 10, Heft 1, S. 4–34

[Hasofer, Lind, 1974] Hasofer, A. M., Lind, N. C., (1974): Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal Eng. Mech. Div. ASCE, Volume 100, EM1, S. 111

[Schwing, 1991] Schwing, E., (1991): Standsicherheit historischer Stützwände. Veröffentlichung des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 121

Beispielhafte statische Sicherung von Natursteinwänden

Statische Sicherungen von einsturz- bzw. kippsgefährdeten sowie ausgebauchten Natursteinwänden werden oft in interner Form vorgenommen. Darüber hinaus sind aber auch externe Lösungen möglich. Wandinterne Beispiele von verschiedenen Verankerungs- und Vernadelungssystemen werden an den Beispielen »historische Stadtmauer Hildburghausen« sowie »Magdeburger Dom/Südturm« vorgestellt. Eine externe Variante in Form einer konventionellen Unterfangung kombiniert mit einer Sicherung mittels Rückverankerung einer stark kippsgefährdeten Natursteinmauer an eingespannte Sichtbetonstützen, die denkmalpflegerische Kompromissbereitschaft forderte, ist am Beispiel des »Steintores in Creuzburg« aufgezeigt.

Ronald Betzold

Schlagwörter: statische Sicherung, Vernadelung, Verankerung, konventionelle Unterfangung, Mauerwerks-ertüchtigung, Rückverankerung

1 Erdverankerungen an der historischen Stadtmauer Hildburghausen

1.1 Schadbild

Im Februar 2009 kam es zu einem Teileinsturz der Stadtmauer von Hildburghausen in einer Länge von ca. 10 m. Als Konsequenz aus dem Einsturz wurde die Sanierung eines erweiterten Abschnittes beschlossen. Die Bearbeitung umfasste die statische Sicherung sowie die Steinrestaurierung der Mauerfassade eines ca. 100 m langen Abschnittes der historischen Stadtmauer (Bild 1). Das gesamte 5 m

hohe Wandmauerwerk wurde mittels differenzierter Erdverankerungen gegen Umkippen gesichert.

1.2 Statische Sicherung

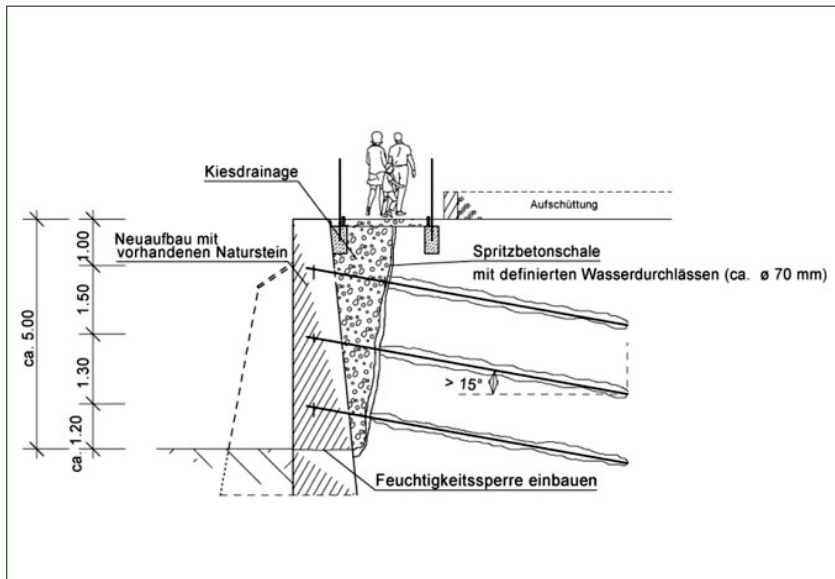
Im Bereich der Einsturzstelle ist als dauerhafte Baugrubensicherung eine perforierte und bewehrte Spritzbetonschale mit einer Schalendicke von ca. 25 cm eingebaut worden (Bild 2).

Die Entwässerungsdurchlässe innerhalb des gesamten Wandbereiches mit Durchmesser von 70 mm dimensionierten sich auf ca. 1 Stück/2 m². Es erfolgte flankierend eine Anpassung und statische



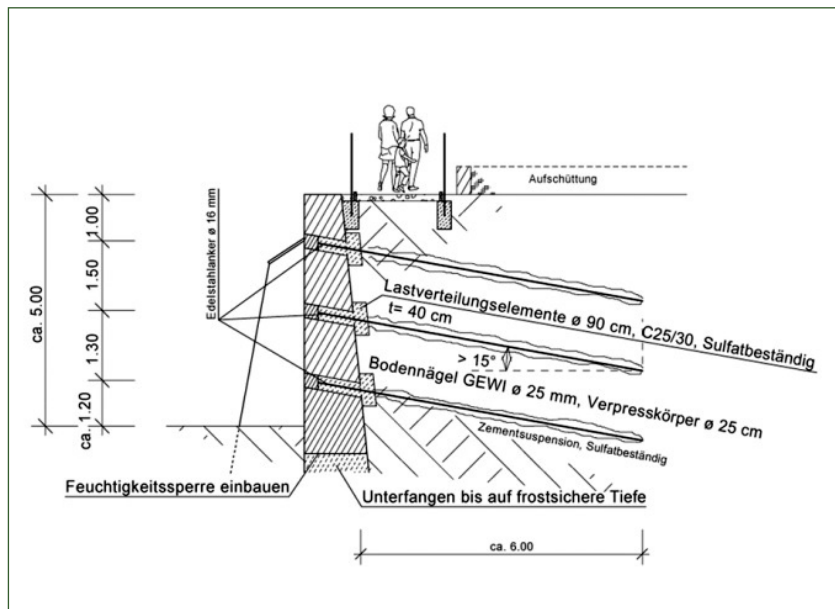
Bild 1
Einsturzstelle an der Stadtmauer

Bild 2
Spritzbetonschale mit einzu-mauernden Dauerankern



Bereich mittels verformungsrelevanter Auskeilungen gesichert worden.

Als Hauptsicherungsmodul wurden in drei Vertikalniveaus die Mauerwerkswände durchbohrt, hinter dem Mauerquerschnitt im Schleuderverfahren für jeden Bodennagel ein Hohlraum von 40 cm Dicke und 80 cm Durchmesser geschaffen und die Dauerbodennägel in diese Hohlräume eingebunden. Durch das Verpressen der Hohlräume mit einem Ankermörtel – hoch sulfatbeständig und mit Quellmaß beim Abbinden – konnte mit diesen geschaffenen Lastverteilungselementen der aktive Erddruck von der historischen Mauerwerkswand genommen werden.



1.3 Sicherung mittels Spritzbetonschale und Erdvernagelung

Bild 3 zeigt schematisch die Sicherung mittels Spritzbetonschale und Erdvernagelung.

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Einmessung und Markierung der Bohransatzpunkte
2. Herstellung der Bohrlöcher mittels Unterflurhammer in den rückwärtigen Boden bis zur vorgegebenen Endtiefe; dabei ist
 - der Bohrdurchmesser 90 mm
 - die Bohrneigung 15 Grad zur Horizontalen
 - die Bohrlochtiefe 6,00 m ab Hinterkante Verpresskörper
3. Einbau der Bodennägel inklusive Injektionschlauch zur Verpressung des Bodennagels und Injizierung der Bohrlochkanäle um die Bodennägel mit Ankermörtel AM 25-HS von Quick Mix; zu verwenden ist
 - der Bodennagel System Spantec – Bauer
 - mit einem Nageldurchmesser von 25 mm
 - mit doppeltem Korrosionsschutz
 - und einer Nagellänge von 6 m
4. Einbau der Nagelkopfplatte und der zugehörigen Kugelbundmutter und Vermauerung der 2. Kopfplatte im Zuge der Aufmauerung der Stützwand

Bild 3

Sicherung über Spritzbetonschale mit Erdvernagelung im Bereich der Einsturzstelle [Quelle: Lau, T., Ing.-Büro für Tragwerksplanung Lau, Hildburghausen]

Bild 4

Erdverankerung mit mauerwerkseitigen Lastverteilungselementen [Quelle: Lau, T., Ing.-Büro für Tragwerksplanung Lau, Hildburghausen]

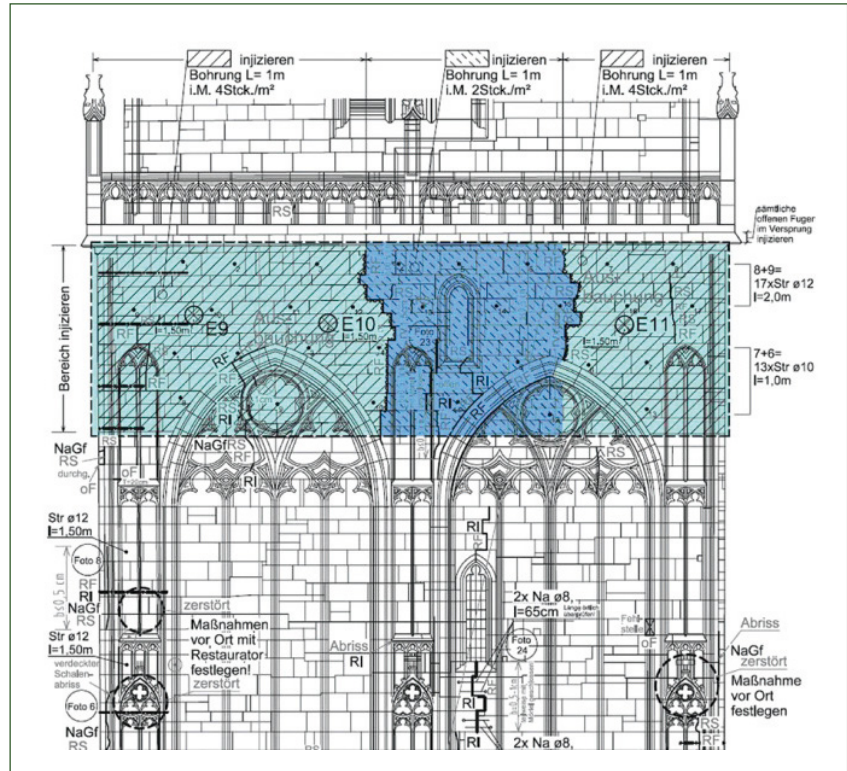
sche Sicherung der Flanken an den Obergängen links/rechts der Baugrube zur Bestandswand. Die vorhandenen Strebenockabstützungen inklusive Schwellholz und zwei Kantholzhorizontaltraversen mussten mehrfach teildemontiert und im jeweiligen Instandsetzungsabschnitt wieder montiert werden. Hervorzuheben ist die Abstützungserfordernis beim Rückbau der sehr stark ausgebauchten und mit Erde hinterfüllten Stützmauerbereiche. Im Zuge des sukzessiven Rückbaus der verwölbten Abschnitte ist das Mauerwerk temporär im oberen

1.4 Erdverankerung mit mauerrückseitigen Lastverteilungselementen

Bild 4 zeigt eine Erdverankerung mit mauerrückseitigen Lastverteilungselementen.

Hierbei sind die Arbeitsschritte:

1. Durchführung einer Kernbohrung bis zu 60 cm Tiefe zur späteren Aufnahme des Verpresspackers für die Lastverteilungselemente, Vertiefung der Kernbohrung mittels Unterflurhammer bis in den rückwärtigen Mauerbereich; dabei betragen
 - die Bohrneigung 15° zur Horizontalen
 - der Bohrl Lochdurchmesser 150 mm
2. Vertiefung der Bohrlöcher mittels Unterflurhammer in den rückwärtigen Boden bis zur vorgegebenen Endtiefe; dabei ist
 - der Bohrl Lochdurchmesser 9 mm
 - die Bohrneigung 15° zur Horizontalen
 - die Bohrl Lochtiefe 6,00 m ab Hinterkante Verpresskörper
3. Einsatz des Schleuderkopfes zur Herstellung der Lastverteilung in die Bohrlöcher von 150 mm Durchmesser; es muss darauf geachtet werden, dass das Ende des Schleuderkopfes die Nagelbohrlöcher durch Andruck verschließt
4. Ausschleuderung des Lastverteilungshohlraumes bei Hohlraumdicke von 40 cm, Hohlraumdurchmesser von 80 cm, Schleuderzeit mindestens 3 min abhängig vom Austrag
5. Einbau der Bodennägel inklusive Injektionsschlauch zur Verpressung des Bodennagels; dabei ist zu verwenden
 - Bodennagel System Spantec – Bauer
 - Nageldurchmesser von 25 mm mit doppeltem Korrosionsschutz
 - Nagellänge von 6 m zuzüglich Mauerwerkstärke abzüglich 20–30 cm
6. Injizierung des Bohrl Lochkanales um den Bodennagel mit Ankermörtel AM 25–HS von Quick Mix und Setzung des Verpresspackers zur Injektion der Lastverteilung, Injizierung des Hohlraumes; Packerdurchmesser von 140 mm, Druck max. 3 bar (da Injektion auch im Mauerwerk drückt)
7. Ausbau der Packer und Einbau der Nagelkopfplatten und der zugehörigen Kugelbundmutter,



Vermörtelung der Kopfplatte und Neuversatz des entnommenen Mauersteines bzw. Steinkerns mit Mauermörtel; beim Einbau der Steinkerne wurde der obere Abschluss steinmetzmäßig mit Steinersatzmörtel abgeglichen.

Bild 5
Ausbauchungen und Riss-systeme am Südturm des Magdeburger Doms; Planausschnitt [Quelle: Hegewald, P.]

2 Gewebestrumpfanker am Südturm Magdeburger Dom

2.1 Schadbild

Am Südturm des Magdeburger Doms zeigten sich eine sehr hohe Anzahl von Einzelrissen sowie ganze Rissssysteme an den Ecken, vor allem an der Süd-West-Ecke und der Süd-Ost-Ecke. Die großen Einzelrisse in den Flächen der Fassaden gingen teilweise über die gesamte Mauerstärke. Zwei ausgedehnte flächenhafte Ausbauchungsstellen befanden sich in ca. 30 m Höhe, direkt unterhalb des Turmumganges (Bild 5). Als Ursache für die ausgedehnten Rissssysteme und die Ausbauchungen sind ungünstigen Baugrundverhältnisse, speziell unterhalb der Westfassade, zu vermuten. Der Südturm wurde in geringerer Wandstärke, also leichter als der Nordturm, ausgeführt.

**Bild 6**

Gewebestrumpfanke im
HT-Rohr (schwach saugender
Bohrkanal simuliert)

Bild 7

Einbau der Gewebe-
strumpfanke



2.2 Einbau von Gewebestrumpfan- ankern

Die Instandsetzung des Südturmmauerwerkes beinhaltete Injektions- und Vernadelungsarbeiten sowie den Einbau von Gewebestrumpfanke. Durch diese Maßnahmen ist angestrebt worden, eine Ausweitung der Rissbildungen und eine Verstärkung der Ausbauchungen zu verhindern. Die ausgewölbten Teile der Außenschale in den Bereichen unterhalb des Turmumganges wurden konstruktiv wieder an das Kernmauerwerk angebunden.

Im Vorfeld der Sicherungsarbeiten konnte mittels Endoskopie ein relativ dichtes Gefüge des Turmmauerwerkes nachgewiesen werden. Eine Kapselung des Verbundmörtels im Gewebestrumpf war daher nur zur Überbrückung von Spalten sowie zur Begrenzung des Durchtritts bei kleinen Klüften erforderlich. Im Regelfall führt die optimale werkseitige Abstimmung der Gewebestrumpf- und Verbundmörtelkomponente zum angestrebten Scherverbund zwischen Anker und Bohrkanal.

Das Anpressen des Gewebestrumpfes aus hoch reißfestem Geotextil und die Benetzung der Strumpfoberfläche waren auf jeden Fall erforderlich. Abhängig vom anspruchsvollen Verhältnis zwischen Verankerungslänge und -durchmesser erfolgte die Erstellung von zwei Arbeitsproben durch freies Aufpumpen des Strumpfanke sowie durch eine Verpressung im Kunststoffrohr (HT-Rohr) (Bild 6).

Das Einbringen der Gewebestrumpfanke im dreischaligen Bestandsmauerwerk (Quadermauerwerk – Kernmauerwerk – Quadermauerwerk) mit

örtlich begrenzten Aufwölbungen in der äußeren Schale dient der Anbindung von hohl liegenden Mauerwerksschalen an das Kernmauerwerk (Bild 7). Das System der Gewebestrumpfanke besteht aus folgenden Komponenten:

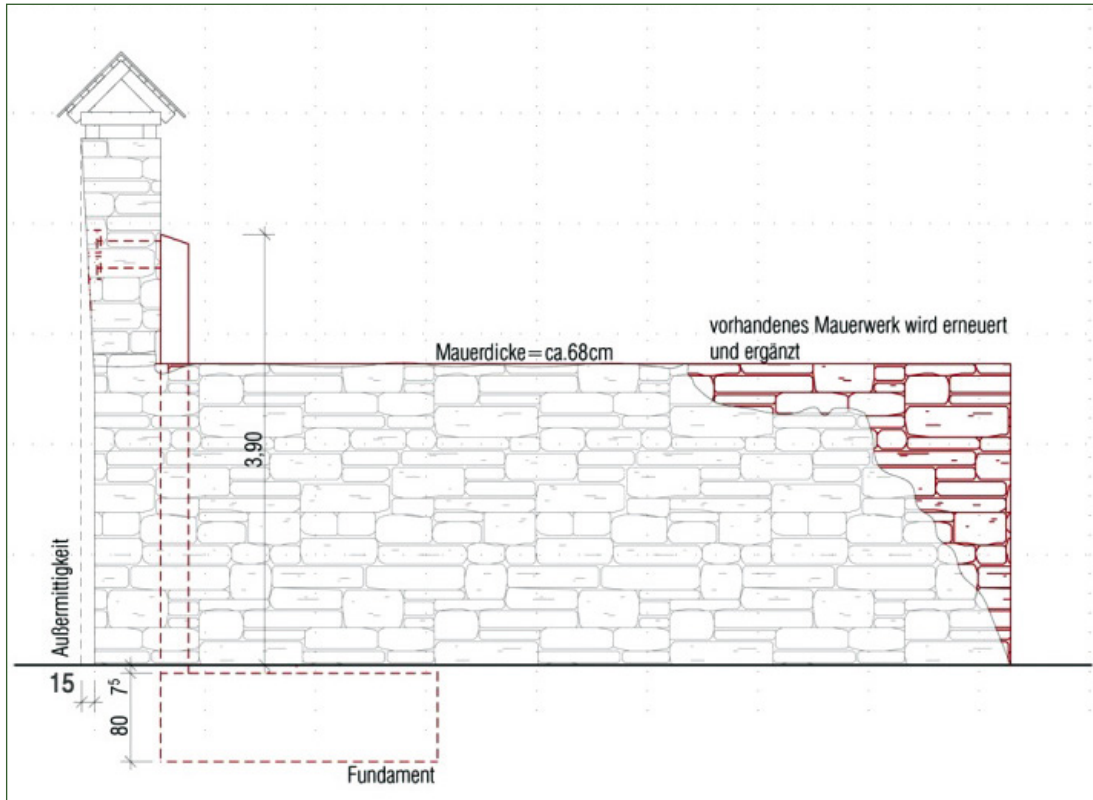
Zugstab: Edelstahlrohr der Korrosionswiderstandsklasse III, Durchmesser $13,7 \times 3,2$ mm

Gewebestrumpf: wasserundurchlässiges, dehnfähiges Polyestergewebe, das sich beim Injizieren aufbläht. Dehnfähigkeit in Längsrichtung ca. 90 % sowie zusätzlich in Querrichtung ca. 140 %; die Maschenweite und -dehnung muss auf die Sieblinie des Mörtels abgestimmt sein. Durch dieses System wird eine unkontrollierte Ausbreitung des Verpressgutes vermieden und eine weitgehende Anpassung des Verpresskörpers an die Geometrie des Bohrloches bei klüftigem Mauerwerk erreicht. Gleichzeitig kann ein begrenzter Durchtritt des Verpressmörtelleimes und damit ein mineralischer Verbund mit der Bohrlochwand gewährleistet werden.

Abstandshalter: Federkorbabstandshalter, die sich der Geometrie des Bohrloches anpassen

Füllschlauch: Füllschläuche, die im Verpresskörper verblieben, beeinträchtigen den Verbund. Daher ist ihr Außendurchmesser zu begrenzen; bei Bohrlöchern bis 5 cm – $d_A = 8$ mm; darüber $d_A = 10$ mm

Systeminjektionsmörtel: mineralischer Mörtel als werksgemischter Trockenmörtel mit Güteüberwachung, Biegezugfestigkeit 28 d i. M. 4 N/mm^2 , Druckfestigkeit 28 d i. M. 45 N/mm^2 , Fließfähigkeit und Sieblinie mussten auf den Gewebestrumpf abgestimmt sein, um die oben genannten Eigenschaften zu erreichen.

**Bild 8**

Seitenansicht – Steinhof-
torbogen in Kreuzburg
[Quelle: Salzmann]

2.3 Mauerwerksinjektionen

Im Bereich der Ausbauchungen wurde vorbereitend das Mauerwerk aufgebohrt. Die Bohrungen sind frei Hand trocken im Mauerwerk als Sackloch hergestellt worden. Es erfolgten 2 bis 4 Bohrungen mit Durchmesser von 25 mm je 1 m². Die Bohrlöcher wurden mit ölfreier Druckluft und zusätzlich mit einem hochleistungsstarken Industriestaubsauger gesäubert, anschließend Packer in die Bohrlöcher eingesetzt und mit Werk abgedämmt. Nach vorsichtigen Vornässen des Mauerwerks ist der Injektionsmörtel mit einem Druck von maximal 2 bar lagenweise von unten nach oben injiziert worden.

3 Unterfangung und Rückverankerung am Steinhof-torbogen in Kreuzburg

3.1 Schadbild

Das historische Steinhof-tor als Bestandteil der ehemaligen Stadtmauer in Kreuzburg wurde 1778 errichtet. Es besteht aus Sandsteingewänden sowie

Werksteinbögen. Die darüber liegenden Bereiche sind in unregelmäßigem Kalksteinmauerwerk errichtet (Bild 8). Das Mauerwerk weist eine Schiefstellung von ca. 15 cm zur Straße hin auf. Der filigrane Mittelpfeiler kippt um ca. 10 cm. Durch die Schiefstellungen, die durch Setzungen verursacht wurden, entstanden am Torbogen erhebliche Steinverschiebungen (Bild 8). Der erforderliche Stand sicherheitsnachweis infolge Windlast sowie Schiefstellung konnte im Bestand nicht erbracht werden.

3.2 Statische Sicherung

Eine technisch mögliche Demontage und Neuaufmauerung des Steinhof-tores ist denkmalschutzrechtlich abgelehnt worden. Um die Windlasten sowie Schiefstellungskräfte sicher abzutragen, kam eine konventionelle Betonunterfangung (Bild 8) sowie eine kraftschlüssige Rückverankerung an zwei eingespannten Stahlbetonstützen zur Anwendung. Die Herstellung der Betonunterfangung musste hierbei in Anlehnung an die DIN 4123 in Abschnitten erfolgen. Besondere Sorgfalt verlangte die separate Primärunterfangung des stark



Bild 9 Einbau der Stahlbetonstützen in den Fundamentkörper

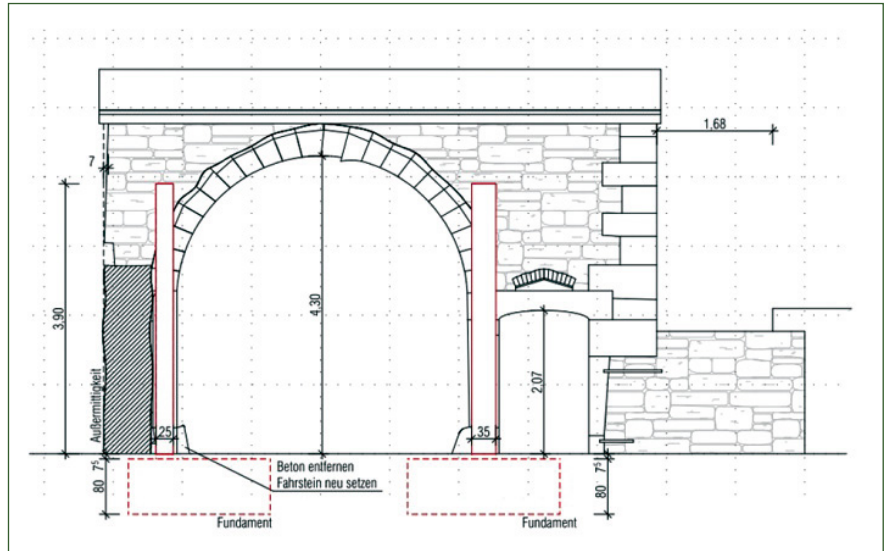


Bild 10 Innenansicht – Steinhofbogen in Creuzburg [Quelle: Salzmann]

in der Tragstruktur geschädigten Mittelpfeilers zwischen Fußgängerpforte und Torbogen. Die beiden partiellen Unterfangungskörper wurden aus Sicherheitsgründen nacheinander hälftig direkt gegen das Erdreich betoniert und zusätzlich mit einer Sekundärabstützkonstruktion versehen. Anschließend erfolgte der Erdaushub für das Stahlbetonfundament zur Einspannung der Stahlbetonstütze. Analog ist an der 2. Stütze im Eckbereich verfahren worden. Die Stahlbetonstützen in der Dimension 35/25 cm mit einer Höhe von 3,90 m wurden in die großflächigen Fundamentkörper direkt eingebunden (Bild 9). Die Einschalung der

Stützen erfolgte mit einer vorgefertigten Schalung in Rechteckform und eine vorgebohrte Edelstahlplatte mit den Dimensionen 600/150/20 mm ist in den Stützenkopf mit einbetoniert worden. Über diese separate Stahlplatte sowie über eine 2. durchgehende Bohrung wurde die Rückverankerung der kippgefährdeten Stadtmauerwand inklusive des Torbogens (Bild 10) gewährleistet. Die bewusst sichtbaren Verankerungen mittels Edelstahlgewindestäben im Durchmesser von 27 mm verlaufen ohne Verbund im Hüllrohr und sind daher jederzeit zu kontrollieren sowie justierbar.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

Betzold, R., (2013): Zeitschrift »Mauerwerk 4/2013«, Sonderdruck-Auszug © Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin Mauerwerk 17 (2013), Heft 4, 17. Jahrgang, August 2013, S. 220–226,

Betzold, R., (2013): Tagungsband zur Fachtagung »Natursteinsanierung Stuttgart 2013«, Sonderdruck-Auszug, 1. Auflage, 2013 Fraunhofer IRB Verlag, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Verwitterungsschäden an Natursteinoberflächen – Ursachen und Schadensbilder

Die Entwicklung von Schadensbildern an Natursteinoberflächen wird von der Gesteinsart und von äußeren Einflüssen gesteuert. Wichtige Einflussfaktoren und ihre Wirkung werden dargestellt.

Heiner Siedel

Schlagwörter: Baugesteine, Gefüge, Mineralbestand, Umwelteinflüsse, Verwitterungsvorgänge, Schadensbilder

1 Gesteine als Baustoff und Verwitterung

Natursteine sind in geologischen Prozessen gebildete Materialien, deren Gefüge, Mineralbestand und damit auch technische Eigenschaften durch den jeweiligen Entstehungsprozess geprägt sind. Aus geologischer Sicht sind drei Hauptbildungsbereiche (Gesteinshauptgruppen) zu unterscheiden, die jeweils typische Materialcharakteristika aufweisen und für Bauzwecke unterschiedlich gute Eignung besitzen. Weichere, in Schichten abgelagerte *Sedimentgesteine* (vor allem Sand- und Kalksteine) sind traditionell häufig genutzte Baugesteine und für diese Zwecke bis heute beliebt. Die oft bankige Absonderung und moderate Härte vieler Gesteine aus dieser Gruppe ermöglichte einen relativ einfachen Abbau bereits mit primitiver Technik. Die Formatierung zu Werksteinen mit ebenen Oberflächen war auf Grund der mittleren Härte gut möglich. Auch gelten viele derartige Gesteine als gute Bildhauergesteine. Hartgesteine aus der Gruppe der *magmatischen Gesteine* (z. B. Granite oder Basalte) wurden ebenfalls bereits in der frühen Menschheitsgeschichte für Bau- oder Bildhauerezwecke genutzt. Allerdings war der Aufwand der Gewinnung und Verarbeitung deutlich höher, und so erfolgte die Verwendung oft nur lokal in Land-

schaften, in deren Untergrund Sedimentgesteine fehlen oder selten sind. Ähnliches gilt für viele *metamorphe Gesteine*, von denen vor allem einige spezielle Arten vielfach für bestimmte Bauaufgaben eingesetzt wurden, wie Schiefer für die Dachdeckung und Marmor für Skulpturen oder edle, dekorative Wandverkleidungen.

Natursteine sind, wie andere Baustoffe auch, den Prozessen der natürlichen Verwitterung unterworfen. Interessant ist dabei, dass sich selbst innerhalb ein und derselben Gesteinsgruppe, wie z. B. der Sandsteine, über längere Zeiträume stark unterschiedliche Schadensbilder und Schadensintensitäten zeigen. Die Frage nach den wirkenden Faktoren, nach Qualitätskriterien von Gesteinen bezüglich der Dauerhaftigkeit und auch nach Möglichkeiten der Erhaltung verwitternder Natursteine an Bauwerken drängt sich zwangsläufig auf.

Der Begriff *Verwitterung* steht im geologischen Geschehen »ausschließlich für die zerteilende und zersetzende Tätigkeit der exogenen (d. h. von außen auf die Erdoberfläche einwirkenden, außenbürtigen; Anm. d. Verf.) Kräfte« [Murawski, Meier, 2004]. Abweichend davon fasst man für Baugesteine diesen Begriff etwas weiter und bezeichnet als Verwitterung jeden chemischen oder mechanischen Prozess »durch den Gesteine, die der Witterung im

Freien ausgesetzt sind, Veränderungen ihrer Eigenschaften erfahren und zerfallen.« [Verges-Belmin et al., 2010]. Diese Betrachtung bezieht also ausdrücklich auch Veränderungen der Eigenschaften von Gesteinsoberflächen wie Verfärbung, biologischen Bewuchs etc. mit ein, selbst wenn diese zunächst (noch) nicht zur Gesteinszerstörung führen, sondern nur optische Veränderungen der Oberfläche hervorrufen. Der letzteren Definition wird hier gefolgt, wenn von »Verwitterung« die Rede sein wird.

Ursachen dafür, dass Verwitterung an Baugesteinen überhaupt einsetzt, sind Wechselwirkungen von Umweltfaktoren im weiteren Sinne wie Klima, Schadstoffbelastung, biologische Aktivität oder Nutzungsaspekte mit dem Gesteinsgefüge, das seinerseits einen wichtigen Einfluss auf die Art und Intensität der Verwitterung sowie die sich ausbildenden Verwitterungsformen ausübt. Einfacher gesagt wird ein verbauter Naturstein in seiner Verwitterung durch äußere und innere Einflüsse bestimmt. Ihr Zusammenwirken erzeugt eine bestimmte Schadenssituation und ein bestimmtes Schadensbild.

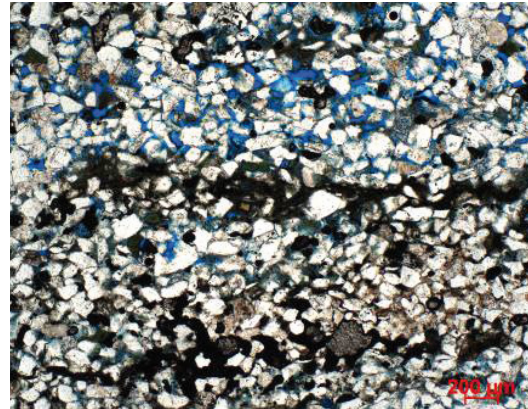
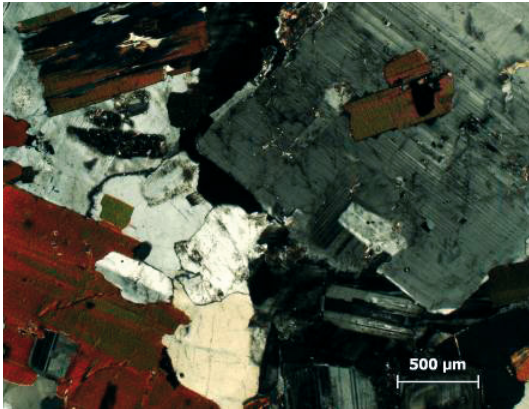
2 Gefüge, Mineralbestand und technische Eigenschaften

Gesteine, die man als natürlich gebildete Mineral-kongemenge definieren kann, lassen sich durch die Beschreibung ihres Gefüges strukturell und durch die Beschreibung ihres Mineralbestandes stofflich charakterisieren. Die Beschreibung des Gefüges erfolgt über die Beschreibung der *Struktur* des Gesteins, d. h. der Korngrößen seiner Mineralkörner, ihrer Korngrößenverhältnisse und Kornformen sowie ihrer Kornverbünde. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt ist die *Textur* des Gesteins, die die Lage und Orientierung der Körner im Raum beschreibt. Durch parallele Orientierung von plattigen oder stängeligen Mineralkörnern können sich beispielsweise so genannte »Paralleltexturen« ergeben, die dem Gesamtgestein ein »streifiges« Aussehen verleihen.

Strukturelle wie auch stoffliche Charakteristika erlauben Rückschlüsse auf den Entstehungspro-

zess des Gesteins. Zugleich bestimmen sie aber auch maßgeblich seine technischen Eigenschaften [Siedel 2004]. Damit sind solche Größen wie die Festigkeit des Gesteins, seine Wasseraufnahme oder sein Quellvermögen bei Befeuchtung (hydrische Dehnung) oder bei Erwärmung (thermische Dehnung) gemeint. Diese Eigenschaften wiederum haben Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Gesteins im verbauten Zustand. An zwei Gesteinsbeispielen soll dies demonstriert werden. Ihre Gefüge werden in Dünnschliffen (lichtdurchlässige, etwa 25 µm dicke geschliffene Gesteinspräparate) im Durchlicht unter dem Mikroskop untersucht. Die Nutzung von polarisiertem Licht für die Gesteinsmikroskopie erzeugt unterschiedlich bunte Farben der einzelnen Mineralkörner aufgrund ihrer verschiedenen optischen Eigenschaften (Bild 1a), die auch für die Mineralbestimmung genutzt werden können. Im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit des Gesteins wichtiger ist aber, dass die Gefügemerkmale eines Gesteins damit detailliert und bei feinkörnigen Gesteinen auch in ausreichender Vergrößerung untersucht werden können.

Granodiorit ist ein magmatisches, d. h. aus einer heißen Gesteinsschmelze (Magma) kristallisiertes Gestein. Bei der Erstarrung von festen Mineralkörnern (Feldspäten, Quarzen und Glimmern) haben die wachsenden Minerale das Gesteinsvolumen vollkommen ausgefüllt und sind an den Korngrenzen eng miteinander verwachsen, ja regelrecht »verzahnt«. Das Dünnschliffbild des Lausitzer Granodiorits (Bild 1a) zeigt diese direkten Verwachsungen ohne Porenraum, ein Merkmal der Gesteinsstruktur so genannter kristalliner Gesteine. Folgerichtig ist die gemessene Wasseraufnahme für dieses Gestein sehr gering (0,1–0,6 Gew%). Ferner wird die zu erwartende Frost- und Salzbeständigkeit solcher Gesteine, die kaum Wasser aufnehmen, sehr hoch sein. Kaum überraschend ist auch ihre hohe Druckfestigkeit (überwiegend zwischen 100 und 200 N/mm²), die sich aus der intensiven Kornverwachsung direkt ableiten lässt. Dies alles lässt gute Dauerhaftigkeitseigenschaften vermuten, die in der Baupraxis auch tatsächlich bestätigt werden können. Der Granodiorit zeigt eine richtungslose Textur, d. h. die Mineralkörner haben keine Vorzugsrichtung in ihrer Raumlage.

**Bild 1**

Gefüge im Dünnschliff:
a) Lausitzer Granodiorit (links, Nicols +)
b) Cottaer Elbsandstein (rechts, Nicols II), Porenraum mit blauem Kunstharz angefärbt

Die gemessenen Gesteinseigenschaften weisen demzufolge auch keine Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) auf. Dagegen lässt das porenreiche und tonmineralhaltige Gefüge des in Bild 1b dargestellten *Cottaer Sandsteins* stark abweichende technische Eigenschaften erkennen. Das ursprünglich als loses Haufwerk aus überwiegend Quarzkörnern (Sand) abgelagerte Sediment wurde im Zuge seiner weiteren geologischen Entwicklung nur an Kornkontakten verfestigt (»zementiert«), so dass die Quarzkörner untereinander keinen vollflächigen Oberflächenkontakt zeigen und etwa 20 % des Gesteinsvolumens aus Hohlräumen (Poren) besteht. Dies bedingt eine hohe Wasseraufnahme von ca. 9 Gew% und gleichzeitig eine geringere Druckfestigkeit (um 30 N/mm²). Darüber hinaus durchziehen parallel zur Schichtung (Ablagerungsrichtung) orientierte Anreicherungen von Tonmineralen das Gefüge und verleihen ihm eine schichtige Paralleltexur, die eine *Anisotropie* (Richtungsabhängigkeit) vieler technischer Gesteinseigenschaften bedingt. Die deutlich feinkörnigeren, weichen Tonmineralagen mit einem internen, durch kleine Poren geprägten Hohlraumgefüge stellen Schwachstellen im Gefüge und damit Ansatzpunkte für die Verwitterung dar. Sie sind nicht nur nahezu parallel ausgerichtet, sondern auch ungleichmäßig im Gestein verteilt. Solche *Inhomogenitäten* im Sandsteingefüge führen dazu, dass die Verwitterung nicht gleichmäßig, sondern verstärkt im Bereich der Tonmineralagen angreift, was häufig zur Abtrennung von Gesteinsschuppen parallel zu den Tonmineralanreicherungen führt.

Neben den Gefügeeigenschaften kann auch der *Mineralbestand* die technischen Eigenschaften prä-

gen. So beeinflusst das Bindemittel zwischen den Sandkörnern von Sandsteinen Festigkeiten und Verformbarkeit. Sandsteine mit tonigen Bindemitteln zeigen tendenziell geringere Zugfestigkeiten und niedrige E-Moduli, während kieselig oder karbonatisch gebundene Sandsteine zu höheren Zugfestigkeiten und größeren E-Moduli tendieren [Alfes, 1989]. Nicht zuletzt spielt der Mineralbestand auch eine entscheidende Rolle für die Dauerhaftigkeit. Chemisch reaktive Mineralkomponenten wie Calcit oder Dolomit, die der Lösung und/oder chemischen Umwandlung zugänglich sind, können die Stabilität eines Gesteinsgefüges durch chemische Verwitterung gefährden.

3 Umwelteinflüsse und Schadensprozesse

3.1 Umwelteinflüsse

Äußere Einflussfaktoren auf verbaute Gesteine sind nicht nur anthropogene Umwelteinflüsse wie Luftverunreinigungen und saurer Regen. Der Begriff »Umwelt« muss durchaus weiter gefasst werden, denn auch permanente Wechsel klimatischer Einflussfaktoren wie Regen, Trockenheit und Frost, die Nutzung von Gebäuden oder der Verbund mit anderen Baustoffen wie Fugenmörteln können zerstörerische Einflüsse auf Natursteine am Bauwerk ausüben. Bezogen auf ein bestimmtes Objekt wirken diese verschiedenen Einflussfaktoren – bedingt durch konstruktive Besonderheiten, objektspezifische Wasserableitung, unterschiedliche Exposition der Oberflächen etc. – unterschiedlich intensiv auf verschiedene Fassadenabschnitte, so dass sich im

Bild 2

- a) Verwitterungsschäden an einem Gebäudesockel aus Buntsandstein in Bodennähe, Ruppertsgrün, Sachsen (links)
 b) Belastung von Muschelkalk-Mauerwerk mit hygroskopischen Salzen, Neuenburg, Sachsen-Anhalt (rechts)



Ergebnis eine ungleichmäßige Verteilung von Schäden an der Gebäudeoberfläche ergibt. Die in Bild 2a dargestellten massierten Schäden im Sockelbereich sind dafür ein klassisches Beispiel: Am Gebäudesockel sammelt sich Ablauf- und Abtropfwasser, aber auch kapillar aufsteigende Feuchte aus dem Baugrund und Spritzwasser dringen ins Mauerwerk ein. Mittransportierte, gelöste Salze steigen je nach Löslichkeit unterschiedlich hoch in das Mauerwerk auf und kristallisieren dort aus, können sich aber bei hoher Luftfeuchtigkeit oder Beregnung erneut lösen, wieder kristallisieren und so Steinschäden erzeugen. Im zweiten Beispiel (Bild 2b) wird ein nutzungsbedingter Schaden dargestellt. Durch den Einbau eines Aborts in historischer Zeit wurden Abschnitte des Mauerwerkes am Burgturm mit leichtlöslichen Salzen wie Nitraten und Chloriden belastet, die durch ihr hygroskopisches Verhalten zu einer lokalen Verfärbung und dauerhaften Durchfeuchtung der betroffenen Mauersteine geführt haben.

Die Beispiele zeigten, dass Umwelteinflüsse nicht gleichmäßig auf alle Abschnitte eines Gebäudes wirken. Darüber hinaus kann die Intensität äußerer Einwirkungen und der Grad der daraus resultierenden Schädigung auch im Querschnitt eines Mauer-

werks differenziert werden. Von der Oberfläche her wirkende äußere Einflüsse wie Beregnung – Trocknung, Erwärmung – Abkühlung, veränderliche Luftfeuchten etc. schwächen sich zum Steininneren hin sukzessive ab. Dies führt bei den meisten Gesteinen zur Entstehung eines horizontalen bzw. vertikalen Verwitterungsprofils mit kontinuierlichen oder abrupten Übergängen zwischen verwitterten Außenbereichen und unverwitterten Innenzonen, die an Änderungen von Gesteinsparametern wie Festigkeiten oder Porositäten festzumachen sind.

3.2 Physikalische Verwitterung

Viele äußere Einflussfaktoren wirken nicht gleichmäßig ein, sondern sind veränderlich. Das gilt insbesondere für Klimaeinflüsse wie Feuchte und Temperatur. Durchfeuchtung und Austrocknung sowie Erwärmung und Abkühlung der oberflächennahen Bereiche eines Natursteinelements sind in ihrem zyklischen Wirken die Triebkräfte der physikalischen Verwitterung. Sie erzeugen durch Reaktionen des Gesteinsgefüges wie Ausdehnung und Schwinden einzelner Mineralkörner bzw. der betroffenen Abschnitte des gesamten Kornverbandes Spannungen und darauf folgende Entlastungen.

Diese wirken weniger durch ihre Amplituden, sondern vor allem durch häufige Wiederholungen schädigend auf das Gesteinsgefüge, indem der Kornverband geschwächt wird.

In gemäßigten Klimabereichen können maximale Temperaturschwankungen im Jahresgang zwischen etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ an Baustoffoberflächen erwartet werden. Die resultierende lineare *thermische Dehnung* kann dabei für verschiedene Gesteinsarten maximale Beträge zwischen 0,16 und 1,36 mm/m erreichen (bezogen auf den Temperaturunterschied von 80 K) [Siedel, 2013]. Der gesamte angegebene Temperaturbereich wird im gemäßigten Klima natürlich nicht innerhalb von kurzer Zeit durchlaufen. Temperaturänderungen von $> 20\text{ K}$ können an Bauwerksoberflächen aber bereits innerhalb von Tag-Nacht-Wechseln erreicht werden. Verstärkt wird der Effekt durch schwarze Verkrustungen oder Verfärbungen der Steinoberflächen, die das Sonnenlicht bei direkter Einstrahlung stärker absorbieren und weniger reflektieren. Weil davon auszugehen ist, dass nur der oberflächennahe Bereich eines Gesteins von diesen Temperaturänderungen und Dehnungen/Schrumpfungen verstärkt betroffen ist, die tiefer darunter liegenden Kornlagen des Gesteins sich dagegen weniger verformen, ergeben sich Spannungen im oberflächennahen Gefüge, die bei zahlreichen wiederholten Wechseln zu Oberflächenschäden führen können. *Frost-Tau-Wechsel* müssen als Sonderfall thermischer Beanspruchung gelten. Hier kommt zusätzlich zu den oben beschriebenen thermischen Effekten das Verhalten des Wassers im Porenraum beim Phasenübergang zu Eis zur Geltung. Neuere Untersuchungen an Sandsteinen [Weiss, 1992], [Ruedrich, Siegesmund, 2007] haben gezeigt, dass die Eiskristallisation in porösen Natursteinen in größeren und kleineren Poren zeitlich und räumlich differenziert erfolgt und mit messbaren Volumenänderungen des gesamten Gefüges verbunden ist. Solche Volumenänderungen wurden bereits an nur teilweise wassergesättigten Proben gemessen. An einigen Sandsteinen wurden bereits nach wenigen Frost-Tau-Wechseln irreversible Verformungen hervorgerufen. Als wichtiger Schadensprozess innerhalb der physikalischen Verwitterung müssen auch wechselnde Feuchtebelastung und die damit verbundene *hydrische Dehnung* angesehen werden.

Die Aufnahme von Wasser in das Porengefüge führt bei den meisten Gesteinen, selbst bei solchen mit geringem Porenraum, zu einer messbaren Ausdehnung des Kornverbandes, die bei Trocknung wieder zurückgeführt wird. Für dichte Gesteine wie Gneise oder Granite wurden maximale Dehnungen unter 0,1 mm/m gemessen, für poröse und tonhaltige Gesteine wie Sandsteine und Tuffe aber auch Werte bis zu 5 mm/m [Siedel, 2010]. Bei geschichteten oder geschieferten tonmineralhaltigen Gesteinen treten starke Anisotropien der Dehnung auf – senkrecht zu Schicht- oder Schieferungsflächen gemessen ist sie meist deutlich größer. Auch hier erzeugt, wie bei der thermischen Dehnung, der Unterschied zwischen äußerer, wechselfeuchter Oberflächenzone und dem inneren, stabil feuchten Bereich Spannungen im Gestein. Als Resultat werden bei Gesteinen mit hoher Quelldehnung im Bereich von einigen mm/m oft Absonderungen oberflächenparalleler Schalen beobachtet [Siedel, 2013] (Bild 4a). Die wiederholte *Kristallisation von Salzen* aus übersättigten Lösungen und deren Wiederauflösung im Porenraum von Gesteinen führt zur Salzsprennung, deren Mechanismus ebenfalls zur physikalischen Verwitterung gerechnet werden muss, obwohl die Auslöser mobile Schadstoffe aus der chemischen Verwitterung sind. Der komplexe Vorgang der Salzschädigung poröser Materialien wird im Wesentlichen durch den Kristallisationsdruck verursacht [Steiger et al. 2011]. Porenraum, Porenvernetzung und Gesteinsfestigkeit beeinflussen, ähnlich wie bei der Eiskristallisation, die Widerstandsfähigkeit eines Gesteins gegenüber dieser Beanspruchung. Neben den mit der Kristallisation verbundenen Schäden können manche Salze, vor allem solche aus den Gruppen der Nitrate und Chloride, auch durch ihre *hygroskopische Wirkung* Trocknungsblockaden im Mauerwerk hervorrufen (Bild 2b).

3.3 Chemische und biologische Verwitterung

Vorgänge der chemischen Verwitterung an Gesteinen sind vor allem durch *Lösungs- und Umwandlungsreaktionen* der gesteinsbildenden Minerale geprägt. Dabei sind in der Regel äußere Faktoren am Prozessgeschehen beteiligt, wie in das Gefüge eindringendes Wasser, das als Reaktionspartner

**Bild 3**

Lokale Bildung von Gipskrusten auf Muschelkalk als Folge unterschiedlicher Exposition
a) Gebäude in Greiz (links)
b) Naumburger Dom (rechts)

oder Lösungsmittel fungiert, oder gasförmiges Schwefeldioxid aus der Luft. Chemische Verwitterung kann das Gesteinsgefüge durch Stoffumlagerungen schwächen, aber auch Verfärbungen oder auflagernde Krusten bilden. Die Neubildung leicht löslicher Salzverbindungen kann in der Folge die Prozesse der Salzsprengung in Gang setzen. Eine wichtige Reaktion der chemischen Verwitterung ist die Lösung und Umwandlung von Kalkgestein [Siedel, 2013]. Karbonatminerale wie Calcit und Dolomit können bereits von neutralem Regenwasser über längere Zeiträume gelöst werden, wobei ein Relief (»Mikrokarst«) auf den Gesteinsoberflächen entsteht. Wird Calciumkarbonat durch Kontakt mit Schwefeldioxid aus der Luft an feuchten Gesteinsoberflächen zu Gips (Calciumsulfat-Dihydrat) umgewandelt, kann die vergipste Oberfläche noch leichter durch Wasser angelöst und zerstört werden.

Der gelöste Gips kann sich anschließend an anderer Stelle als Oberflächenauflage (Kruste) wieder aus der Lösung abscheiden (Bild 3), bevorzugt in geschützten Bereichen der Fassade, wie unter Gesimsen, Vorsprüngen oder Fensterbänken, wo er im »Regenschatten« nicht vom Ablaufwasser abgewaschen werden kann. Oft werden in die Gipskrusten Partikel aus Staub oder Ruß mit eingeschlossen, die sie dunkel färben. Gipskrusten verdichten die porenoffene Steinoberfläche und hemmen den Austausch von Feuchtigkeit. Durch unterschiedliche thermische und hydrische Dehnungen von Gipskruste und Steinsubstrat, d. h. infolge physikalischer Verwitterung, können die Steinoberflächen unter solchen Krusten zermürbt werden. Weitere Mineralreaktionen wie die Oxidation von eisenhal-

tigen Verbindungen oder die Umwandlung von Feldspat- und Tonmineralen an der Gesteinsoberfläche können Verfärbungen bzw. Gefügeentfestigungen hervorrufen [Siedel, 2013].

Prozesse der *biologischen Verwitterung* treten als Begleiterscheinung vor allem an nassen Gesteinsoberflächen auf. Vergrünung oder allgemein Verfärbung durch Bewuchs bzw. mikrobiologische Aktivität werden zuerst als ästhetische Verschlechterung des Oberflächenzustandes von Steinobjekten wahrgenommen. Obwohl vor allem an Kalksteinen auch chemische Wechselwirkungen von Stoffwechselprodukten der Organismen mit der Steinoberfläche beschrieben wurden, kann die biologische Verwitterung im Vergleich mit chemischer und physikalischer Verwitterung kaum als entscheidender Faktor für den Steinzerfall angesehen werden.

4 Schadensbilder

An Mauersteinen oder Skulpturen fallen unterschiedliche, teilweise bizarre Schadensbilder verwitterter Gesteinsoberflächen auf (Bilder 4 und 5). Materialverluste sind häufig nicht gleichmäßig erfolgt. Das durch Verwitterung entstandene Relief hat die originale, bearbeitete Steinoberfläche ganz oder teilweise zerstört, dabei aber mitunter Inhomogenitäten und Anisotropien im Gesteinsgefüge wie Fossileinlagerungen und Einschlüsse oder die Schichtung geradezu herauspräpariert. Die entsprechenden Schadensbilder sind als Resultat einer Überlagerung zwischen den oben dargestellten

**Bild 4**

- a) Abschalen einer scharrierten Sandsteinoberfläche (links)
b) Alveolenbildung (Alveolarverwitterung) an einem Kalksteinblock (rechts)

**Bild 5**

- a) Komponentenverlust durch Auswittern oder Reliefbildung (Muschel-einlagerungen im Kalkstein, links)
b) differenzielle Erosion (schichtparallel), Buntsandstein (rechts)

inneren und äußeren Einflussfaktoren anzusehen. Gesteinseigenschaften wie Porosität und Festigkeit können in manchen Natursteinen, bedingt durch den natürlichen Bildungsvorgang, im mm- oder cm-Maßstab stark schwanken. Die Verwitterungsmechanismen finden also in solchen Gesteinsgefügen einen unterschiedlichen Widerstand bzw. ungleichmäßige Wirkbedingungen vor. Das Zusammenwirken äußerer und innerer Einflüsse führt zur Ausprägung eines konkreten Schadensbildes an einem Gesteinsblock, das für bestimmte Gesteinsarten typisch sein kann und bereits gewisse Rückschlüsse auf Einflussfaktoren erlaubt. Gleiches gilt auch im größeren Maßstab für eine ganze Fassade, wo sich die Schäden an bestimmten Abschnitten massieren, weil äußere Faktoren unterschiedlich stark angreifen. Für die Bestandsaufnahme an geschädigten Gebäudeoberflächen ist deshalb eine Systematisierung der beobachteten Schadensphänomene unerlässlich. Im Allgemeinen erfolgt dazu

die Oberflächenkartierung der Schadensbilder [Siedel et al., 2011] an repräsentativen Bereichen des Objektes, bei kleineren Objekten wie Skulpturen auch der gesamten Steinoberfläche. Für die Beschreibung typischer Schadensbilder sind zahlreiche Begriffe wie »Schalenbildung«, »Abschuppen«, »Bröckelzerfall« usw. geprägt worden. Um diese Termini besser zu definieren und bei der Kartierung von Steinschäden mit einheitlichen, national und international gültigen und übertragbaren Begrifflichkeiten zu arbeiten, ist im Rahmen von ICOMOS ein Glossar mit reich illustriertem Schadbildkatalog erarbeitet worden [Vergès-Belmin et al., 2010]. Es kann im Internet kostenfrei abgerufen werden. Seine Nutzung als Grundlage für Kartierarbeiten wird Praktikern hier anempfohlen, weil subjektive, manchmal auch falsche oder ungenaue Bezeichnungen von Schadensformen in der Vergangenheit immer wieder Probleme bereitet haben und eine Verständigung erschweren.

Literatur und Quellen

- [Alfes, 1989] Alfes, Ch., (1989): Korrelation zwischen Gefüge- und Struktur-parametern sowie mechanischen Eigenschaften beispielhafter Gesteinsvarietäten. *Bautenschutz + Bausanierung* 12 , S. 51–55
- [Murawski, Meier, 2004] Murawski H., Meier, W., (2004): *Geologisches Wörterbuch*. Elsevier: München
- [Ruedrich, Siegesmund, 2007] Ruedrich, J., Siegesmund, S., (2007): Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environ. Geol.* 52 , S. 225–249
- [Siedel, 2013] Siedel, H., (2013): Instandsetzung verwitterter Natursteinoberflächen an historischen Bauwerken. *Mauerwerk-Kalender* 38: Bauen im Bestand, S. 63–105
- [Siedel, 2010] Siedel, H., (2010): Historic building stones and flooding: changes of physical properties due to water saturation. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities* 24, 9/10, S. 452–461
- [Siedel, 2004] Siedel, H., (2004): Arten, Klassifizierung, technische Eigenschaften und Kennwerte von Naturstein. *Mauerwerk-Kalender* 29 , S. 5–29
- [Siedel et al., 2011] Siedel, H., Siegesmund, S., Sterflinger, K., (2011): Characterisation of Stone Deterioration on Buildings. In: Siegesmund, Siegfried and Snethlage, Rolf (eds.): *Stone in Architecture*, 4th edition. Springer: Heidelberg etc , S. 347–410
- [Steiger et al., 2011] Steiger, M., Charola, A. E., Sterflinger, K., (2011): Weathering and Deterioration. In: Siegesmund, Siegfried and Snethlage, Rolf (eds.): *Stone in Architecture*, 4th edition. Springer: Heidelberg etc , S. 227–316
- [Vergès-Belmin et al., 2010] Vergès-Belmin, V. (Hrsg.) et al., (2010): *Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein*. Englisch-Deutsche Fassung. *Monuments and Sites XV (ICOMOS / ISCS)*, Michael Imhof Verlag: Petersberg. Freier Download im Internet unter: [www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Icomos_Glossar_deutsch_englisch\[1\].pdf](http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Icomos_Glossar_deutsch_englisch[1].pdf) (09.12.2013)
- [Weiss, 1992] Weiss, G., (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. *Münchener Geowiss. Abhandlungen*, Reihe B, 9 , S. 1–118

Aufnahme und Transport von Feuchte in Natursteinen und Mauerwerk und deren Bedeutung

Es werden Mechanismen und Zusammenhänge des Feuchteverhaltens von porösen Baustoffen und von Mauerwerk vorgestellt und die mit einer erhöhten Feuchtelast einhergehenden Schäden angerissen. Anschließend wird erläutert, welche wichtigen Informationen erforderlich sind, um die Feuchtesituation von Mauerwerk bewerten zu können. Die grundlegenden Mechanismen des Feuchteverhaltens von Baustoffen werden aufgezeigt, um Verständnis für die Potenziale moderner Simulationsverfahren zu schaffen. Ein Beispiel zeigt den Einfluss unterschiedlicher Putze auf die Feuchtesituation im Sockelbereich eines feuchtebelasteten aufgehenden Mauerwerks. In gleicher Weise lassen sich Maßnahmen zum Feuchteschutz entwickeln und bewerten.

Harald Garrecht

Schlagwörter: Feuchtehaushalt, Feuchteschaden, Feuchtetransport, Feuchtespeicherung, Feuchteschutz, numerische Berechnung

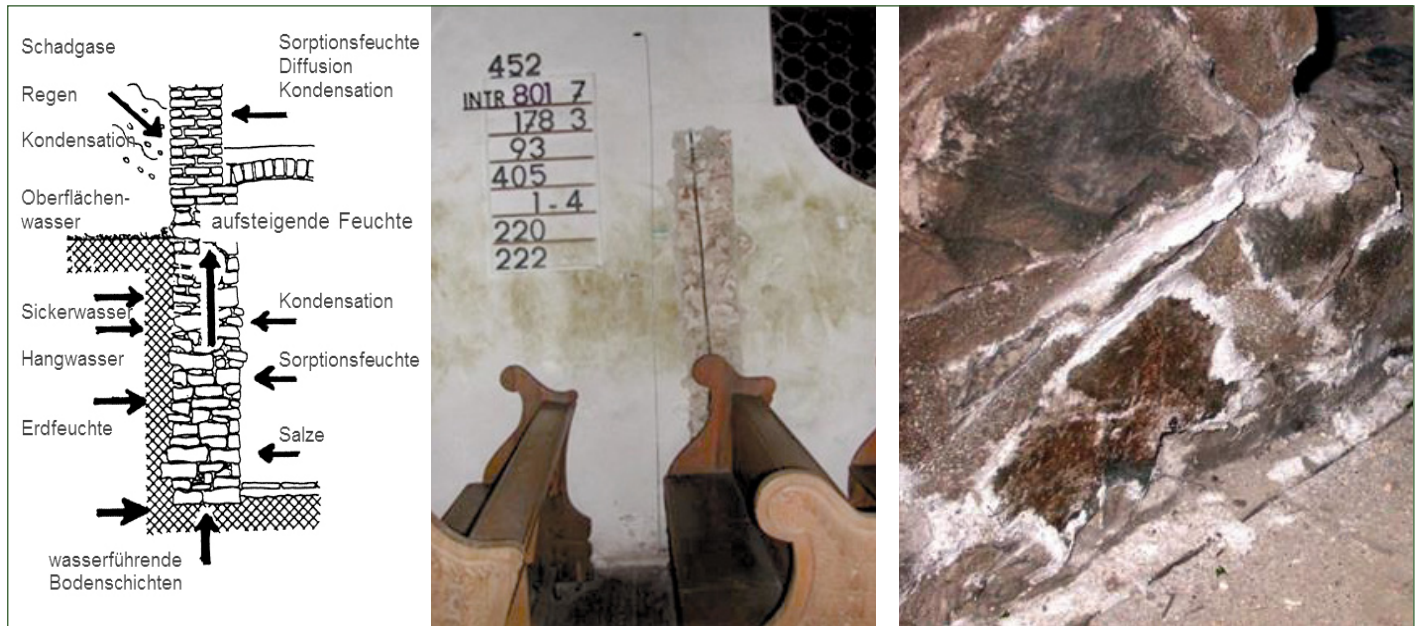
Hohe Feuchtelasten in Natursteinen und Mauerwerk können zu Feuchteschäden führen. Typische Schäden reichen vom Abwittern an der Mauerwerksoberfläche befindlicher Materialien bis hin zu einer tiefgreifenden Schädigung des Mauerwerks. Nicht zuletzt schränkt eine hohe Mauerwerksfeuchte die Nutzbarkeit von Bauwerken erheblich ein [Garrecht et al., 1996].

Bei einer Feuchtebelastung von Mauerwerk werden wirksame Feuchteschutzmaßnahmen gesucht, um einem weiteren Zutritt von Feuchte zu entgegen. Die Ausarbeitung von Feuchteschutzkonzepten erfordert umfassende Voruntersuchungen, die hinreichende Informationen zu den örtlich gegebenen Feuchtelasten, zur Art und zum Aufbau des Mauerwerks wie auch zu einer möglichen Salzbelastung geben. Vor Ort sind zudem in möglichst geringem Umfang Materialproben zu entnehmen, um im Labor deren Feuchteverhalten zu analysieren. Zudem ist eine hinreichende Einschätzung der am Bauwerk vorherrschenden Umgebungsverhältnisse vorzunehmen, wobei die sich im Tages- und Jahresgang veränderlichen Randbedingungen zu berücksichtigen sind. In besonders schwierigen Fällen ist hierbei ein kontinuierliches Monitoring unumgänglich. Alle so gewonnenen Erkenntnisse müssen dann zusammengeführt werden, um eine Bewer-

tung des Mauerwerksverhaltens vornehmen zu können. Diese bildet die Basis, um denkmalgerechte Maßnahmen herausarbeiten zu können, die sicherstellen, dass nach Umsetzung der gewählten Maßnahme der hohen Feuchtlast wirksam entgegenet werden kann.

1 Feuchtelasten und Feuchteschäden

Feuchte wird dem Mauerwerk auf unterschiedlichste Weise zugeführt, von diesem aufgenommen, weitergeleitet und an anderer Stelle in Form der Verdunstung wieder abgegeben. Bild 1 verdeutlicht die vielfältigen Möglichkeiten, wie Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form an das Mauerwerk herangeführt werden kann. Die erdberührten Bauteiloberflächen können mit Bodenfeuchte, Grundwasser, Sicker- und/oder Hangwasser in Kontakt stehen, sofern das aufgehende Mauerwerk über keine vertikalen und/oder horizontalen Feuchtesperren verfügt. Der sich im Mauerwerksinneren einstellende Feuchtezustand, hängt mit der Feuchteaufnahme im Wesentlichen von den an den luftumspülten Mauerwerksoberflächen vorherrschenden Witterungs- und Klimaverhältnissen ab,

**Bild 1**

Links: Typische Feuchtelasten am Mauerwerk

Mitte: Feuchteschaden im Sockelmauerwerk durch aufsteigende Feuchte

Rechts: Schadenssalze im Sockelbereich von aufgehendem Mauerwerk

da diese die Trocknungsmöglichkeiten des Mauerwerks in entscheidender Weise bestimmen.

Aber auch an allen luftumspülten Mauerwerksoberflächen kann Wasser in der flüssigen Phase anstehen und so zu hohen Feuchtelasten führen. In Form von Niederschlägen, Spritzwasser oder auch anstehendem Oberflächenwasser kann die einhergehende Feuchteaufnahme bis zur Sättigung zumindest der oberflächennahen Materialschichten des Mauerwerks führen. Nicht zuletzt ist auch die Tauwasserbildung als Ursache einer lokal erhöhten Mauerwerksfeuchte zu nennen. Desweiteren beeinflussen im Mauerwerk befindliche bauschädliche Salze den Feuchtehaushalt zumindest in den oberflächennahen Materialschichten.

Sind Natursteine und Mauerwerk einem steten Wechsel von Befeuchtung und Trocknung unterworfen, sind Schäden in Form von krustenüberzogenen Oberflächen, von Riss- und Schalenbildungen, von Absandungen, von Abspaltungen und von Ausblühungen häufige Folge. Ursächlich ist dabei meist das im Porenraum der Mauerwerksmaterialien befindliche Wasser, das als Transport-, Lösungs- und Reaktionsmedium wirkt und so die zur Schädigung führenden physikalischen und chemischen Prozesse ermöglicht [Winkler, 1975]. Zudem ist Feuchte Voraussetzung dafür, dass sich an Baustoffoberflächen Schimmelpilze bilden oder organische Materialien, so z. B. in das Mauerwerk

einbindende Holzbalken, von schädigenden Pilzen und/oder Insekten befallen werden. Neben den konstruktiven Problemen durch Fraß, Fäulnis und Verrottung sind dabei auch gesundheitliche Beeinträchtigungen der Nutzer zu beachten. Nicht zuletzt verliert feuchtes Mauerwerk sein Wärmedämmvermögen.

Welche Schadensformen sich in feuchtem Mauerwerk ausbilden, hängt von der Intensität, von der Häufigkeit und Art der Feuchtebeanspruchung, vom Vorhandensein bauschädlicher Salze und von Temperaturlasten durch Besonnung ebenso ab, wie von den mineralogischen, physikalischen, wärmetechnischen, feuchtetechnischen und mechanischen Eigenschaften der Mauerwerksmaterialien.

2 Feuchtespeicherung und Feuchtetransport

Mauerwerksmaterialien nehmen Wasser in flüssiger und/oder gasförmiger Form in ihr Inneres auf, speichern es, leiten es in andere Bereiche weiter oder geben es in Form der Verdunstung wieder an die Umgebung ab. Der sich im Mauerwerksinneren einstellende Feuchtezustand wird dabei vor allem von den vorherrschenden Umgebungsverhältnissen und vom Feuchteverhalten der Mauerwerksmaterialien bestimmt.

2.1 Feuchtegleichgewicht und Feuchtetransport

Wasser wird im Porengefüge der Baustoffe immer dann transportiert, wenn sich an den Bauteilrändern die Temperatur-, Feuchte- und/oder Druckrandbedingungen verändern. Dann strebt der Baustoff einen neuen Gleichgewichtszustand an. Grundsätzlich bewegt sich die Feuchte, gleich ob in der flüssigen oder in der gasförmigen Phase, immer vom Bereich des höheren zum Bereich des niedrigeren Potentials hin [De Vries, 1987]. Die Intensität mit der ein Ausgleichsprozess angestrebt wird, hängt von der Größenordnung des vorherrschenden Temperatur-, Feuchte- und Druckgefälles (Gradienten), von der Bauteilgeometrie und von den materialspezifischen Eigenschaften der Feuchteweiterleitung und der Feuchtespeicherung ab. Erfolgt die Aufnahme von Feuchte bei einer Benetzung der Oberfläche mit flüssigem Wasser noch vergleichsweise rasch, so dauern Trocknungsprozesse wesentlich länger als die reine Befeuchtung. Da Mauerwerk stets veränderlichen Umgebungsbedingungen unterworfen ist, kommt es zu einem regen Wechsel von Befeuchtung und Trocknung.

2.2 Porengefüge von Mauerwerksmaterialien

Das Porensystem von Baustoffen ist unregelmäßig verzweigt und setzt sich aus Porenräumen unterschiedlicher Größe und Form zusammen. Die Häufigkeit, mit der Poren eines Größenbereichs am gesamten Hohlraumgefüge beteiligt sind, die Aneinanderreihung der unterschiedlich gearteten Poren und die Verflechtung der Porenverbände sind für die Bewertung des Leistungsvermögens von Feuchtespeicherung und Feuchtetransport entscheidend [Garrecht, 1992].

Das gesamte offene Porenvolumen gibt Auskunft darüber, welcher maximale Feuchtegehalt, der sog. Sättigungsfeuchtegehalt, sich einstellen kann. Das Verhältnis von offenem Porenvolumen zum Gesamtvolumen wird als Porosität bezeichnet. Zum Vergleich der Feuchtelasten von Baustoffen wird der Sättigungsgrad herangezogen, der das Verhältnis von tatsächlich im Porenraum aufgenommenener zur maximal aufnehmbaren Feuchte aufzeigt.

3 Mechanismen von Speicherung und Transport

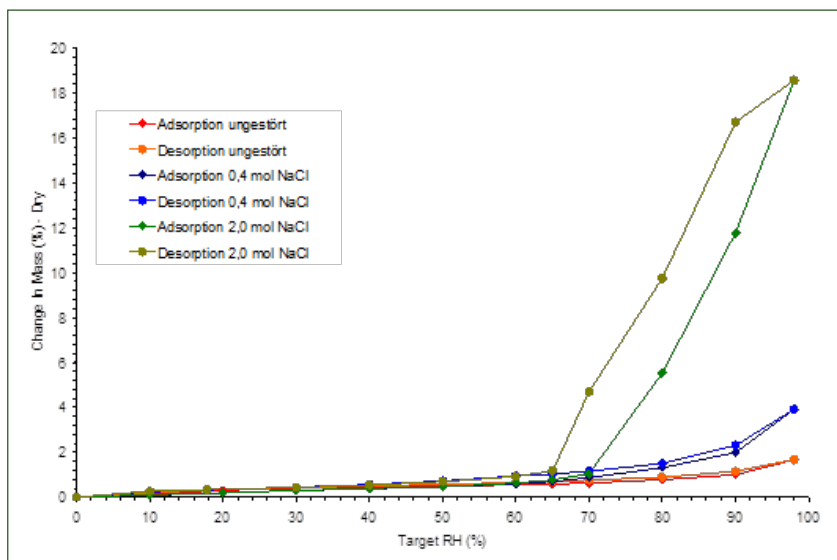
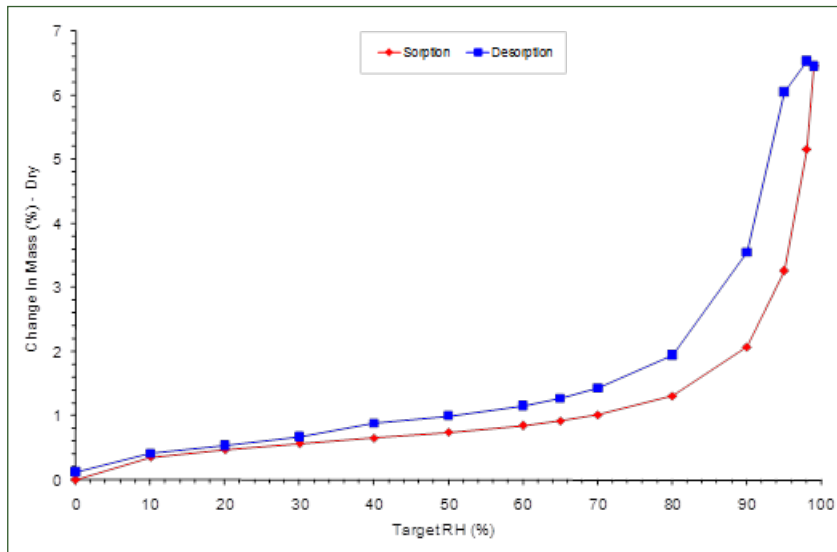
3.1 Speicherung von Feuchte – Sorptionsverhalten

Poröse mineralische Baustoffe streben ein hygri-sches Gleichgewicht mit ihrer Umgebung an, indem, je nach Höhe der relativen Feuchte in der Umgebung, Wassermoleküle, die sich durch das Porengefüge bewegen, an der inneren Porenwand-oberfläche anlagern (Adsorption) bzw. von der Oberfläche des Feststoffes abgegeben werden (Desorption). Im Gleichgewichtszustand stellt sich im Baustoff ein Feuchtegehalt ein, der somit von der inneren spezifischen Oberfläche des Baustoffs, von der relativen Feuchte im Porenraum und von den Temperaturverhältnissen abhängt. Ursache für die Anlagerung von Wassermolekülen an der Porenwandoberfläche sind Oberflächenkräfte, die sogenannten Van der Waals'schen Kräfte.

Den Zusammenhang zwischen Materialgleichgewichtsfeuchte und relativer Feuchte in der Umgebung geben die Sorptionsisothermen wieder, wie sie in der oberen Darstellung von Bild 2 für einen natürlichen Sandstein aufgezeigt sind. Zwischen der Aufnahme von Wassermolekülen, der Adsorption, und der Abgabe, der Desorption, kann im Allgemeinen ein Hystereseeffekt beobachtet werden. Mit einer Erhöhung bzw. Absenkung der Temperatur geht eine Verringerung bzw. Zunahme des Sorptionsfeuchtegehalts einher.

Ist der Porenraum mit Salzen belastet, beeinflussen diese den Feuchtezustand der Baustoffe erheblich. Abhängig von der Art und Konzentration der Salze lässt sich eine mehr oder weniger ausgeprägte Zunahme der sich im Gleichgewicht einstellenden Materialfeuchte beobachten. In der unteren Darstellung von Bild 2 ist der Verlauf der Sorptionsisothermen für einen salzfreien Sandstein den Verläufen eines mit einer 0,4 molaren bzw. einer 2 molaren Natriumchloridbelastung beaufschlagten Sandsteins gegenübergestellt.

Hier zeigen die salzbelasteten Proben bei 75 % r. F. eine sprunghafte Änderung des Materialfeuchtegehalts. Oberhalb 75 % r. F. nimmt der Baustoff umso größere Materialfeuchtegehalte an, je höher die

**Bild 2**

Oben: Ad- und Desorptionsisotherme eines porösen Baustoffs (Sandstein)

Unten: Sorptionsisothermen eines salzfreien und mit verschiedenen hohen Salzlösungen beaufschlagten Sandsteins [Garrecht, Reeb, 2009]

relative Feuchte der Umgebung ist. Die mit einer 2 molaren Lösung NaCl-Lösung belastete Probe führt bereits bei 95 % r. F. zur Sättigung. Ursache hierfür ist, dass über einer gesättigten Lösung ein für das jeweilige Salz spezifischer Wasserdampfpartialdruck vorherrscht. Im Fall von Natriumchlorid entspricht dieser einer relativen Feuchte von 75 % r. F. Wird folglich in der Umgebung eines zunächst kristallinen Natriumchloridsalzes die relative Feuchte von 75 % überschritten, setzt eine hygroskopische Aufnahme von Wasserdampfmolekülen aus der umgebenden Porenraumluft ein. Es werden so viele Wassermoleküle aus der Umgebungsluft in die entstandene Lösung aufgenommen, bis gerade der Übergang von der gesättigten

zur verdünnten Lösung gegeben ist. Nimmt die relative Feuchte in der Umgebung weiter zu, werden immer mehr Wassermoleküle in die nunmehr sich verdünnende Salzlösung aufgenommen, solange bis der Partialdruck über der Lösung dem Wasserdampfpartialdruck der Luft entspricht. Ob bei der Feuchteaufnahme der Sättigungszustand des porösen Baustoffs erreicht wird, hängt daher im Wesentlichen von der Konzentration der Salzbelastung ab. Entsprechend wirkt sich eine Salzbelastung besonders nachteilig auf die Trocknung von feuchtem Mauerwerk aus.

3.2 Feuchtetransport

Wasserdampfdiffusion

Ändern sich die klimatischen Randbedingungen am Mauerwerk, z. B. indem die relative Feuchte der Außenluft ansteigt, wird der Gleichgewichtszustand in den oberflächennahen Materialschichten des Mauerwerks gestört und Wassermoleküle sind bestrebt, solange durch das Porensystem auf dem Weg der Diffusion einen neuen Konzentrationsausgleich herzustellen, bis sich ein neuer Gleichgewichtszustand einstellt. Die Bewegung der Wassermoleküle basiert auf thermischen Eigenbewegungen im Konzentrations- und Temperaturfeld. Die Wasserdampfstromdichte wird dabei vom Partialdruckgefälle und vom materialspezifischen Wasserdampfdiffusionswiderstand bestimmt.

Bis zu einer relativen Feuchte von 50 % r. F. ist das Diffusionsverhalten eines porösen Baustoffs als konstant anzusehen. Mit zunehmender Umgebungsfeuchte stellen sich leistungsstärkere Diffusionsvorgänge ein, wobei das Diffusionsverhalten durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ beschrieben wird, die sowohl in trockenerer Umgebung (0 bis 50 % r. F.) als auch in feuchter Umgebung (50 % bis 100 % r. F.) für den jeweils betrachteten Baustoff bestimmt wird.

Bei der Wasserdampfdiffusion handelt es sich um einen vergleichsweise leistungsarmen Feuchtetransport. Bis zum Wiederherstellen eines neuen Gleichgewichtszustandes durch eine Änderung der relativen Feuchte am Bauteilrandbedarf bedarf es folglich langer Zeiträume, so dass die Trocknung

von feuchtebelasteten Bauteilen vielfach selbst nach mehreren Jahren nicht abgeschlossen ist.

Kapillare Wasseraufnahme und Kapillartransport

Stehen poröse Baustoffe in direktem Kontakt mit flüssigem Wasser, wird dieses vom Porensystem sogleich aufgesogen. Der als kapillare Wasseraufnahme bezeichnete Vorgang wird durch einen inneren Kraftzustand hervorgerufen, der von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, den Benetzungseigenschaften des Festkörpers, der Temperatur, dem Schwereinfluss und der Porenstruktur des Baustoffes maßgeblich bestimmt wird. Sind Salze im Wasser gelöst, verändern diese je nach Art und Konzentration das Wasseraufnahmeverhalten.

Bekanntlich weisen feinporöse Baustoffen eine große kapillare Steighöhe bei kleiner Steiggeschwindigkeit auf. Bei grobporösen Materialien, z. B. historischen Mörteln, können theoretisch zwar nur geringe Steighöhen erreicht werden, doch erlauben diese größeren Porenräume ein deutlich höheres Leistungsvermögen des Feuchtetransports.

Zur Charakterisierung des Saugvermögens poröser Baustoffe wird der Wasseraufnahmekoeffizient w und der Wassereindringkoeffizient B herangezogen, die sich mit einfach durchzuführenden Saugversuchen ermitteln lassen. Wird eine Baustoffprobe an der Grundfläche mit Wasser benetzt, setzt sogleich eine kapillare Wasseraufnahme ein. Die aufgenommene Wassermenge wird hierbei gravimetrisch bestimmt und im Wurzel-Zeit-Maßstab in ein Diagramm eingetragen [Garrecht, 1992]. Aus der Steigung des 1. Geradenabschnittes lässt sich unmittelbar der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmen.

Um das Feuchteleitverhalten poröser Baustoffe abhängig von sich ändernden Randbedingungen beschreiben zu können, befassten sich zahlreiche Forschungen in den letzten 30 Jahren damit, einen Zusammenhang zwischen Flüssigwassertransport und Wassergehaltsunterschied herzustellen [Kießl, 1983]. Doch ist dieser Ansatz physikalisch nicht ganz korrekt, schließlich stellt der Wassergehalt im

Baustoff kein thermodynamisches Potenzial wie die Temperatur dar. Vielmehr sind Kapillarspannungsdifferenzen als Ursache der Feuchtebewegung zu betrachten [Künzel, 1994], [Grunewald, 1997]. In den Arbeiten der zurückliegenden 20 Jahre wurde der Zusammenhang zwischen Kapillarwasserleitfähigkeit und der Porenstruktur erforscht, um unter Einbezug weiterer Größen die Feuchtebewegung in Baustoffen und Bauteilen mathematisch hinreichend genau beschreiben zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass als treibende Ursache des Feuchtetransports die Kapillardruckdifferenz als Feuchtebereich vom Sorptionsfeuchtebereich über den gesamten Kapillarwasserbereich bis zur freien Sättigungsfeuchtegehalt umfasst. Beim kapillaren Saugen wird folglich nur ein Teil der Poren mit Wasser gefüllt und als freie Wassersättigung bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt wird durch die Saugspannungskurve wiedergegeben [Künzel, 1994]. Wassergehalte über dem freien Wassersättigungsgehalt können sich nur bei längerer Wasserlagerung durch das Lösen der eingeschlossenen Porenluft im Wasser, durch Kondensation oder durch Saugen unter Druck einstellen. Aufgrund der thermodynamischen Gleichgewichtsbeziehung zwischen relativer Feuchte und Saugspannung lässt sich die Feuchtespeicherfunktion aus der Saugspannungskurve und der Sorptionsisotherme ableiten.

4 Wärme- und Feuchteverhalten von Mauerwerk

Das Feuchteverhalten von Mauerwerk ist äußerst komplex, da das Zusammenwirken der unterschiedlichen verbauten Materialien zu berücksichtigen ist. Von [Grunewald, 1997] und [Künzel, 1994] wurden thermisch-hygrisch gekoppelte Modellansätze vorgeschlagen, mit denen eine realitätsnahe Bewertung der sich im Tages- und Jahresgang einstellenden Wärme- und Feuchteverhältnisse im Innern von Mauerwerksmaterialien möglich ist. Weitere Arbeiten von Kranz, Holm, Bednar folgten, um die sich in Mauerwerk und Betonkonstruktionen einstellenden Feuchte- und Wärmezustände berechnen zu können [Garrecht, 2009].

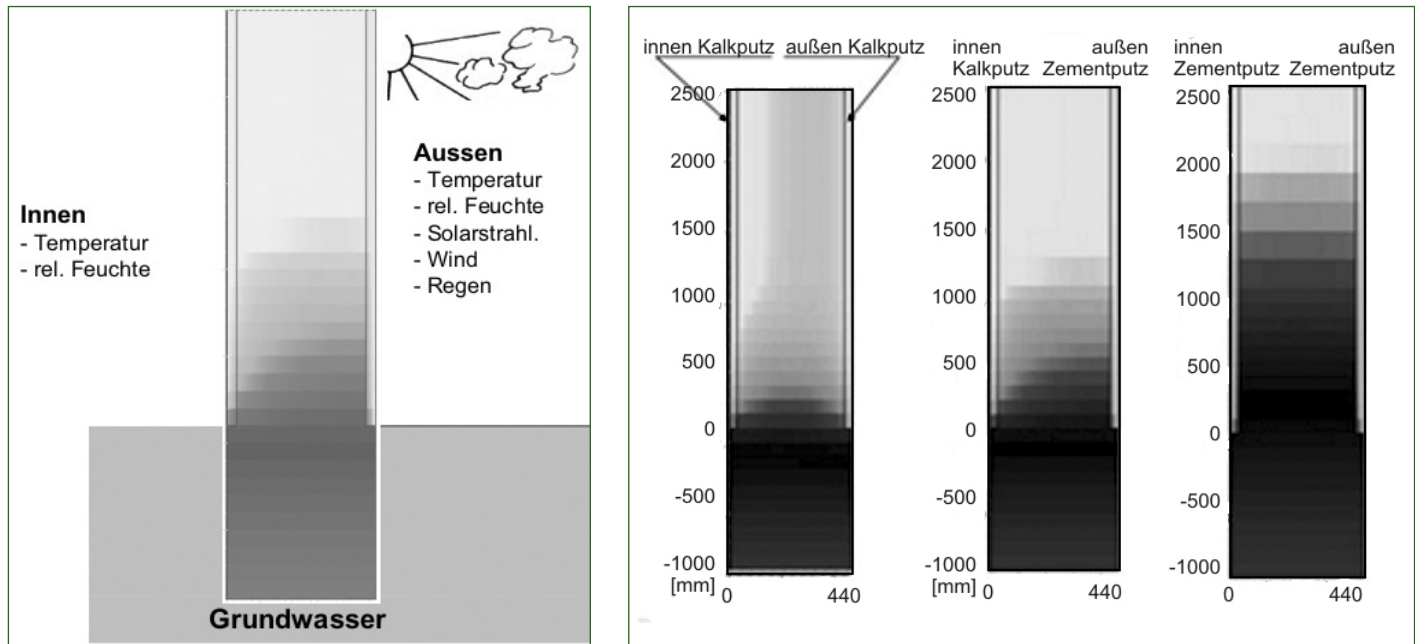


Bild 3 4.1 Berechnungsgrundlagen

Links: Feuchteverteilung im aufgehenden Mauerwerk
Rechts: Gegenüberstellung der Feuchteverteilung in einem beidseitig mit einem Kalkmörtel (links), raumseitig mit einem Kalkmörtel und außenseitig mit Zementmörtel (mitte) und beidseitig mit einem dichten Zementmörtel (rechts) verputzten Mauerwerk an einem schönen Sommertag

Um das Feuchteverhalten von Mauerwerk zu simulieren, muss der betrachtete Mauerwerkskörper hinreichend fein diskretisiert werden, um die Feuchteverhältnisse im Mauerstein und im Mörtel nachbilden zu können. Ebenso muss die Diskretisierung den Feuchterandbedingungen im Baugrund gerecht werden.

Bindet das Gründungsmauerwerk in wasserführenden Bodenschichten ein, kommt es zu einer hohen Feuchteanreicherung durch aufsteigende Feuchte. Während regenreicher Witterungsperioden herrschen dabei höhere Feuchtelasten im Mauerwerk vor als während der trockenen Sommermonate. Damit wird der Feuchtezustand an den luftumspülten Bauteiloberflächen nicht nur von aufsteigenden Feuchte, sondern vor allem von den Trocknungsmöglichkeiten bestimmt. Wird weniger Feuchte aus dem Baugrund nachgeliefert als durch Verdunstung abgeführt werden kann, tritt die Trocknungsf front ins Mauerwerksinnere zurück und der Feuchtehorizont sinkt.

4.2 Beispiel zur Feuchtebestimmung im Mauerwerk

Als Beispiel wird ein über 80 cm in das Erdreich einbindendes Mauerwerk betrachtet, das an der Fundamentsohle im Grundwasser steht. Oberhalb der Geländeoberkante ist das Mauerwerk außen- und raumseitig verputzt. Zur Diskretisierung des Mauerwerks wurden die Mörtelfugen und die Mauersteine durch ein feines Netz aus mehreren tausend kleinen Elementen abgebildet.

Die linke Darstellung in Bild 3 zeigt die Feuchteverhältnisse im Mauerwerksinnern als Folge des an der Fundamentsohle anstehenden Grundwasserspiegels wie auch der an der raum- und außenseitigen Wandoberfläche einwirkenden Wärme- und Feuchtelasten. Dabei zeigen die rechten Darstellungen die Feuchteverteilung des verputzten Mauerwerks während einer Schönwetterperiode. Hier zeigt die linke Situation das Berechnungsergebnis für einen außen- und raumseitig angetragenen kapillaraktiven und diffusionsoffenen Kalkputz. Die Situation eines raumseitig mit einem Kalkputz und

außenseitig mit einem dichten Zementputz verputzte Wand ist in der mittleren Darstellung gezeigt. Die rechte Darstellung zeigt die Wand bei einem beidseitig aufgetragenen Zementputz.

Die Berechnungsergebnisse verdeutlichen, dass in der außenseitig mit einem Zementmörtel verputzten Wand der Feuchtehorizont höher ansteigt als in einem Mauerwerksbauteil, das beidseitig mit einem kapillaraktiven Kalkmörtel verputzt wurde. Ein

beidseitiges Verputzen mit einem Zementmörtel lässt die Feuchtefront noch weiter ansteigen, da hier über die diffusionsdichteren Putzlagen beidseitig nur eine geringe Trocknung möglich ist.

In gleicher Weise lassen sich die Wirkung von nachträglich installierten horizontalen Feuchteschutzmaßnahmen in Form mechanischer und/oder chemischer Sperren, von Sanierputzen und Hydrophobierungen von Mauerwerksoberflächen analysieren.

Literatur und Quellen

- [Garrecht et al., 1996] Garrecht, H., Hörenbaum, W., Müller, H. S., (1996): Untersuchungen zur Schädigung von witterungsbeanspruchtem Mauerwerk und Folgerungen für die Bausanierung. Beitrag zum 4. Int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen
- [Winkler, 1975] Winkler, E. M., (1975): Stone: Properties, Durability in Man's Environment
- [De Vries, 1987] De Vries D. A., (1987): The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. In: Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 30, S. 1343–1357
- [Garrecht, 1992] Garrecht, H., (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation Universität Karlsruhe
- [Garrecht, Reeb, 2009] Garrecht, H., Reeb, S., (2009): Witterungsbedingte Beanspruchung der Mauerwerks-oberfläche. In: Proceedings 17th International Conference on Building Materials 2009, Bauhaus Universität Weimar, Band 2, S. 823–828.
- [Kiehl, 1983] Kiehl, K., (1983): Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen – Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung, Dissertation Universität Gesamthochschule Essen
- [Künzel, 1994] Künzel, H., (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation an der Universität Stuttgart
- [Grunewald, 1997] Grunewald, J., (1997): Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Dissertation Technischen Universität Dresden
- [Garrecht, 2009] Garrecht, H., (2009): Feuchtehaushalt von Mauerwerk, In: Mauerwerk Kalender 2009 – Ausführung, Instandsetzung, Lehm-mauerwerk, Ernst & Sohn Verlag, S. 575–615

2D-Feuchtestatus von Mauerwerken

Möglichkeiten – Grenzen – Beispiele

Jede gravimetrische Feuchtemessung ist genauer als eine elektrische und zwar auch dann, wenn eine Kalibrierung vorgenommen wird. Die klassische Beprobung mit nachfolgenden gravimetrischen Untersuchungen liefern lediglich Einzelaussagen. Diese lassen jedoch keinen räumlichen Gesamtzusammenhang der Feuchteverteilung erkennen. Mit Hilfe dieser elektrischen Methode der Feuchtetomografie besteht die Möglichkeit, sich ein Gesamtbild zu verschaffen, denn in einer durch die beiden Achsen Höhe und Tiefen wird ein 2D-Element, eine Fläche aufgespannt, innerhalb derer jedem Punkt der Fläche eine Feuchtigkeitsinformation zugeordnet werden kann. Solche Tomogramme gestatten es, Feuchtequellen zu lokalisieren, die Funktion von Abdichtungen zu erfassen, denn sie kann vertikale und horizontale Feuchtegradienten aufzeigen. Auf diese Weise lassen sich auch Salzverteilungen beschreiben, wenn in analoger Weise vorgegangen wird.

Helmuth Venzmer

Schlagwörter: 2D-Feuchtestatus, Feuchteverteilung, hygrische Kenngrößen, Durchfeuchtungsgrad, verschiedene Feuchtemesstechniken, Tomogramm, Feuchtetomogramm, objektspezifische Kalibrierfunktion, Sorption, Desorption, Abdichtungsprüfung, Thormann-Speicher, Prinzenhaus Plön, Schloss Schwerin, Mausoleum Helenen Paulownen, Mühle Dybbøl, St.-Petri Hamburg

Der Markt der Feuchtemesstechnik ist sehr vielfältig. Gravimetrisch arbeitende Feuchtemesstechnik (mit Probenentnahme) liefert i. d. R. genaue Ergebnisse und ist leider zeitlich sehr aufwändig und zerstörend. Dem gegenüber steht mittlerweile eine große Menge an Geräten, die vorgeben, sehr schnell die Feuchte eines Baustoffs bestimmen zu können. Schnell arbeitende Feuchtemesser können aber keine zuverlässigen Ergebnisse liefern, weil ihnen i. d. R. die Kalibrierung fehlt. In diesem Spannungsfeld zwischen genau und ungenau auf der einen Seite sowie schnell und langsam auf der anderen Seite sind die eigentlichen Probleme der Feuchtemessung angesiedelt.

1 Feuchtestatus von Mauerwerken

Um den Feuchtestatus bestimmen zu können, bieten sich verschiedene Methoden an, die hier erläutert werden sollen. Hier ist aber zu berücksichtigen, dass auch der Salzstatus eine Rolle spielt, der hier kaum beleuchtet werden kann.

- Zunächst werden am Bauwerk virtuell Messachsen angelegt, die als senkrechte Linie zu

verstehen sind und sich dadurch auszeichnen, dass sie geschossübergreifend sind.

- Längs dieser Linie sind Höhen und Tiefen festzulegen, in denen Materialproben zu gewinnen sind, um sie dann im Labor nach verschiedenen Aspekten zu analysieren.
- Die Zielstellung muss darin bestehen, in möglichst vielen Höhen und Tiefen Informationen zu gewinnen, denn nur dadurch ist es möglich, ein umfassendes Bild zum Feuchte- und Salzstatus zu bekommen. Hier haben sich in der Vergangenheit im Normalfall 3 bis 4 Höhen und jeweils 2 bis 3 Entnahmetiefen herauskristallisiert, wenngleich in speziell gelagerten Fällen durchaus mehr Entnahmestellen gewählt werden, um sichere Aussagen zu gewinnen.
- Aus jeder entnommenen Materialprobe sind mehrere Informationen zu bekommen, wenn die richtige Methodik dazu angewendet wird.
- Benötigt werden für jeden Entnahmeort folgende hygrische Kenngrößen:
 - aktuelle Feuchte u_a (häufig auch Einlieferungsfeuchte genannt),
 - hygroskopische Feuchte u_h (bei vorgegebenen Temperaturen und Luftfeuchten),
 - Sättigungsfeuchte u_s ,
 - Durchfeuchtungsgrade $D(g)$ und $D(h)$.

Im Folgenden werden die Argumente zum Pro und Contra der verschiedenen Methoden vorgestellt und erläutert. Dabei kann es nicht darum gehen, dass eine generelle Entscheidung »für« ein bestimmtes und damit gleichzeitig »gegen« alle anderen Methoden gefunden wird. Alle Methoden haben nebeneinander ihren Platz, sie müssen verantwortungsbewusst ausgewählt werden, je nachdem, welche Bedingungen am Objekt herrschen (Tabellen 1 und 2).

2 Untersuchungsmöglichkeiten

2.1 Kenngrößen

Es ist hinlänglich bekannt, dass das gravimetrische Feuchtemessverfahren, auch Wäge-Darr-Verfahren genannt, das genaueste Verfahren ist. Proben werden entnommen, mit einer Waage wird die Einwaage durch Bestimmung der Masse m_F vorgenommen. Dem schließt sich die Trocknung im Klimaschrank bei einer Temperatur an, deren Größe stoffabhängig zu wählen ist, (so z. B. 105 °C für Ziegel, meist genormt). Sie ist stets so anzusetzen, dass lediglich freies Wasser – auch physikalisches Wasser genannt – ausgetrieben werden kann, dies bis zur Massekonstanz, was unterschiedlich lang dauert je nach Probengröße. Wird diese Temperatur zu hoch angesetzt, kann auch das chemisch eingebundene Wasser freigesetzt werden, was zu Veränderungen der Stoffeigenschaften führen muss. Großvolumige Proben benötigen mehr, kleinvolumige weniger Trocknungszeit. Mit Hilfe einer Waage ist nach dieser Trocknungszeit die Auswaage m_T zu bestimmen, die auch als Trockenmasse bezeichnet wird. Die Differenz zwischen Feuchtmasse (m_F) und Trockenmasse (m_T) ergibt die Wassermasse m_W , die vor der Trocknung im Porenraum des Baustoffs enthalten war, es heißt also

$$m_W = m_F - m_T \quad (1)$$

In der Regel wird die Wassermasse m_W auf die Feuchtmasse m_F bezogen, so dass sich eine Angabe zum Feuchtegehalt (gelegentlich auch Feuchtesatz genannt) wie folgt darstellen lässt:

$$u = \frac{m_W}{m_F} \cdot 100 \% = \frac{m_F - m_T}{m_T} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Wir sprechen von aktueller Feuchte, weil diese unbedingt an den aktuellen Zeitpunkt der Probenentnahme gebunden werden muss, an dem bestimmte klimatische Bedingungen herrschen. Wenn die Sättigungsfeuchte u_s und die hygroskopische Feuchte u_h hinzugezogen werden, lassen sich die Durchfeuchtungsgrade $D(g)$ und $D(h)$ wie folgt formulieren:

$$D(g) = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \% \quad (3)$$

$$D(h) = \frac{u_h}{u_s} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Vorteile

Diese Feuchtemessmethode ist genau, sie ist diejenige Methode, mit deren Hilfe alle anderen Verfahren kalibriert werden müssen, sie ist in der Genauigkeit das Maß aller Dinge. Jedes andere Feuchtemessverfahren muss sich mit dem klassischen gravimetrischen Verfahren vergleichen lassen. Das gravimetrische Messverfahren bildet auch die Grundlage für die Informationen zur Herkunft und zum Grad der Porenraumfüllung gemäß Gleichung (3) und (4).

Nachteile

Die Methode der Feuchtemessung gestattet es zwar, sehr genaue Ergebnisse zu bekommen. Aber leider ist diese Methode an Probenentnahmen gebunden, weshalb sie als zerstörende, als destruktive Methode einzustufen ist. Dies schränkt die Anwendbarkeit gelegentlich erheblich ein. Vor Sanierungen wird die Anwendung dieser Methode vom Bauherrn toleriert. Aber kaum ein Bauherr lässt es zu, dass an einem frisch sanierten Bauwerk erneut Materialproben für Nachuntersuchungen entnommen werden. Um das Problem zu lösen, müssen die Messmethoden gewechselt werden. Der messende Sachverständige geht z. B. zur elektrischen Feuchtemessung über und es kommt dazu, dass der Versuch gemacht wird, Äpfel mit Birnen zu vergleichen. Die Ergebnisse der genauen gravimetrischen Feuchtemessung mit denen der elektrischen zu vergleichen, ist unzulässig, weil hier

gravierende Fehler gemacht werden. Bohrmehl-Methoden zur Beurteilung aller hygri-scher Kenngrößen sind als unzureichend zu bezeichnen, weil die wichtigste Bezugsgröße, die Sättigungsfeuchte, außer Acht gelassen wird. Ohne Sättigungsfeuchte können keine Durchfeuchtungsgrade bestimmt werden, die aber unbedingt benötigt werden.

Hygroskopische Feuchte

Mauerwerksbaustoffe weisen besonders häufig starke sorptive Eigenschaften auf, d. h. diese Baustoffe nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf und lagern diese ein. Mit Hilfe der Sorptions- bzw. Desorptionsisothermen können diese Eigenschaften der Mauerwerksbaustoffe beschrieben werden. Die Ursache dieser Eigenschaften liegt darin begründet, dass lange anhaltende Feuchtigkeitsdurchströmungen stattgefunden haben, die zu einer immer mehr zunehmenden Salzeinlagerung geführt haben. Auf diese Weise sind Nitrate, Chloride oder Sulfate in die Mauerwerkspartien und verursachen dort Eigenschaften, die sich gegenüber anderen Mauerwerkspartien unterscheiden.

Sorptionsisotherme

Mit Hilfe eines Feuchte-Sorptions-Prüfgeräts kann die Sorptionsisotherme bei konstanter Temperatur und steigenden Luftfeuchten bestimmt werden, aus der direkt abzuleiten ist, welche Feuchtigkeitsmenge bei welcher Luftfeuchtigkeit im Baustoff zu erwarten sind.

Desorptionsisotherme

Mit Hilfe eines Feuchte-Sorptions-Prüfgeräts (DVS) kann die Desorptionsisotherme bei konstanter Temperatur und fallenden Luftfeuchten bestimmt werden, aus der direkt abzuleiten ist, welche Feuchtigkeitsmenge bei welcher Luftfeuchtigkeit im Baustoff zu erwarten ist. Der Vorzug des DVS-Geräts ist die Aufnahme von Sorptions- und Desorptionsisotherme in einem Zuge als in sich geschlossene Kurve. Jeder Baustoff hat seine eigenen Sorptions- und Desorptionsfunktionen, aus den bei vorgegebener Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

abzulesen ist, wann sich welcher Gleichgewichtszustand einstellt.

Jemand, der keine hochwertige Messtechnik wie dieses DVS-Gerät zur Verfügung hat, kann im Labor auf einfache Weise punktuell vorgehen, indem er bei ausgewählten Temperaturen und Luftfeuchten die Feuchtigkeitsaufnahmen ermittelt. Es sollten diejenigen Bedingungen sein, unter denen der Raum, das Mauerwerk später belastet sein wird. Auf diese Weise ist es möglich, die entsprechenden Bedingungen zu prognostizieren. Aus der sorptiv bzw. hygroskopisch bedingten Feuchteaufnahme lässt sich die hygroskopisch bedingte Feuchte u_{hyg} bestimmen und mit deren Hilfe ist es möglich den hygroskopisch bedingten Durchfeuchtungsgrad zu bestimmen.

2.2 Messprogramm und Messachsen

Immer wieder wird die Frage gestellt, wie viele Materialproben in Form von Bohrkernen denn aus einem Bauwerk zu entnehmen sind, um daraus die erforderlichen Schlussfolgerungen zu ziehen. Diese Frage kann an dieser Stelle nicht eindeutig beantwortet werden.

- Es gilt nur ein Prinzip, nach dem eine Messachse so anzulegen ist, dass sie repräsentativ für einen bestimmten Mauerwerksbereich eines Bauwerks steht.
- Bei einem Bauwerk geringer Grundfläche (z. B. 10×10 Meter Grundfläche) sollten es aber schon drei bis vier derartiger Messachsen sein, wobei eine weitere Achse zum Vergleich hinzukommen sollte.
- Die Entnahmeorte der Bohrkerns haben sich nach den baulichen Gegebenheiten zu richten. Es spielt z. B. eine Rolle, ob Unterkellerungen vorliegen oder nicht, ob Besonderheiten von Feuchtigkeitsbelastungen vorhanden sind oder nicht.
- Die Messachsen sollten so angelegt werden, dass das gesamte Spektrum von einerseits »deutlich sichtbar feuchtegeschädigt« bis andererseits »doch eigentlich noch ganz in Ordnung« mit erfasst wird. Auf diese Weise kann ein repräsentatives Bild vom Objekt gewonnen werden.

- Diese Beprobung eines Objekts soll dazu führen, dass ein objektives, ein repräsentatives Bild vom Schädigungszustand eines Bauwerks entsteht. Keineswegs geht es darum, ein Bauwerk ganz gezielt schlecht zu beurteilen. Auch das genaue Gegenteil einer zu guten Beurteilung kann ebenfalls nicht das Ziel der Untersuchungen sein.
- Es kommt weiterhin eigentlich nicht so sehr auf die Menge der entnommenen Kerne, sondern auf die richtige Auswahl von Entnahmeorten, häufig die kritischen Punkte, an. Dieser Aspekt ist insbesondere dann von Wichtigkeit, wenn denkmalpflegerische Aspekte eine Rolle spielen.
- An Denkmälern sollte die Entnahme von Materialproben mit dem verantwortlichen Denkmalpfleger abgestimmt werden. Die Entnahme von Materialproben ist dezent und zurückhaltend vorzunehmen. Also: Nicht so viel wie möglich, sondern so viel wie unbedingt nötig.

Feuchtespektrums zu bekommen. Die Sättigungsfeuchte ist wegen der zerstörten Porosität mit Bohrmehl nicht bestimmbar. Mit einer ausbleibenden Sättigungsfeuchte ist es auch nicht möglich, Informationen zu den Durchfeuchtungsgraden zu bekommen. Bohrmehlanalysen können also nur Teil- aber keine Vollinformationen liefern.

Die hier und da praktizierte Methodik, an einem Bauwerk einmal einen Bohrkern zu entnehmen, um die damit erzielte Sättigungsfeuchte dann auf das gesamte Bauwerk zu beziehen ist als gefährlich anzusehen, wenn es sich um Bauwerke handelt, die eine heterogene Altersstruktur aufweisen, in denen Baumaterialien verschiedener Art und Qualität verwendet wurden. Dieses kann zwangsläufig zu dramatischen Fehleinschätzungen führen.

Durch eigene Untersuchungen haben wir es immer wieder erlebt, dass mehr als deutliche Schwankungen der Sättigungsfeuchte von Ort zu Ort eines Objekts aufgetreten sind.

2.3 Zerstörende klassische Methoden

Bohrmehlentnahmen

Durch zerstörende Eingriffe ist es möglich, Bohrmehl aus verschiedenen Tiefen aus dem Baukörper herauszuholen, wenn bestimmte Grundsätze beachtet werden.

- Bohrwerkzeuge dürfen sich nicht »heiß laufen«, weil dieses zu Messwertverfälschungen durch Trocknung führen kann.
- Das Bohrmehl muss in verschleißbaren Gefäßen ins Labor transportiert werden.
- Alternativ ist es aber auch möglich, die Einwage des Bohrmehls vor Ort vorzunehmen, d. h. die Feuchtmasse m_F vor dem Verpacken vor Ort zu ermitteln. Dann spielen transportbedingte Feuchtigkeitsverluste keine Rolle mehr.

Bohrmehlanalysen sind geeignet, um die zum Zeitpunkt der Entnahme herrschenden Feuchtegehalte zu bestimmen. Der Autor bezeichnet diesen Wert gerne als »aktuelle Feuchte«, weil damit derjenige Messwert gemeint ist, der sich auf den Zeitpunkt der Materialentnahme bezieht. Bohrmehlanalysen bieten nur die Möglichkeit, Teilinformationen des

Splitterentnahmen

Gegenüber der Bohrmehlentnahme ist die Entnahme von Materialsplittern per Hammer und Meißel ein Fortschritt, weil damit alle hygrischen Parameter ermittelt werden können. Problematisch ist allerdings die Entnahme von Bruchstücken aus dem Innern eines Mauerwerks. Derartige Eingriffe sind natürlich unverhältnismäßig und eher abzulehnen, weil Aufwendungen und Nutzen in keinem vernünftigen Verhältnis zueinander stehen.

Bohrkernentnahmen

Mit Bohrmaschine und Bohrkronen können Kerne aus verschiedenen Tiefen aus Mauerwerken herausgeholt werden. Dabei empfiehlt es sich, jeden Kern einzeln aus dem Verband zu ziehen. Dieses ist schon deshalb zwingend nötig, um dem Bohrwerkzeug einen möglichst freien Lauf zu ermöglichen. Mit Hilfe einer Zusatztechnik kann während der Bohrkerngewinnung das Bohrmehl abgesaugt werden. Dadurch werden unnötige Erwärmungen der Bohrkronen vermieden. Bei sehr intensiven Durchfeuchtungen ist das Absaugen von Bohrmehl allerdings nicht mehr möglich, weil der Bohrkern

verschmiert, das Bohrmehl befindet sich dann häufig in einer pastösen Konsistenz.

- Entnommene Bohrkerns sind einzeln so zu verpacken, dass sie während des Transports ins Labor nicht abtrocknen können. Die Einwaage über die Feuchtmasse m_F wird im Labor vorgenommen.
- Alternativ ist es aber auch möglich, die Einwaage vor Ort vorzunehmen, d. h. die Feuchtmasse wird vor dem Verpacken vor Ort ermittelt. Dann spielen transportbedingte Feuchtigkeitsverluste keine Rolle mehr.

Wenn ein Mauerwerk von großer Dicke zu analysieren ist, sollten die Bohrkerns profilartig ausgelegt werden um ein Bild der Mauerwerksstruktur zu ergeben. Es ist erkennbar, welche Materialien an welcher Stelle anzutreffen sind. Im Vergleich zwischen Bohrmehl-, Splitter- und Bohrkernentnahmen haben sich Letztere durchgesetzt, weil das komplette Spektrum der hygrischen Kenngrößen ermittelt werden kann. Selbstverständlich ist nur eine Trockenbohrung sinnvoll.

2.4 Zerstörungsfreie elektrische Methoden ohne objektspezifische Kalibrierung

Kleine handliche elektrische Feuchtemessverfahren nutzen die Abhängigkeit ausgewählter physikalischer Kenngrößen zur Feuchtigkeit. In erster Linie ist dieses die Kapazität, denn relative Dielektrizitätskonstanten ϵ_r zwischen den Materialien des Mauerwerks ($\epsilon_r \approx 3$ bis 6) und des Wassers ($\epsilon_r \approx 80$) unterscheiden sich deutlich. Wenn der Anwender ein entsprechendes Gerät bzw. den dazugehörigen Messkopf auf eine Bauwerksoberfläche setzt, gibt es zumeist eine digitale Anzeige in Form von Skalenteilen. Diese Skalenteile werden nur mit Hilfe von vorhandenen Erfahrungen gedeutet, was ohne Kalibrierung angezweifelt werden kann, da dafür keine wissenschaftliche Basis besteht. Diese Werte können nur als grobe Abschätzung angesehen werden [Schmidt-Driedger, 2013].

Eine wissenschaftliche Basis kann erst geschaffen werden, wenn eine Verbindung zwischen der zu messenden Feuchtigkeit und der feuchteabhängigen elektrischen Kenngröße am konkreten Bau-

werk hergestellt wird. Diese Verbindung wird als Kalibrierfunktion bezeichnet, denn sie ordnet jedem elektrischen Messwert eineindeutig eine Feuchtigkeit zu. Diese Kalibrierfunktion besitzt nur für dieses Bauwerk eine Gültigkeit, ggf. aber auch nur für einen Teil eines Bauwerks, bzw. für einen speziellen Baustoff. Am nächsten Bauwerk muss dann gleich wieder eine neue Kalibrierfunktion aufgestellt werden.

Eine solche Kalibrierfunktion ist ein »MUSS« für jede derartige Messung. Die Hersteller derartiger Messgeräte schreiben fast immer im Kleingedruckten der Beschreibung, dass eine Kalibrierung gar nicht möglich ist. Sie geben damit auch indirekt zu, dass eine derartige Messung eigentlich gar keine Feuchtemessung, sondern eine Kapazitätsmessung ist (Diese Geräte sind i. d. R. kaum kalibrierbar).

2.5 Zerstörungsfreie elektrische Methode mit objektspezifischer Kalibrierung

Mit einem geophysikalisch geprägten Verfahren können über ein Vier-Elektroden-System (Prinzip Wenner) elektrische Wechselspannungen im NF-Bereich an die Oberfläche angelegt werden, um mit zwei anderen Elektroden Aussagen über die Feuchte des Materials zu bekommen, hier wird die Leitfähigkeit oder der Widerstand gemessen. Es sind metallische Teleskopelektroden, die die Baustoffoberfläche nur berühren.

- Speziell der spezifische elektrische Widerstand ρ eines Volumenelements wird durch Feuchtezutritte beeinflusst, weshalb sich der Wechselstromwiderstand (Impedanz) verändert. Durch die Variation der Elektrodenabstände ist es dann möglich, eine Tiefenabhängigkeit der Impedanz durch Messungen zu erfassen.
- Wenn die tiefenabhängigen Untersuchungen zur Impedanz wiederholt werden, ergibt sich die Möglichkeit, eine flächenhafte Darstellung der Verteilung der Messgröße zu bekommen, gewissermaßen eine 2D-Darstellung, die auch als tomografische Darstellung bezeichnet werden kann.
- Beispiel Universität Ca Foscari, Venedig [Koss, Lesnych, 2013] (Tabelle 1)

Tabelle 1

Messverfahren für den 2D-Feuchtestatus (elektrische Tomografie)

	Erläuterungen zur 2D-Feuchtemesstechnik
Messprinzip	Geophysikalisches Messen auf der Basis der Wennerfeldmesstechnik, mit der tiefenstrukturiert in fünf verschiedenen Tiefen gemessen werden kann. Für eine Messtiefe werden jeweils vier Elektroden benötigt, zwei Einspeise- und zwei Messelektroden. (Gerät hergestellt von der BIG-M Greifswald.)
Messgröße für den 2D-Widerstandsstatus	Spezifischer elektrischer Widerstand, gemessen im Niederfrequenzbereich gestattet die Berechnung von Linien gleichen Widerstandes (2D-Widerstandsstatus oder Impedanz-Tomogramm)
Kalibrierung	Bohrkerne werden gezogen, so dass sich eine Möglichkeit zur Kalibrierung zwischen dem spezifischen elektrischen Widerständen und der aktuellen Feuchte (oder dem Durchfeuchtungsgrad) ergibt. In der Regel werden exponentielle Kalibrierfunktionen ermittelt.
Überführungen in den 2D-Feuchtestatus	Aus dem 2D-Widerstandsstatus wird der 2D-Feuchtestatus (Linien gleicher Feuchte) gewonnen. Für diese Darstellungen ist mittlerweile auch der Begriffe Feuchtetomogramm üblich.
Genauigkeit	Generell sind alle elektrischen Messverfahren von geringerer Genauigkeit als gravimetrische Messverfahren. Der Vorteil dieses Messverfahrens liegt in der Darstellung von Feuchte-Gradienten, mit denen ein ganzer Querschnitt auf einen Blick bezüglich seiner Feuchtestruktur (unten nach oben, von vorn nach hinten, u. s. w.) beurteilt werden kann. Auch Feuchteveränderungen infolge baulicher Maßnahmen sind darstellbar.

Tabelle 2

Baustellenrelevante Feuchtemessverfahren neben der gravimetrischen/klassischen Feuchtemessung *) – Methodenbewertung

Kategorie	Kurzbeschreibung
Calcium-Carbid-Feuchtemessung	In einer geschlossenen Stahlflasche wird eine feuchte Probe mit Calciumcarbid in Kontakt gebracht, so dass Acetylen entsteht. Dieser Acetylen-Gasdruck ist ein Maß der Materialfeuchte. Das Verfahren wird vorwiegend im Bereich von Estrichbau und Fußbodenlegearbeiten angewendet
Nieder- und Hochfrequenz-Impedanzfeuchtemessung	Impedanzmessverfahren nutzen feuchteabhängige Kenngrößen aus und gestatten mit Hilfe einer objektspezifischen Kalibrierfunktionen Feuchtemessungen
Elektrische Handfeuchtemesser	Elektrische Handfeuchtemesser nutzen die Feuchteabhängigkeit von elektrischen Widerständen, Kapazitäten. I. d. R. liefern diese kaum zuverlässige Messergebnisse. Mehrere Versuchsreihen konnten dieses bestätigen. Außerdem sind diese Geräte – dieses schreiben die Hersteller von Geräten selbst – nicht generell kalibrierbar. Dieses müsste jeder Anwender dann am betreffenden Objekt kalibrieren.

Tabelle 3

Kalibrierfunktion für das Feuchte-Tomografieverfahren, Objekt Ca Foscari, Venedig

$D(g) = 5900 \cdot \rho^{-1,21} = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \%$ $u_a = u_s \cdot 59 \cdot \rho^{-1,21}$	
Spezifischer elektrischer Widerstand ρ in Ωm	Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ in %
188	10 %
60	40 %
43	60 %
34	80 %

Tabelle 4

Kalibrierfunktion für das Feuchte-Tomografieverfahren, Objekt St. Petri, Hamburg

$D(g) = 65 \cdot \rho^{-0,08} = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \%$ $u_a = u_s \cdot 0,65 \cdot \rho^{-0,08}$ <p>u_a aktuelle Feuchte, u_s Sättigungsfeuchte, $D(g)$ Durchfeuchtungsgrad gesamt</p>	
Spezifischer elektrischer Widerstand ρ in Ωm	Durchfeuchtungsgrad $D(g)$ in %
$9,3 \cdot 10^9$	10 %
$3,7 \cdot 10^2$	40 %
2,5	60 %
$7,3 \cdot 10^{-2}$	80 %

Tabelle 5

Vergleiche von zwei Kalibrierfunktionen

Spezifischer elektrischer Widerstand in Ωm	Objektspezifische Kalibrierfunktionen: Ca Foscari (oben) und St. Petri (unten) [Koss, Lesnych, 2013]	Durchfeuchtungsgrad in %
100	$D(g) = 5900 \cdot \rho^{-1,21} = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \%$	0, 2
100	$D(g) = 65 \cdot \rho^{-0,08} = \frac{u_a}{u_s} \cdot 100 \%$	45, 8

- Beispiel Kirche St. Petri, Hamburg [Koss, Lesnych, 2013] (Tabelle 2)
 - Durch Bohrkernentnahmen können Zusammenhänge zwischen den elektrischen und den gravimetrischen Untersuchungen hergestellt werden. Es besteht die Möglichkeit, eine Kalibrierfunktion zu bestimmen, mit deren Hilfe Messwerte des spezifischen elektrischen Widerstandes in hygrische Messwerte übertragen werden können. Die Durchfeuchtungsgrade lassen sich dann mit der Kalibrierfunktion aus den spezifischen elektrischen Widerständen errechnen (Tabellen 3–5).
- Vergleiche der Beispiele der Kalibrierfunktionen (Tabelle 5)

Aus der Betrachtung der zwei Kalibrierfunktionen wird deutlich, dass sich aus dem Interpretieren ein- und desselben Messwertes (von z. B. 100 Ωm) zwei völlig verschiedene Durchfeuchtungsgrade von 0,2 und 45,8 % ergeben. Eine Kalibrierfunktion kann nicht einfach von einem Objekt auf ein anderes übertragen werden. Aus der Interpretation von 100 Ωm folgt am Objekt in Venedig eine vollständige Trockenheit und in St.-Petri ein Durchfeuchtungsgrad von nahezu 50 %.

3 Beispiele Feuchteverteilung (2D) als Tomografie

In der jüngsten Zeit wurde eine große Palette von Gebäuden sowohl gravimetrisch als auch tomografisch im Hinblick auf die Feuchteverteilung analysiert (Bilder 1–8). Parallel erfolgten selbstverständlich auch Analysen zum Salzgehalt und zu vielen weiteren Parametern, die aber nicht detailliert er-

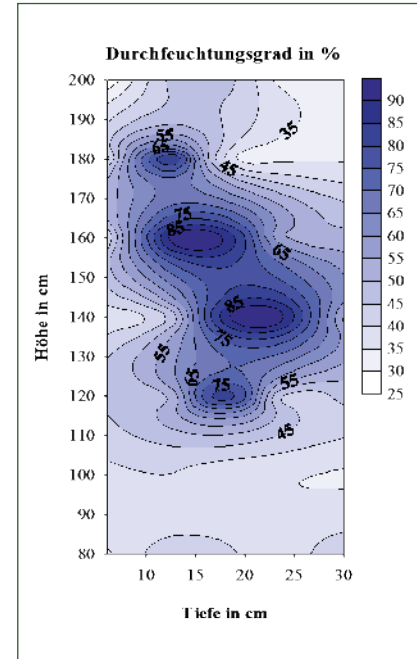
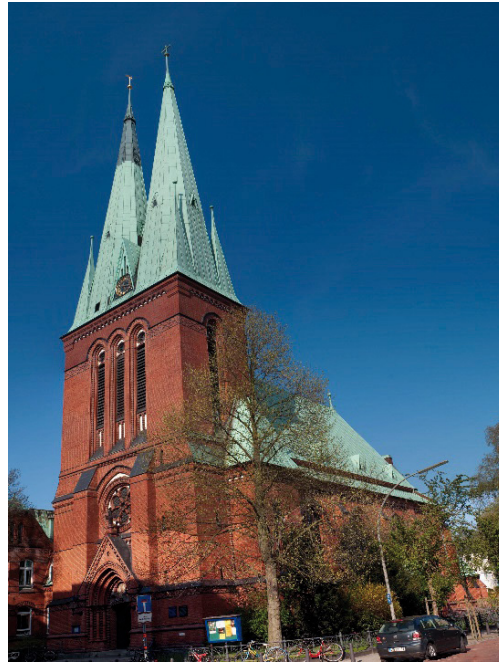
läutert werden können. Hier geht es ausschließlich um die Vorstellung dieser weitgehend zerstörungsfrei arbeitenden Messtechnik, die lediglich dann in den Baukörper eingreifen muss, wenn Kalibrierungen erfolgen sollen (Kalibrierfunktionen über Bohrkern, siehe Tabelle 2). Es wird jeweils ein Foto des Bauwerks und ein Tomogramm nebeneinander präsentiert (Bilder 1–8), die sehr unterschiedliche bauliche und Feuchte-Situationen erkennen ließen. Dadurch wird ersichtlich welche flächig aufgelösten und exakten Aussagen mit der Methode möglich sind.

4 Zur Qualität der Aussagen

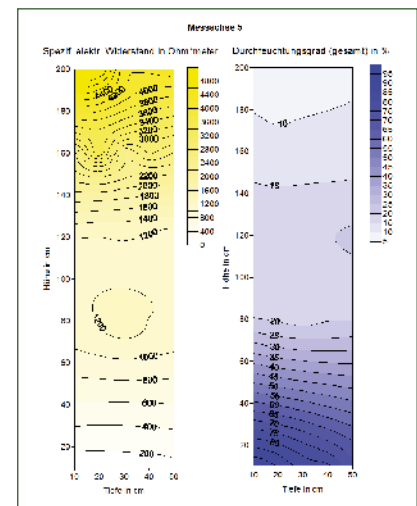
Selbstverständlich ist jede gravimetrische Feuchtemessung genauer als eine elektrische und zwar auch dann, wenn eine Kalibrierung vorgenommen wird. Die klassische Beprobung mit nachfolgenden gravimetrischen Untersuchungen liefert lediglich lokale Einzelaussagen und wirkt durch die zahlreichen Bohrkernentnahmen stark zerstörend. Diese Bohrkern lassen jedoch keinen Gesamtzusammenhang bzw. flächige Effekte erkennen. Mit Hilfe dieser (neuen) elektrischen Methode der Feuchte-tomografie besteht die Möglichkeit, sich ein Gesamtbild zu verschaffen, denn in einer durch die beiden Achsen Höhe und Tiefen wird ein 2D-Element, eine Fläche aufgespannt, innerhalb derer jedem Punkt der Fläche eine Feuchtigkeitsinformation zugeordnet werden kann. Tomogramme gestatten es, Feuchtequellen zu lokalisieren, die Funktion von Abdichtungen zu erfassen, denn sie kann vertikale und horizontale Feuchtegradienten aufzeigen. Auf diese Weise lassen sich auch Salzverteilungen beschreiben, wenn in analoger Weise vorgegangen wird.

Bild 1

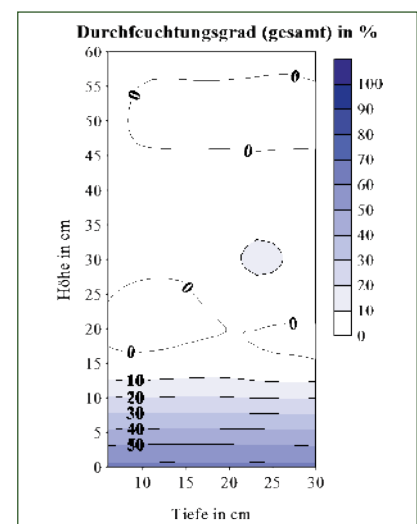
Kirche St. Petri, Hamburg
Im Mauerwerk der Kirche konnten auffällig große Feuchtigkeitskonzentrationen nachgewiesen werden, die darauf zurückzuführen sind, dass ungebrannte Materialien (Grünlinge aus Lehm) verarbeitet worden waren. Mit Hilfe der Röntgen-Diffraktometrie konnte dieses nachgewiesen werden. Ungebranntes Material speichert bzw. sammelt Feuchtigkeit der Umgebung quasi ein. Dieses Material besitzt keine ausreichende Festigkeit [Koss, Lesnych, 2013].

**Bild 2**

Weinlaubsaal, Schloss Schwerin (Mecklenburg-Vorpommern)
Das Mauerwerk des Weinlaubsaaus weist oberhalb des Terrains kaum Mauerwerksfeuchtigkeit auf, weil die Abdichtung funktionstüchtig ist [Koss, Lesnych, 2013].

**Bild 3**

Prinzenhaus Plön (Schleswig-Holstein)
In der Nähe der horizontalen Abdichtungen konnte durch Feuchtigkeitstomogramme ermittelt und eindeutig dokumentiert werden, dass intakte Abdichtungen vorliegen. Hohe Feuchtegehalte unterhalb sind streng getrennt von den trockenen Verhältnissen oberhalb der Abdichtungsebene [Koss, Lesnych, 2013].



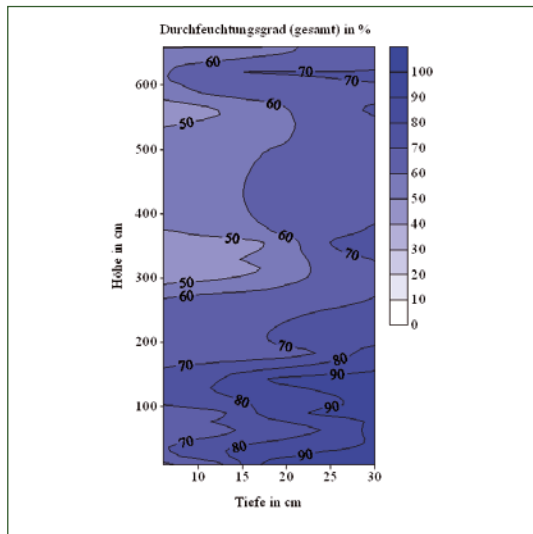


Bild 4
Windmühle Dübbøl-Sønderburg (Dänemark)
Das zweischalige Mauerwerk der Holländermühle weist eine Hohlschicht auf, die mit Ostseesand verfüllt worden ist. Abdichtungen sind nicht vorhanden. Der Ostseesand speichert große Wassermassen im terrainenahen Bereich und belastet die innere und die äußere Mauerwerksschale [Koss, Lesnych, 2013].

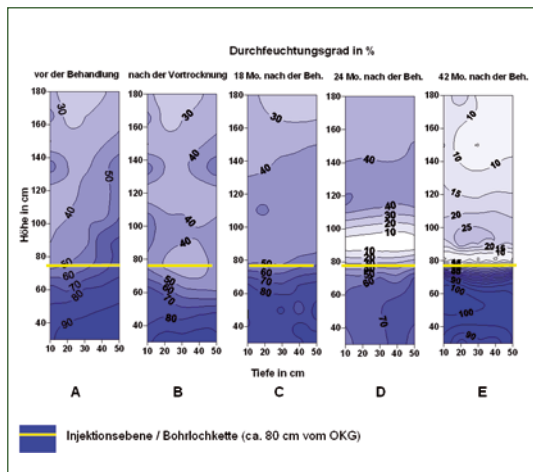


Bild 5
Thormann-Speicher Wismar nach der Sanierung zum Technologiezentrum (Mecklenburg-Vorpommern). Das Mauerwerk des Speichers wurde mit Injektionsmitteln behandelt, um eine nachträgliche Horizontalabdichtung herzustellen. In einem Zeitraum von 42 Monaten ist das Mauerwerk oberhalb der neuen Abdichtung so weit abgetrocknet, dass sich ein großer Feuchtegradient zwischen den Bereichen unter- und oberhalb der Abdichtung einstellt [Koss, Lesnych, 2013].

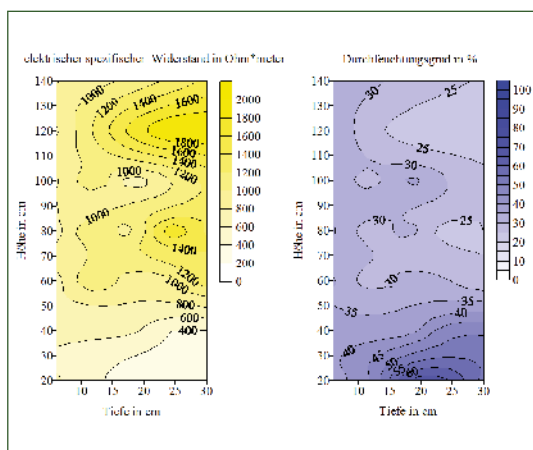
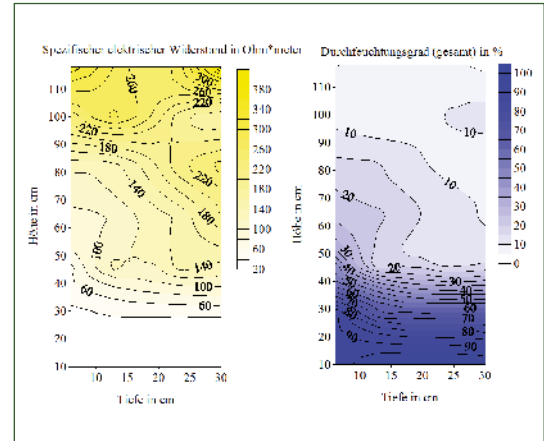


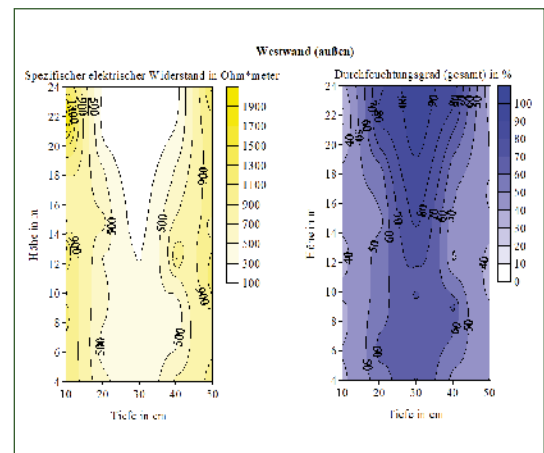
Bild 6
Mausoleum Ludwigslust »Heleen Paulownen« (Mecklenburg-Vorpommern)
Das Bauwerk ist infolge fehlender Rinnen und Fallrohre stark durch das Niederschlagswasser belastet. Besonders hohe Feuchtegehalte ergeben sich in der Höhe des Fußbodens des Mausoleums (siehe Putzschaden) [Koss, Lesnych, 2013].

Bild 7

Gut Hildebrandshagen (Mecklenburg-Vorpommern) Das Gutshaus weist trotz erheblicher Belastung durch Erdfeuchtigkeit im Erdgeschossbereich ein trockenes Mauerwerk auf. Hohe Durchfeuchtungsgrade unterhalb und niedere Durchfeuchtungsgrade über der Abdichtung lassen sich durch das Tomogramm veranschaulichen [Koss, Lesnych, 2013].

**Bild 8**

St. Laurentii Itzehoe (Schleswig-Holstein) Das Feuchte-Tomogramm (rechts) wurde in einem Höhenbereich von 4 bis 24 Meter über OK Gelände aufgenommen. Das Füllmaterial zwischen beiden Mauerwerksschalen enthält sehr viel Feuchtigkeit, die von oben im Bereich der kleinen Nebentürme infolge von Undichtigkeiten eindringen und dann weiter hineinlaufen kann [Koss, Lesnych, 2013].



Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

[Schmidt-Driedger, 2013] Schmidt-Driedger, M., (2013): Restfeuchtemessung, Interview der Zeitschrift Fliesen und Platten mit Prof. Venzmer, Wismar: Verlagsgesellschaft R. Müller Köln, H. 4

[Koss, Lesnych, 2013] Koss, L., Lesnych, N., (2013): Unveröffentlichte Untersuchungsberichte des Dahlberg-Institut e.V. zu den im Text genannten Objekten (1) Kirche St.-Petri zu Hamburg; (2) Weinlaubsaal im Schloss Schwerin; (3) Prinzenhaus Plön; (4) Windmühle Dybbel in Sonderburg (DK); (5) Thormann-Speicher in Wismar; (6) Mausoleum Ludwigs-lust; (7) Gut Hildebrandshagen und (8) Kirche St.-Laurentii, Itzehoe

Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2006, 2007, 2008, 2009 und 2010. Beuth-Verlag, Berlin-Wien-Zürich 2006 bis 2010

Venzmer, H. (Hrsg.): Fassadensanierung – Praxisbeispiele, Produkteigenschaften, Schutzfunktionen. Beuth-Verlag, Berlin-Wien-Zürich und Verlagsgesellschaft R. Müller, Köln 2011

Venzmer, H. (Hrsg.): Bautenschutz – Innovative Sanierungslösungen. Beuth-Verlag, Berlin-Wien-Zürich, 2014

Sinn und Notwendigkeit nachträglicher Fundamentabdichtung

Abdichtungsverfahren und konstruktive Maßnahmen

Wenn Fundamentabdichtungen bei Bauwerken aus Naturstein in Einzelfällen z. B. mit Teer, Pech oder Walzblei auch schon in früheren Jahrhunderten zu finden waren, so sind doch Abdichtungsmaßnahmen wie horizontale Sperrschichten erst ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts üblicher und häufiger anzutreffen. Die allgemein mächtigen Gebäudesockel aus Quader- oder Bruchsteinmauerwerk mit dünnen Fugen aus Kalkmörtel mit geringer Kapillarität benötigten in der Regel auch keine Abdichtung, solange die Oberflächen unverputzt geblieben sind.

Erst Umnutzungen oder Sanierungsmaßnahmen haben dafür gesorgt, dass Feuchteschäden aufgetreten sind, die nun z. B. Abdichtungsmaßnahmen im Fundamentbereich erforderlich machen können.

Ralf Ruhnau

Schlagwörter: Fundamentabdichtung, aufsteigende Feuchte, Salzbelastungen, Mauersägeverfahren, Blecheinrammverfahren, Fundamentunterfangung, Injektionsverfahren, Bitumen- oder Kunststoffbahnenabdichtung, kunststoffmodifizierte Beschichtungsstoffe, mineralische Abdichtung, Dichtschleierinjektion, Schlämme

1 Notwendigkeit nachträglicher Fundamentabdichtung

dichtungsleckage als Ursache für den vermeintlichen Feuchteschaden überflüssig (Bild 1).

1.1 Kenntnis von der bisherigen Gebäudenutzung

Bevor mit der Schadensaufnahme und Ursachenermittlung von Feuchteschäden begonnen wird, ist es äußerst hilfreich, sich zunächst mit der Gebäudehistorie vertraut zu machen. Dies gilt gleichermaßen für die bisherige Nutzung der betroffenen Räumlichkeiten wie auch für die gegebenenfalls ausgeführten baulichen Veränderungen. So führt beispielsweise die Kenntnis über die frühere Nutzung eines jetzigen Wohnhauses als Stallgebäude zu einer wesentlich zielgerichteteren, einfacheren und damit kostengünstigeren Salzanalyse und Sanierungsplanung gegenüber einer Bauwerksdiagnose ohne diese Vorkenntnis. Traten Feuchteschäden erst im Zusammenhang mit baulichen Eingriffen auf, z. B. Veränderungen von Geländeneigungen und -profilen angrenzend an das Bauwerk, kann diese Erkenntnis möglicherweise weitere Untersuchungen erübrigen und einfachste Sanierungsmöglichkeiten aufzeigen. Wurden früher unbeheizte Räume in hochwertig genutzten Wohnraum umgewandelt, ohne entsprechende Wärmedämmmaßnahmen vorzusehen, ist die Suche nach einer Ab-

1.2 Zukünftige Gebäudenutzung

Das vermeintliche Ziel ist oft alles »wasserdicht« zu planen und auf »unendliche« Nutzungsdauer auszulegen. Es ist jedoch nicht zwingend, beim Bauen im Bestand die Anforderungen an Abdichtungen auf Grundlage der für Neubauten geltenden Normen zu erfüllen. Für jede Sanierungsaufgabe ist individuell herauszufinden, was der Bauherr



Bild 1
Kellerwand mit Schimmelfall – Abdichtungsmangel oder mangelnder Wärmeschutz

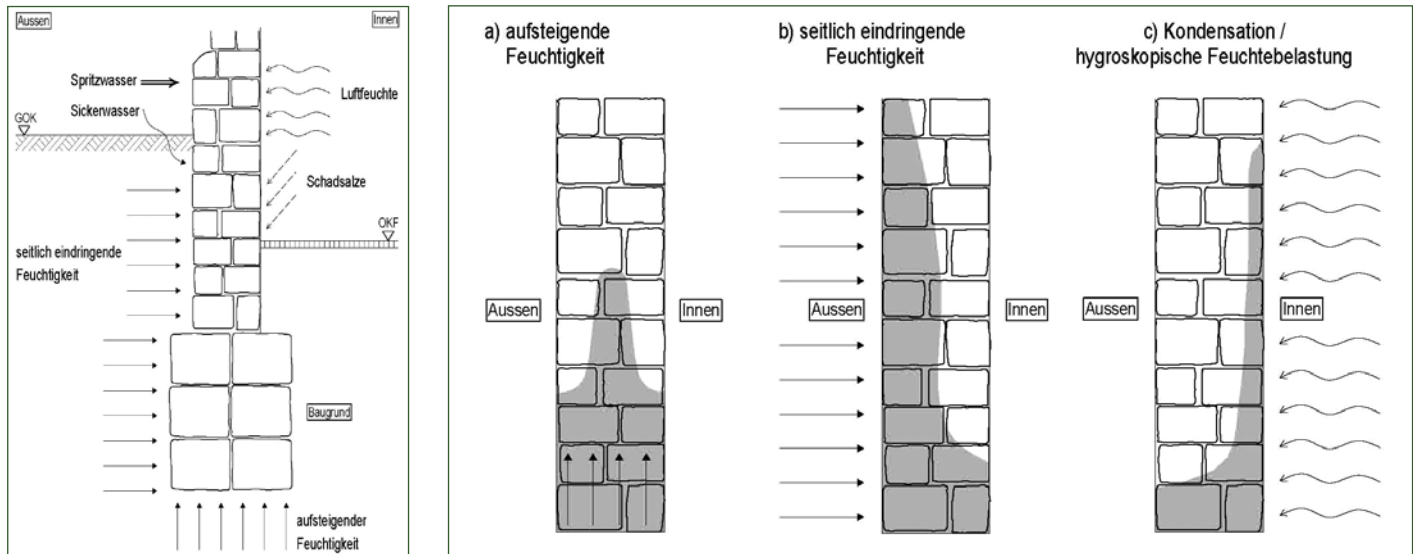


Bild 2 Feuchteeintrag in Gründungskörper [Sauder, Schloenbach, 2013]

Bild 3 Zusammenhänge zwischen Feuchtigkeitsprofilen und Feuchtigkeitsursachen [Bonk, Lufsky 2010]

oder Gebäudenutzer anstrebt:

- Welche zukünftige Nutzung ist vorgesehen?
- Welcher Nutzungszeitraum wird angestrebt?
- Welche Eingriffe in die Gebäudesubstanz sind vorgesehen und möglich?
- Welche Eingriffe in die Gebäudeumgebung sind vorgesehen und möglich?

Wenn der zu erfüllende Anspruch an die Gebäudenutzung klar definiert und die Möglichkeiten des Eingriffs in die Bausubstanz abgeklärt sind, kann mit der Bestandsaufnahme, Ursachenermittlung und anschließenden Sanierungsplanung begonnen werden. Entscheidend hierbei ist nicht die Einhaltung von Normvorgaben, noch nicht einmal die Einhaltung des allgemein anerkannten Standes der Technik, von zwingenden baurechtlichen Vorschriften abgesehen, sondern die auf die individuellen Belange des Bauherrn abgestimmte technische Lösung. Diese muss so kommuniziert werden, dass der Bauherr die Möglichkeiten und vor allem die Risiken der zu vereinbarenden Lösung der Sanierungsaufgabe versteht und nachvollziehen kann. Auf die Risiken muss schriftlich hingewiesen werden. Hierbei sind pragmatische, gegebenenfalls stufenweise vorzusehende Lösungsansätze durchaus legitim. Zunächst ein einfaches kostengünstiges Verfahren »auszuprobieren« und erst bei ausbleibendem Erfolg weitere Maßnahmen vorzusehen (trial and error), kann enorme Zeit- und Kostenersparnisse erbringen, muss aber mit dem Bauherrn eindeutig vereinbart sein.

1.3 Feuchtebeanspruchung aus dem Baugrund

Art und Ort des Eindringens von Feuchtigkeit in Grundmauern zeigt Bild 2. Durch das Anlegen von vertikalen und horizontalen Bohrprofilen und die Ermittlung der Feuchtegehalte an Bohrkernabschnitten können Feuchteprofile ermittelt werden, die Hinweise auf die Schadensursache liefern (Bild 3).

Aufsteigende Feuchtigkeit

Ein vertikales Bohrprofil z. B. im Abstand von 0,5 m ab OKF gemäß Bild 3a weist auf aufsteigende Feuchte über das Fundament hin. Es zeigt mit der Höhe des Bauteils abnehmende Durchfeuchtungsgrade an. Die kapillare Steighöhe der eindringenden Feuchtigkeit ist maßgeblich vom Stein- und Fugenmaterial aber auch von den seitlichen Verdunstungsmöglichkeiten abhängig. Feinporige Materialien weisen eine höhere Steighöhe auf, saugen die Feuchte jedoch langsamer als grobkörniges Material. Dichte Putze oder Anstriche erhöhen ebenfalls die kapillare Steighöhe.

Seitlich eindringende Feuchtigkeit

Ein vertikales und horizontales Bohrprofil gemäß Bild 3b weist mit gleichbleibenden Durchfeuchtungsgraden über die Höhe bei Außenwänden auf seitlich eindringende Feuchte hin.

1.4 Feuchtebeanspruchung aus dem Gebäudeinneren

Die Feuchtebeanspruchung der Grundmauern aus dem Gebäudeinneren resultiert immer aus dem mit der Raumluft eingetragenen Wasser, von Rohrbrüchen und Restfeuchte aus Baumaßnahmen abgesehen. Zwischen dem Feuchtegehalt der Raumluft und der Bauteilfeuchte wird sich im stationären Zustand immer ein Gleichgewicht einstellen. Bei üblichen Nutzungs- und Umgebungsbedingungen ist dies der praktische Feuchtegehalt. Ein höherer Feuchtegehalt im oberflächennahen Wandbereich weist darauf hin, dass eine erhöhte Feuchte bzw. ein Feuchteschaden aus der Aufnahme über die Raumluft vorliegt (Bild 3c). Ursache hierfür kann entweder eine zu hohe relative Raumluftfeuchtigkeit sein oder/und eine Belastung der Wand mit Schadsalzen (Tabelle 1), die dazu führt, dass die hygroskopische Wasseraufnahme gegenüber der hygroskopischen Ausgleichsfeuchte (Tabelle 2) soweit zunehmen kann, dass allein dadurch Feuchteschäden ausgelöst werden.

Auch beim Fehlen von Salzbelastungen können abhängig vom Nutzerverhalten und vom »Wärmedämm-Standard« gerade in Kellerräumen sowohl im Winter wie auch im Sommer Kondensationerscheinungen auf den vergleichsweise kalten Wandoberflächen zu Schäden führen. Derartige aus der Raumluft resultierende Feuchteschäden können nicht durch Abdichtungsmaßnahmen saniert werden.

2 Möglichkeiten nachträglicher Fundamentabdichtung

2.1 Ganzheitliche Sanierungsplanung

Unabhängig davon ob Mauerwerk aus Naturstein oder anderen Baustoffen besteht, die Schritte der Sanierungsplanung von Feuchteschäden und deren Reihenfolge sind vorgegeben:

1. Beseitigung der Feuchtequelle,
2. Austrocknung des Bauwerkes,
3. Beseitigung der Feuchteschäden.

Tabelle 1

Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen im Mauerwerk entsprechend der Konzentration in M-% [Sauder, Schloenbach, 2013]

Salzionen	Konzentration	Konzentration	Konzentration
Chloride	< 0,2	0,2–0,5	> 0,5
Nitrate	< 0,1	0,1–0,3	> 0,3
Sulfate	< 0,5	0,5–1,5	> 1,5
	<i>Belastung gering</i>	<i>Belastung mittel</i>	<i>Belastung hoch</i>
		weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt notwendig (Salzverbindung, Kationenbestimmung)	weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt notwendig (Salzverbindung, Kationenbestimmung)
	<i>Maßnahmen im Ausnahmefall erforderlich</i>	<i>Maßnahmen im Einzelfall erforderlich</i>	<i>Maßnahmen erforderlich</i>

Tabelle 2

Hygroskopische Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher Baustoffe [Sauder, Schloenbach, 2013], [WTA Merkblätter, 2006, 2004, 2002, 2000]

Baustoff	Hygroskopische Ausgleichsfeuchten in M-% 75 % rel. Luftfeuchte 95 % rel. Luftfeuchte	
Historische Vollziegel	< 2 bis 3	Wert liegt nicht vor
Kalkzementputz	< 1,5	Wert liegt nicht vor
Kalkputz, Kalkmörtel	< 0,5	Wert liegt nicht vor
Kalksandstein	1,3 (80 % rel. Feuchte)	Wert liegt nicht vor
Vulkanischer Tuff	< 6	< 10
Rheinischer Tuff	< 2	< 4
Toniger Sandstein	< 1,3	< 2
Quarzitischer Sandstein	Wert liegt nicht vor	< 0,2
Karbonatischer Sandstein	< 0,8	< 1,3
Granit	< 0,1	< 0,2
Marmor	< 0,01	< 0,05

Es ist eher die Ausnahme, dass eine einzige Feuchtequelle schadensursächlich ist. Ob und wie die Ursachen zu beseitigen sind, ist im Einzelfall unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzuwägen und mit dem Bauherren zu vereinbaren. Dabei hängen Sinn oder Unsinn von Abdichtungsmaßnahmen gerade bei Natursteinfundamenten



Bild 4 und -grundmauern im hohen Maße vom Stein- und Fugenmaterial sowie den Fugenverläufen ab. Grundsätzlich ist zwischen Bruchsteinmauerwerk mit unregelmäßigem Fugenverlauf (Bild 4a) oder Schichten- und Quadermauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen (Bild 4b) zu unterscheiden und ob es sich um Vollmauerwerk oder mehrschalige Konstruktionen handelt.

- a) Bruchsteinmauerwerk mit unregelmäßigem Fugenverlauf
b) Quadermauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen

2.2 Fundamentabdichtung bei Feuchtebeanspruchung aus dem Baugrund

Herstellung einer Horizontalsperre

- **Mauersägeverfahren**
Es ist nur bei Schicht- und Quadermauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen sinnvoll und abhängig vom Steinmaterial.
- **Blecheinrammverfahren**
Dieses Verfahren ist ebenfalls nur bei Schicht- und Quadermauerwerk mit durchgehenden Lagerfugen sinnvoll einsetzbar, mit der Gefahr von Schäden durch Erschütterungen, insbesondere bei weniger robuster denkmalgeschützter Bausubstanz.
- **Fundamentunterfangung mit Blechen oder WU-Beton**
Dies ist ein sehr aufwendiges, sorgfältig zu planendes Verfahren, was aber eine sehr wirksame Trockenlegung des Fundamentkörpers selbst bewirkt,

ohne unmittelbaren Eingriff in die vorhandene Gebäudesubstanz.

- **Injektionsverfahren**
Dafür stehen unterschiedlichste Materialien und Verfahren zur Verfügung, die im Einzelfall differenziert auszuwählen und zu planen sind. Bei dichten Steinen ist gegebenenfalls nur eine Injektion des Fugennetzes sinnvoll. Unabhängig von dem ausgewählten Verfahren sind stets Probeinjektionen vorzunehmen, um die tatsächliche Anwendbarkeit zu überprüfen [Ruhnau et al., 2005].

Herstellung oder Erneuerung einer Vertikalabdichtung

- **Bitumen- oder Kunststoffbahnenabdichtung**
Als Voraussetzung für das Aufbringen von Bahnendichtungen sind feste ebene Oberflächen erforderlich (i. d. R. Putzgrund), wobei insbesondere der Übergang zwischen Fundament und aufgehender Wand sorgfältig vorzubereiten und auszuführen ist. Für unverputzte Natursteinfundamente ist dieses Verfahren in der Regel sehr aufwändig und eher nicht anzuwenden.
- **Kunststoffmodifizierte Beschichtungsstoffe**
Auch hier ist eine sorgfältige Untergrundvorbereitung erforderlich, um gleichmäßige Schichtdicken der Abdichtung zu ermöglichen. Insbesondere der Übergang Fundament/aufgehende Wand ist mit Hohlkehle sorgfältig herzustellen und es ist Sorge

zu tragen, dass vor Bodenverfüllung die Abdichtung ausreichend durchgetrocknet ist. Ein Auftrag auf unverputztem Natursteinmauerwerk ist in der Regel fachgerecht nicht möglich.

■ Mineralische Abdichtung

Bei rissfreiem und nicht rissgefährdetem Untergrund ist dies eine vergleichsweise einfache und kostengünstige Lösung, allerdings mit geringem Sicherheitsniveau, da bereits geringfügige Rissbildungen durch Bewegungen oder sonstige Einflüsse im Mauerwerk auch zu Rissen in der Abdichtungsschicht führen.

■ Flexible Dichtungsschlämme

Für flexible Dichtungsschlämme ist ebenfalls eine sorgfältige Untergrundvorbereitung zur Erzielung gleichmäßiger Schichtdicken notwendig und dementsprechend ist hier für unverputzte Natursteinfundamente auch ein vergleichsweise großer Aufwand erforderlich. [Ruhnau et al., 2005]

Abdichtungsalternativen

■ Dichtschleierinjektion in den Baugrund

Dieses Verfahren ist nur zu empfehlen, wenn keine alternativen Abdichtungsmöglichkeiten in Frage kommen, da in dem inhomogenen Baugrund der Erfolg in der Regel nur nach mehrfacher Nachinjektion zu erzielen ist und oftmals nicht in vollem Umfang wirksam wird [Ruhnau et al., 2005].

■ Innenabdichtung mit Schlämme

Sofern mit diesem Verfahren überhaupt ein Abdichtungserfolg erzielt wird, besteht in hohem Maße die Gefahr weiterer Durchfeuchtung auch höherliegender Wandbereiche. Als vollwertige Abdichtungsmaßnahme ist dies eher nicht geeignet [Ruhnau et al., 1995].

■ Innenabdichtung als Dichtwanne

Der Einbau einer innen liegenden Wannenkonstruktion aus WU-Beton oder Stahlblech ist zwar aufwendig zu planen und hat einen Verlust von Nutzfläche zur Folge, ist aber in hohem Maße wirksam und kommt dann in Frage, wenn außenseitige Maßnahmen oder Maßnahmen an der vorhandenen Bausubstanz selbst nicht in Frage kommen. Bei einer innen liegenden Wanne bleibt die vorhandene Altbaukonstruktion der Durchnässung weiterhin ausgesetzt [Ruhnau et al., 2005].

■ Sanierputz

Bei geringer Feuchtebelastung und hoher Versalzung stellt Sanierputz eine geeignete temporäre Maßnahme dar, um den eigentlichen Feuchteschaden zu kaschieren. In Verbindung mit einer guten Durchlüftung der Räume zum Abführen der nach wie vor auftretenden Feuchte (lediglich die Salze bleiben in dem Sanierputz zurück) kann eine aufwendige Abdichtungsmaßnahme gegebenenfalls entfallen, insbesondere wenn kürzere Nutzungsdauern angestrebt werden.

■ Hinterlüftete Wand-Fußboden-Konstruktion

Die Anbringung hinterlüfteter Innenwand- und Fußbodenbekleidungen stellt eine alternative Möglichkeit dar. Bei geringen Feuchteeinträgen und Versalzungen des Mauerwerks. Hierbei wird der eigentliche Schaden nicht beseitigt, sondern lediglich kaschiert und die Feuchte wird gezielt mit der Raumluft oder mechanisch unterstützt abgeführt.

■ Alternative »physikalische« Verfahren

Auf dem Markt existieren diverse angepriesene »physikalische« Verfahren zur Abdichtung, deren Wirksamkeit nicht nachgewiesen werden kann und die bei verantwortungsbewussten Sanierungsplanungen nicht in Betracht gezogen werden sollten.

Reduzierung der Feuchtebeaufschlagung

■ Herstellung von Dränungen

Im Einzelfall stellt die Anordnung von Dränanlagen nach DIN 4095 [DIN 4095, 1990-06] eine wirksame Maßnahme dar, ohne dass ein Eingriff in die eigentliche Gebäudesubstanz erforderlich ist. Sofern im Zuge des Einbaus von Dränanlagen die Grundmauern freigelegt werden, wird in der Regel hier zusätzlich eine Abdichtung aufgebracht.

■ Geländeprofilierung

Die Veränderung der Geländeprofilierung kann in Einzelfällen eine wirksame und äußerst kostengünstige Maßnahme sein. Durch Herstellung von Oberflächenprofilen vom Gebäude weg, gegebenenfalls im Zusammenhang mit der Führung von Dachentwässerungen, wird eine Wasserbeaufschlagung vom Gebäude weitgehend fern gehalten, so dass unter Umständen keine Abdichtungsmaßnahmen am Gebäude notwendig werden.

■ Geländeversiegelung

Eine Versiegelung des Geländes um das Gebäude herum kann eine unterstützende Maßnahme bei der Geländeprofilierung zur weiteren Reduktion der Feuchtebeaufschlagung des Gebäudes darstellen.

serbedingte Feuchteschäden vorhanden sind und eine grundsätzliche Verbesserung der Wärmedämmung nicht in Betracht kommt, sind im Einzelfall gezielte Wärmebrückenbeheizungen sinnvoll und kostenmäßig günstige Alternativen.

Reduktion der Feuchtebeanspruchung aus dem Gebäudeinneren

■ Entsalzung

Zur Entfernung von Schadsalzen aus Mauerwerk und Fugen gibt es zahlreiche Möglichkeiten. Diese Verfahren sind mehr oder weniger aufwendig und in der Regel nur bei im Ursprungszustand zu erhaltendem Natursteinmauerwerk zu empfehlen (Ausnahme Sanierputz als »Opferputz«).

■ Regelung des Raumklimas

Mit Herstellung nutzungsgerechter Klimate durch natürliche Lüftung und Heizung oder auch durch Klimatisierung der betroffenen Räume ist das Raumklima zu regeln und anfallende Feuchtigkeit gezielt mit der Raumluft abzuführen.

■ Verbesserung der Wärmedämmung

Im Zusammenwirken mit der Regelung des Raumklimas sind Wärmedämmmaßnahmen zu planen und auszuführen wie z. B. das Aufbringen von Wärmedämmschichten zur Vermeidung von Tauwasseranfall. Hier sind ganzheitliche Planungen erforderlich, um erneute Sanierungsfehler zu vermeiden.

■ Beheizung von Wärmebrücken

Sofern lediglich punktuell bzw. kleinflächig tauwas-

3 Empfehlungen

Für die nachträgliche Abdichtung von Natursteinfundamenten stehen, wie für andere Wandbaustoffe auch, zahlreiche Verfahren zur Verfügung, die bei sachgerechter Planung und Ausführung für eine dauerhafte Beseitigung von Feuchteschäden führen können. Gerade die Fülle dieser potenziellen Möglichkeiten führt in der Praxis häufig zu Fehlanwendungen und überzogenen Maßnahmen. Die bloße Anwendung von Normwissen und Umsetzung von Vorgaben aus Richtlinien und Merkblättern dient weder dem zu sanierenden Bauwerk mit oftmals hohem denkmalpflegerischen Wert noch dem wirtschaftlichen Interesse des Bauherrn.

Die vorausgehende sorgfältige Analyse der zukünftigen Anforderungen von Bauherrn und Gebäudenutzern sowie die Anamnese des zu sanierenden Bauwerkes kann zu nutzungsorientierten pragmatischen Lösungen führen, auch ohne den allgemein anerkannten Regeln der Technik im Einzelnen zu entsprechen. Voraussetzung hierfür ist die Kommunikation mit dem Bauherrn und die klare Vereinbarung der geschuldeten Planungs- und Sanierungsleistungen.

Literatur und Quellen

- [Sauder, Schloenbach, 2013] Sauder, M., Schloenbach, R., (2013): Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein. Band 11, Fachbuchreihe »Schadenfreies Bauen«, Hrsg. Ralf Ruhnau, IRB Verlag
- [Bonk, Lufsky, 2010] Bonk, M., Lufsky, K., (2010): Bauwerksabdichtungen. Hrsg. Michael Bonk, 7. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag

- [Ruhnau et al., 2005] Ruhnau, R., Platts, T., Wetzel, H., (2005): Schäden an Abdichtungen erdberührter Bauteile, Band 36, Fachbuchreihe »Schadenfreies Bauen«, Hrsg. Ralf Ruhnau, IRB Verlag

Salzschäden an Bauwerken – Ursachen und Wirkungsmechanismen

Salzbildung, ein wichtiger Schadensfaktor an historischen Bauwerken, kann nur dann umfassend beurteilt werden, wenn sowohl Anionen- wie auch Kationenanalysen vorliegen und die sich bildenden Schadsalze bekannt sind. Die wirkenden Schadensmechanismen lassen sich auf die in der Praxis an den Objekten sichtbaren Schadensbilder übertragen. Schäden durch Salze gehören zu den am häufigsten und auch wirksamsten Schadensprozessen, die an Bauwerken wirken. Das Erkennen und Beurteilen dieser Salzschäden sowie die Kenntnis der Art und Verteilung der Salze und ihrer Wirkung am Bauwerk sind notwendige Voraussetzungen, um wirkungsvolle Erhaltungsmaßnahmen treffen zu können.

*Hans-Jürgen Schwarz
Michael Steiger*

Schlagwörter: Salzschäden, Kristallisationsdruck, Salze, Schadensmechanismus

1 Salzbildende Ionen und Salze im Mauerwerk

Das Problem der Salzschäden wird vielfach mit Hilfe vorhandener Merkblätter bzw. Normen angegangen. So existieren z. B. zwei WTA-Merkblätter, die sich mit der Salzbehandlung auseinander setzen.

WTA Merkblatt 2-10-06: Opferputze:

Dieses Merkblatt definiert, wie Salzausblühungen und Belastungen durch Salze beseitigt bzw. reduziert werden, indem die Salze gezielt in den Opferputz einwandern sollen.

WTA-Merkblatt 3-13-01: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen – führt aus:

»Die meisten Ausblühungen an Oberflächen und im Porenraum von Baustoffen bestehen überwiegend aus sogenannten ›bauschädlichen Salzen‹ (Bild 1). Bauschädliche Salze sind leichtlösliche, ionar gebundene, meist anorganische Verbindungen, die in porösen Baustoffen durch mechanische Belastungen im Materialgefüge und/oder durch chemische Wirkung zu Schäden führen. Sie können ungelöst als Salzausblühungen vorliegen oder



Bild 1
Salzkruste auf einem
Ziegelmauerwerk

bereits, durch die Anwesenheit von Wasser, vollständig oder teilweise gelöst sein. Eine allgemeine Angabe bauschädlicher Mindestsalzgehalte kann wegen der Vielfalt der Einflüsse des Baustoffgefüges und der zahlreichen möglichen Salzkombinationen nicht gegeben werden. Dennoch lassen sich aus Praxiserfahrungen und Experimenten Größenordnungen für die Anionengehalte ableiten, ab denen mit einer Gefährdung gerechnet werden kann.«

Aus Gründen der Praktikabilität, der Kostenersparnis für Untersuchungsfälle und auf Grund der zahlreichen Fälle, in denen nur Anionen untersucht wurden, sind in den Merkblättern immer noch nur »kritische« Anionengehalte aufgeführt. Wie in vielen Studien und praxisnahen Untersuchungen festgestellt wurde, ist es jedoch in der Regel nicht ausreichend, nur die Anionen zu kennen, sondern es ist unerlässlich, Anionen- und Kationengehalte bzw. die Salzminerale selbst zu bestimmen [Arnold, Zehnder, 1990], [Zier, 2002] um

- die Gesamtbelastung/Gefährdung einschätzen zu können,
- potentielle Salzkristallisationen vorhersagen zu können,
- mögliche Quellen zu identifizieren und
- an die Salzbelastung angepasste Maßnahmen planen zu können.

Dies wird sofort klar, indem die Unterschiede im Schadenspotential vergegenwärtigt werden bei gleichhohen Nitrat-, Chlorid- und Sulfatgehalten, wenn es sich zum einen um Calcium als Kation und zum anderen um Natrium als Kation handelt. Liegt Calcium vor, so können im Wesentlichen problematische Gipsverbindungen auftreten, da die Calciumchloride und -nitrate sehr hygroskopisch und deshalb kaum kristallin vorliegen und selten zu Schäden führen. Mit Natrium als Kation liegt jedoch ein Salzsystem mit sehr hohem Schadenspotential vor, da Natrium mit allen Anionen stark schädigende Salze, wie z. B. Thenardit (Na_2SO_4), Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), Nitronatrit (NaNO_3) und Halit (NaCl) bei normalen Klimaverhältnissen bilden kann.

Aus der Tatsache, dass der weitaus größte Teil der bauschädlichen Salze sich aus den Ionen Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- und $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ zusammensetzt, jedoch in der Standard-Analytik meist alle Ionen bis auf Carbonat bestimmt werden, wird ersichtlich, dass selbst durch die Standardanalytik von Anionen und Kationen ein Teil der Salze nicht erfasst wird [Bläuer-Böhm, 2005]. Ersetzt werden kann in gewissem Rahmen die chemische Carbonatbestimmung, für die die gängigen Analyseverfahren wie die Ionenchromatographie nicht eingesetzt werden können, durch eine Phasenanalytik (Röntgenbeugung oder Mikroskopie).

2 Welche Salzausblühungen werden beobachtet

Von großem Interesse sind die bei höheren Konzentrationen und die beim Erreichen der Kristallisationsbedingungen tatsächlich gebildeten Salzausblühungen. Zusammen mit der Zusammensetzung der Restlösungen und Kristallisate in den Poren geben sie einen guten Hinweis auf die ursprüngliche Zusammensetzung der Salzmischungen. Da oft bevorzugt ausgeblühte Salze an Oberflächen, und hier die besonders augenfälligen Ausblühungen, untersucht werden, gilt es, dies bei analytischen Untersuchungen und der nachfolgenden Interpretation zu berücksichtigen. Einen Überblick der real gefundenen Salze ([Arnold, 1981], [Bläuer-Böhm, 1996], [Nägele, 1994], [Grassegger, 1992]) findet sich bei [Grassegger, Schwarz, 2008]. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Salze zusammen mit der Deliqueszenzfeuchte aufgelistet.

Salze treten in unterschiedlicher Konzentration und Verteilung in Abhängigkeit von der Exposition (innen, außen), des Untergrundes, der Nähe zum Meer (verstärkt NaCl) und anderen Faktoren auf. Allmann und Kraus [Allmann, Kraus, 2003] kommen zu der Schlussfolgerung, dass Sulfate mengenmäßig bei weitem dominieren.

Als typische Milieus, in denen Salze an Bauwerken auftreten, werden genannt:

- Bei Sulfaten ist es substratabhängig, welche Salze auftreten, wobei das Kation meist aus dem Untergrund stammt und der SO_2 -Anteil durch saure Immissionen geliefert wird. Die wichtigsten Salze sind Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Thenardit (Na_2SO_4), Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) sowie verschiedene MgSO_4 -Hydrate, u. a. Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) und Hexahydrat ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).
- Hohe Nitratgehalte werden häufig mit aufsteigender Feuchte eingetragen und stammen überwiegend aus Dünger, Gülle und dem Abbau organischer Substanz. Die häufigsten Salze sind Nitrokalit (KNO_3) und Nitronatrit (NaNO_3).
- Carbonate treten oft in Zusammenhang mit der Verarbeitung von zementhaltigen Bindemitteln auf. Die wichtigsten Salze sind Thermo-

natrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) und Trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

- Chloride, vor allem Halit (NaCl), treten meist in küstennahen Standorten auf und werden dort über die Luft, aber auch bei Überschwemmungen eingetragen oder stammen z. B. aus dem Einsatz von Halit als Konservierungsmittel oder Streusalz.

3 Wann sind Salze am Bauwerk schädlich

Das WTA Merkblatt 3-13-01: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen – legt auf Grund von zahlreichen Daten und baupraktischen Erfahrungen annähernde Grenzen als Richtwerte für eine Behandlungsbedürftigkeit vor. Die in Regelwerken genannten Anionenwerte sind allein unzulänglich, um eine Aussage über das Schadenspotential und daraus abzuleitende Maßnahmen treffen zu können. Nur bei Kenntnis der Anionen- und Kationen-gehalte ist eine kompetente Aussage möglich. Da die Grenzwerte der Merkblätter in der Regel das am meisten schädliche Salzsyste annehmen, werden darauf basierend oft Maßnahmen getroffen, die bei Kenntnis der Kationen substanzschonender und oft auch kostengünstiger durchführbar gewesen wären.

4 Mechanismen der Schädigung der Bausubstanz durch Salzkristallisation

Durch Verdunstung von Wasser konzentrieren sich die Porenlösungen in Baustoffen auf und bei Überschreitung der Löslichkeit eines Inhaltsstoffes kann es zu Kristallisationsprozessen kommen. Bei der Trocknung eines mit Feuchtigkeit gesättigten porösen Baustoffes liegt der Verdunstungshorizont zunächst an der Materialoberfläche und verlagert sich im Verlauf der Trocknung in das Materialinnere. Je nach den Trocknungsbedingungen, der Konzentration und Zusammensetzung der Porenlösung sowie den feuchtetechnischen Materialeigenschaften

Tabelle 1

Die wichtigsten bauschädlichen Salze und ihre Deliqueszenzfeuchtigkeiten

Name	Formel	Deliqueszenzfeuchte [%RH]
Antarcticit	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33,3 (20 °C), 39,4 (10 °C)
Aphthalit(Glaserit)	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	96,5 (20 °C)
Astrakanit (Bloedit)	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	83,8 (23 °C)
Darapskit	$\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$	80,9 (20 °C)
Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	91,3 (20 °C), 93,1 (10 °C)
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100 (0–42 °C)
Halit	NaCl	75,4 (20 °C), 75,6 (10 °C)
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	65,0 (20 °C), 61,9 (10 °C)
Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	95,6 (20 °C), 97,8 (10 °C)
Nitrocalcit	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	53,1 (20 °C), 58,8 (10 °C)
Nitrokalit	KNO_3	93,7 (20 °C), 95,5 (10 °C)
Nitromagnesit	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	55,7 (20 °C), 58,6 (10 °C)
Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	90,1 (26 °C)
Nitronatrit	NaNO_3	75,2 (20 °C), 77,7 (10 °C)
Pottasche	K_2CO_3	43,2 (20 °C), 43,1 (10 °C)
Schönit,(Pikromerit)	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	nicht bestimmt
Thenardit	Na_2SO_4	86,6 (20 °C), (85,6 10 °C)
Thermonatrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	78,3 (35,7 °C)
Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	nicht bestimmt

ten kann also das Kristallwachstum der Salze entweder auf der äußeren Oberfläche oder im Porenraum des Materials erfolgen. Im ersten Fall bilden die ausgeschiedenen Salzkristalle Ausblühungen (Effloreszenzen), im zweiten Fall spricht man von Subfloreszenzen. Abgesehen von einer ästhetischen Beeinträchtigung der Materialoberfläche führen Ausblühungen normalerweise nicht zu einer direkten Materialschädigung (Bild 2).

Damit Kristallwachstum zu einer mechanischen Belastung und damit zur Schädigung eines porösen Materials führen kann, muss der wachsende Salzkristall eingeschlossen und dennoch in der Lage sein, gegen den durch die Porenwand ausgeübten Druck weiter zu wachsen. Nur dann kann auf das Gefüge eine mechanische Belastung in Form einer Zugspannung ausgeübt werden. Der durch Kristallwachstum im Porenraum ausgeübte Druck



Bild 2
Alveolarverwitterung an Naturstein durch Salzkristallisation

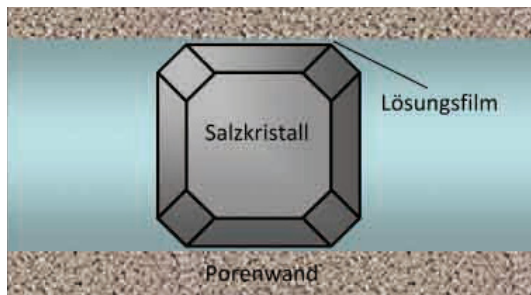


Bild 3
In Pore eingeschlossener Kristall mit Lösungsfilm

wird als Kristallisationsdruck bezeichnet. Da die Zugfestigkeiten der meisten Baustoffe viel geringer sind als ihre Druckfestigkeiten (üblicherweise ca. eine Größenordnung), sind diese Materialien recht empfindlich gegenüber Salzkristallisation im Porenraum.

Druckaufbau durch einen wachsenden Salzkristall ist nur möglich, wenn das Wachstum an der Grenzfläche Kristall-Porenwand stattfindet, d. h. es muss der Transport von Ionen in gelöster Form zu dieser Grenzfläche gewährleistet sein. Voraussetzung ist also die Existenz eines Lösungsfilmes zwischen Salzkristall und Porenwand (Bild 3). Abstoßende Kräfte zwischen Salzkristall und Porenwand führen zu einem Abstoßungsdruck (disjoining pressure) [Israelachvili, 1991], der ausreichend groß sein muss, um dem Druck durch den wachsenden Salzkristall standzuhalten. Übersteigt der Kristallisationsdruck den Abstoßungsdruck, so wird der direkte Kontakt zwischen Porenwand und Salzkristall erzwungen und es ist kein weiteres Kristallwachstum an der Grenzfläche zur Porenwand mehr mög-

lich. Wachstum kann dann nur noch an den freien Kristallflächen stattfinden und führt nicht zu weiterem Druckaufbau. Der Abstoßungsdruck entspricht also dem maximalen Kristallisationsdruck.

Die in vielen Laborexperimenten erhaltenen Ergebnisse lassen sich grundsätzlich auch auf die Bedingungen an Bauwerken übertragen, da die verschiedenen Salze dort den gleichen Prozessen ausgesetzt sind. Zyklische Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit führen dazu, dass einige Salze ständigen Lösungskristallisations-Wechseln unterliegen, die durch Deliquescenz (Wiederauflösung in der Lösung) bei erhöhter Luftfeuchtigkeit und Verdunstungstrocknung bei niedriger Luftfeuchtigkeit angetrieben werden. Schließlich können Salze auch alleine durch Temperaturwechsel Lösungs-Kristallisations-Zyklen unterliegen. Insofern finden sich auch am Bauwerk für alle bei [Steiger, Asmussen, 2008] beschriebenen Laborexperimente entsprechende Bedingungen. Allerdings werden Laborversuche üblicherweise unter drastischeren Bedingungen durchgeführt, um den Schadensprozess zu beschleunigen. So werden meist recht hohe Salzkonzentrationen verwendet und die Versuchsbedingungen werden so gewählt, dass hohe Übersättigungen und starke Salzanreicherungen resultieren.

Die meisten Laborversuche wurden in der Vergangenheit mit Natriumsulfat und Magnesiumsulfat durchgeführt. Diese Salze gelten als besonders aggressiv und sind deshalb gut geeignet, um die Widerstandsfähigkeit von Baustoffen gegen Salzkristallisation zu prüfen. Dennoch können am Bauwerk ganz ähnliche Prozesse wie im klassischen Sprengversuch ablaufen. Gelangen Ausblühungen von wasserfreiem Natriumsulfat oder einem niedrigen Magnesiumsulfat-Hydrat in Kontakt mit flüssigem Wasser, so lösen sie sich auf und eine sehr konzentrierte, bezüglich der höheren Hydrate übersättigte Lösung dringt kapillar in das poröse Material ein, wo es dann zur Kristallisation kommt. Bemerkenswert ist, dass in diesem Fall der Schadensvorgang durch Wasseraufnahme ausgelöst wird und nicht durch Verdunstung. Zu erwähnen ist, dass ein völlig analoger Schadensprozess auch für Ausblühungen des an Bauwerken nicht selten anzutreffenden basischen Natriumcarbonats ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) zu erwarten ist. Tatsächlich hat

sich Natriumcarbonat in Laborversuchen als sehr wirksam erwiesen (vgl. [Goudie, Viles, 1997]). Schließlich ist auch zu erwähnen, dass für alle an Bauwerken beobachteten Doppelsalze ein analoger Schadensmechanismus zu erwarten ist, da es sich ausnahmslos um inkongruent lösliche Doppelsalze handelt. Ihre gesättigten Lösungen sind deshalb immer bezüglich einer der beiden Komponenten mehr oder weniger stark übersättigt. Das Verhalten von Doppelsalzen ist jedoch bisher kaum untersucht worden.

Weitaus verbreiteter an Bauwerken dürften zyklische Auflösungs-Kristallisationsprozesse sein, bei denen die Salzkristallisation während der Trocknungsphase einsetzt und Schäden verursacht. Diese Prozesse werden durch zyklische Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit in Gang gesetzt. Steigt die relative Luftfeuchtigkeit über die Deliqueszenzfeuchtigkeit eines Salzes an, so nimmt das Salz Wasser aus der Luft auf und bildet eine konzentrierte Porenlösung. Sinkt die Umgebungsluftfeuchtigkeit wieder, so verdunstet Wasser, die Porenlösung konzentriert sich auf und es kommt zur Kristallisation. Versuche zur kontinuierlichen Verdunstung einer Natriumsulfatlösung [Steiger, Asmussen, 2008] belegen, dass unter bestimmten Bedingungen extrem hohe Übersättigungen möglich sind und zu massiven Schädigungen poröser Materialien führen. Allerdings sind am Bauwerk die Bedingungen normalerweise weniger drastisch, da kleinere Salzgehalte vorliegen und normalerweise kein permanenter Nachschub mit Salzlösung gewährleistet ist.

Am Bauwerk werden sehr häufig Schäden durch Kristallisation von Natriumchlorid (NaCl) beobachtet, einem Salz, das sich im Laborversuch norma-

lerweise als weniger wirksam erweist als Natriumsulfat. Ursache hierfür ist sicherlich die Tatsache, dass NaCl unter den Bedingungen typischer Laborexperimente weitaus weniger leicht zur Übersättigung neigt als beispielsweise Natriumsulfat. Aus diesem Grund ist es schwieriger, gezielt in Laborexperimenten die Bedingungen zu realisieren, unter denen NaCl-Kristallisation besonders schadenswirksam ist. Es ist vollkommen unstrittig, dass NaCl eines der an Bauwerken wichtigsten Schadenssalze darstellt. Auch im Laborversuch kann man durch Kristallisation von NaCl (Halit) Schäden erzeugen, die Experimente sind allerdings nicht so spektakulär wie mit einigen anderen Salzen. Dennoch steht das Verhalten des Salzes in völligem Einklang mit dem beschriebenen Mechanismus und es besteht keine Notwendigkeit, andere Mechanismen in Betracht zu ziehen. Berücksichtigt man, dass NaCl im Gegensatz zu anderen Salzen kaum zur Übersättigung neigt und auf Grund seines kleinen molaren Volumens recht hohe Salzgehalte erforderlich sind, um merkliche Porenfüllgrade zu erzielen, ist zu erklären, dass in Laborversuchen NaCl im Vergleich zu anderen Salzen weniger wirksam ist. Umgekehrt ist aber bekannt, dass NaCl-Kristalle bereits bei sehr niedrigen Übersättigungen extrem hohe Kristallisationsdrücke erzeugen können [Steiger, 2005], [Steiger, 2006]. Unter Berücksichtigung der weiten Verbreitung von NaCl in Bauwerken ist deshalb verständlich, dass zyklische Schwankungen der Luftfeuchtigkeit um die Deliqueszenzfeuchte von NaCl schnell zu Materialschäden führen. Je nach Zusammensetzung eines Salzgemisches liegt diese kritische Luftfeuchtigkeit im Falle von NaCl bei Werten von 40%–75% r.F., einem an den meisten Bauwerken relevanten Bereich.

Literatur und Quellen

- [Allmann, Kraus, 2003] Allmann, R., Kraus, K., (2003): Salze in historischem Mauerwerk. Ber. Dt. Min. Gesell., Beih. z. Eur. J. Mineral., 15, 1, S. 5–6
- [Arnold, 1981] Arnold, A., (1981): Salzminerale in Mauerwerken. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 61, S. 147–166
- [Arnold, Zehnder, 1990] Arnold, A., Zehnder, K., (1990): Salt weathering on monuments. In: Advanced workshop analytical methodologies for the investigation of damaged stones, 14–21 September 1990, Pavia, S. 31–58
- [Bläuer-Böhm, 1996] Bläuer-Böhm, C., (1996): Praktische Hinweise zur Vorgehensweise bei der Untersuchung und Beurteilung von salzbelasteten Baudenkmälern. In: Petzet M. (Hrsg.), Salzsäuren an Wandmalereien, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 78, S. 39–52
- [Bläuer-Böhm, 2005] Bläuer-Böhm, C., (2005): Quantitative Salt Analysis in Conservation of Buildings. In: Restoration of Buildings and Monuments, Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 11, 6, S. 409–418
- [Grassegger, 1992] Grassegger, G., (1992): Die Ergebnisse des Steinkonservierungsprogramms in Baden-Württemberg. Interne Studie für das Landesamt für Denkmalpflege B.-W. und das WM, Ergebnisdarstellung des Steinkonservierungsprogramms B.-W., unveröffentlichter Bericht
- [Grassegger, Schwarz, 2008] Grassegger G., Schwarz H.-J., (2009): Salze und Salzsäuren an Bauwerken. In: Schwarz, Hans-Jürgen, Steiger, Michael (Hrsg.): Salzsäuren an Kulturgütern: Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Hannover, 6–21, <http://dx.doi.org/10.5165/hawk-hhg/epublication/8>
- [Goudie, Viles, 1997] Goudie A. S., Viles H., (1997): Salt weathering hazards. John Wiley & Sons, Chichester.
- [Israelachvili, 1991] Israelachvili J. N., (1991): Intermolecular and surface forces. Academic Press, Amsterdam.
- [Nägele, 1994] Nägele, E. W. (Hrsg.), (1994): WTA-Schriftenreihe, Heft 1. Die Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen
- [Steiger, 2005] Steiger M., (2005): Crystal growth in porous materials. —I. The crystallization pressure of large crystals. J. Cryst. Growth, 282, S. 455–469
- [Steiger, 2006] Steiger M., (2006): Crystal growth in porous materials: Influence of supersaturation and crystal size. In: Heritage, weathering and conservation (ed. Fort M., Alvarez de Buergo M., Gomez-Heras M., Vazquez-Calvo C.). Taylor & Francis, London, pp. S. 245–251
- [Steiger, Asmussen, 2008] Steiger M., Asmussen S., (2008): Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: the phase diagram $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ and the generation of stress. Geochim. Cosmochim. Acta 72, S. 4291–4306

Mikrobiologische Schädigungen an Naturstein und Vorgehensweisen zu deren Beseitigung bei Natursteinkonservierungen

Karin Petersen

Die Degradation von Naturstein leitet grundsätzlich die wichtigen Prozesse der Bodenbildung ein. Hieran haben auch Mikroorganismen einen wesentlichen Anteil. Als weniger positiv werden dieselben Prozesse jedoch an Kunst- und Kulturgut wie eben Natursteinmonumenten, Skulpturen und Gebäuden verstanden. Die wichtigsten bekannten Prozesse der biologischen Zerstörung sind kurz zusammengefasst. Ausführlicher wird dagegen auf weniger geläufige Aspekte der mikrobiellen Besiedlung bis hin zum gewollten Einsatz von Mikroben zur Konsolidierung degradierten Gesteins und auf das Verhalten der Mikroben bei Steinkonservierungen eingegangen.

Schlagwörter: biologischer Angriff, Mikroorganismen, biogene Degradationsprozesse, Biofilm, Einfluss der Mikroorganismen auf Diffusionsprozesse, mineralische und organische Nährstoffe, Heißdampfreinigung, Kieselsäureester, Salzminderung, Schwermetallpigmente, Oberflächendesinfektion, Enzyme

Unstrittig sind Degradationsprozesse, die durch Bakterien, sowohl autotrophe wie heterotrophe, aber auch durch Pilze und Flechten verursacht werden. Weniger eindeutig ist der Angriff durch Algen und Cyanobakterien im Einzelfall zu beurteilen. In diesem Zusammenhang ist auch eine mögliche Schutzwirkung der Biofilme durch diese Besiedlungsanteile nicht auszuschließen, wenn sich das Objekt in einem Gebiet mit hoher Luftverunreinigung befindet und sich durch den ausgebildeten Biofilm eine Art schützende Schicht gegenüber dem Angriff, z. B. durch Luftschadstoffe oder saure Niederschläge ergibt. Auch eine gewisse Kompressenwirkung, die einen Einfluss auf Salzkristallisationszyklen hat, ist in bestimmten Situationen vorhanden, da der Biofilm eine Speicherfunktion für Feuchtigkeit besitzt. Ebenfalls sind Situationen nicht auszuschließen, in denen ein oberflächlich aufliegender Biofilm lediglich aus ästhetischen Gründen zu berücksichtigen ist, ohne dass eine tatsächliche Schadenswirkung von ihm ausgeht. In jüngster Zeit sind auch Aspekte des Naturschutzes zu beachten, die das Leben von Flora und Fauna und der mikrobiellen Besiedlung berücksichtigen und hier teilweise deren Schutz über den der historischen Objekte stellen [Drewello et al., 2011].

Weder derzeit noch in Zukunft kann es möglich oder sinnvoll sein, eine für jede Situation von Natursteinbesiedlung geeignete Handlungsempfehlung zu erarbeiten. Vielmehr sind die einzelnen Aspekte in jedem einzelnen Fall gegeneinander abzuwägen und entsprechende Entscheidungen zu treffen.

1 Schadenswirkungen von Mikroorganismen an Naturstein, Kunststein und Putzen

Schäden, die durch eine Besiedlung von Mikroorganismen hervorgerufen werden, sind sowohl durch aktive wie auch inaktive oder bereits abgestorbene Organismen zu erwarten. Grundsätzlich sind Biofilme, wenn die Besiedlung so intensiv ausgebildet ist, dass eine derartige Filmbildung aus Mikrobenzellen und den um sie herum ausgebildeten schleimigen extrazellulären Polymeren vorliegt, in der Lage, massiv Feuchtigkeit zu speichern. Dies ermöglicht den in einem Biofilm lebenden Zellen längere Zeiten aktiven Stoffwechsels. Biofilme stellen jedoch auch eine Art Barriere gegen schädigen-

de Einflüsse aus der Umwelt dar. Sie binden z. B. zellschädigende Chemikalien – einschließlich bewusst applizierter Biozide – und verhindern oder reduzieren zumindest deren Eindringen in die Zielzellen. Sie wirken allerdings auch als weiche, klebrige Matrix anreichernd auf Stäube und andere Stoffe aus der Umgebung, die für die Mikroben auf der Gesteinsoberfläche als Nahrungsquelle dienen. Diese Schleime können aber auch in den unteren, zum ungestörten Gestein hin ausgebildeten Schichten eine Diffusionshemmung bewirken, in deren Folge sich Bereiche mit reduziertem Sauerstoffgehalt ausbilden. In denen können sich Organismen anreichern, die speziell an diese Lebensbedingungen angepasst sind wie z. B. Sulfat reduzierende Bakterien. Generell ist zwischen oberflächlich ausgebildeten und in das Material eindringenden oder in Grenzflächen oberflächenparallel ausgebildeten Besiedlungsanteilen zu unterscheiden.

Die Fähigkeit der Biofilme zur Feuchtigkeitsaufnahme und -speicherung bedingt deren Quellungs- und Schrumpfungsverhalten. Dieser Vorgang überträgt Spannungen auf die Gesteinsmatrix und führt zu Auflockerungen, was in schwersten Fällen auch zum Verlust von Schalen, unter denen eine Besiedlung ausgebildet ist, oder lockeren Körnchen aus der Gesteinsoberfläche führen kann. Derartige Besiedlungen sind besonders durch Algen und Cyanobakterien, auch vergesellschaftet mit Bakterien und Pilzen, bekannt und z. B. unter Gipskrusten oder Putzplomben nachgewiesen worden. In diesen Fällen einer Besiedlung unter der exponierten Oberfläche (subsurface) muss von der Versorgung der heterotrophen, auf organische Kohlenstoffquellen angewiesenen Bakterienarten und Schimmelpilze durch die Algen oder Cyanobakterien ausgegangen werden.

Insbesondere die Schadenswirkung nitrifizierender Bakterien, die durch die Ausscheidung von Salpetersäure oder Salpetriger Säure massiv zur Zerstörung von Naturstein und Putz beitragen können, ist unstrittig. Aber auch organische, teils komplexierende Säuren, wie sie von Pilzen und heterotrophen Bakterien gebildet werden, greifen das Gestein an. Sehr deutlich wird dieser Angriff bei der Besiedlung durch Flechten, die sich teilweise mehrere Millimeter tief in das Gestein hinein entwickeln [Gehrmann et al., 1992], [Salvadori, 2000] und nach deren

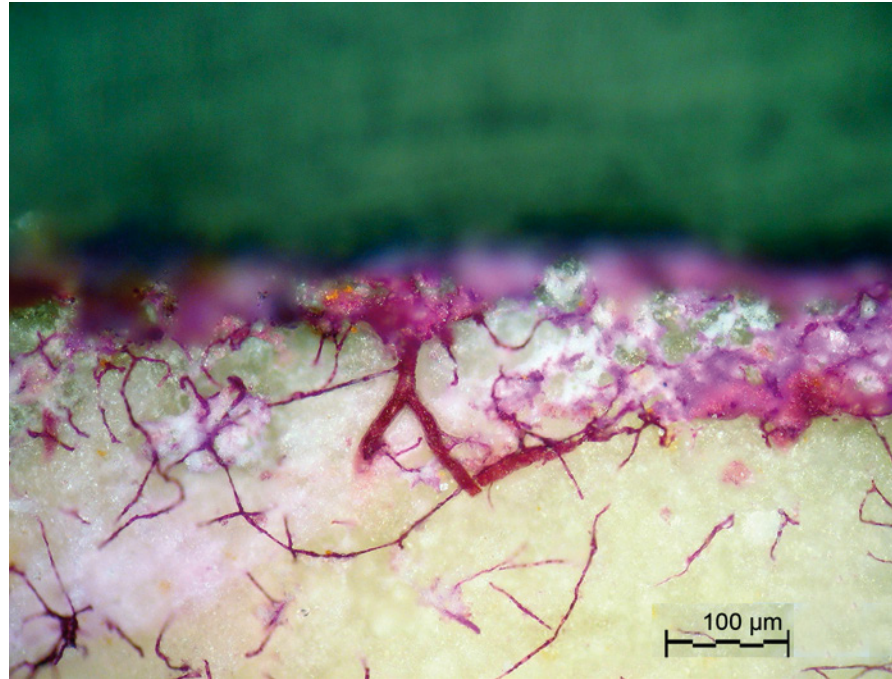
Entfernung tiefe »Pits« als Löcher in der Gesteinsmatrix zu erkennen sind. Ausbildung von Säuren kann auch zur Verfärbung von Metallanteilen des Gesteins führen.

Oxidationsprozesse sind ebenfalls bekannt. Sowohl für Pilz- als auch für einige Bakterienarten wurde die Fähigkeit zur Oxidation von Metallen nachgewiesen [Krumbein et al., 1986], [Petrushkova, Lyalikova, 1986]. So wird für den Schlaitdorfer Sandstein vom Kölner Dom eine Anreicherung Eisen und Mangan oxidierender Pilze nachgewiesen und es ist von einer Beteiligung dieser Pilze an der bis dahin auf die Luftverunreinigung zurückgeführten Krustenbildung auszugehen. Eine Vielzahl der an Natursteinmonumenten relevanten Schimmelpilze ist zur Eisen- und Manganoxidation fähig. Diese Umwandlung von Gesteinsbestandteilen ist nicht nur optisch störend, sondern führt auch wegen der Ausdehnung der Umwandlungsprodukte zu Auflockerungen der Matrix und zur Krustenbildung. Auch die Tatsache, dass insbesondere oberflächlich ausgebildete Besiedlungsanteile selbst pigmentiert sind, ist von Bedeutung. Nicht nur sind die grünen Photosynthesepigmente zwingend erforderlich, um Aktivität und Wachstum von Algen, Flechten und phototrophen Bakterien zu ermöglichen, auch viele Bakterien und Schimmelpilze sind stark pigmentiert, was nachgewiesen zu erhöhter Thermosorption und erhöhten Temperaturen derart besiedelter Gesteine führt [Dornieden et al., 2000].

Während die Oxidationsprozesse und der Säureangriff lebende, aktiv Stoffwechsel betreibende Mikroben voraussetzen, können verbleibende Biofilme sogar nach Absterben der Zellen noch ihre Schadenswirkung beibehalten. Diese Tatsache ist nach gegebenenfalls ausgeführten Behandlungen zur Desinfektion zwingend zu berücksichtigen.

1.1 Nahrungsquellen für Mikroorganismen am Standort

Eine Versorgung der Mikroorganismen mit mineralischen Nährstoffen dürfte am Standort durch die Umgebungsluft und Regenwasser immer gegeben sein. Bruchfrischer Naturstein enthält anders als langfristig exponiertes Gestein keine nennenswerten Anteile an organischen Nährstoffen. Die Exposition von Gesteinsprüfkörpern aus verschiedenen



bruchfrischen Gesteinen und deren wiederholte Untersuchung auf mikrobiellen Befall an einem belasteten Standort und einem Standort in einem Reinluftgebiet belegen eine beginnende Besiedlung bereits nach 3 Monaten [Warscheid, 1990]. Auch an Gebäuden und Skulpturen ließ sich der Einfluss der Luftverschmutzung auf die Besiedlung nachweisen. Dies gilt sowohl für die Belastung mit Kohlenwasserstoffen als auch für die Versorgung mit Mineralsalzen und besonders mit Stickstoff.

Eine Quelle für die Versorgung chemoorganotropher Mikroorganismen mit dem erforderlichen organischen Kohlenstoff liegt in der Besiedlung durch phototrophe Organismen wie Algen und Cyanobakterien, die nach ihrem Absterben verwertbares organisches Material bieten. Unter bestimmten Umständen exkretieren Algen und Cyanobakterien einen Teil des aufgebauten organischen Materials, das somit am Standort den Pilzen und Bakterien als Kohlenstoffquelle zur Verfügung steht.

Untersuchungen einer massiven Besiedlung von Kalkstein durch Algen der Gattung *Trentepohlia* weisen darauf hin. Diese Alge wurde in geringem Umfang z. B. bei einer ersten Kartierung der Sandsteingehänge am Jagdschloss Clemenswerth bei Sögel kartiert. Eine Nachuntersuchung nach 10 Jahren ergab eine Ausweitung um mehr als 90 % der besiedelten Fläche. Auch Grabsteine des Jüdi-

schen Friedhofs in Hildesheim weisen diese Besiedlung massiv auf (Bild 1). Die Ursache für deren zunehmende Ausbreitung bleibt bisher unklar. An mit *Trentepohlia* besiedelten Kalksteinen konnte ein Eindringen der Algenfäden in das Gestein hinein belegt werden. Unter dieser durch die Algen besetzten Schicht wurde eine Besiedlung durch Pilzhypen deutlich (Bild 2), für die eine Versorgung mit organischen Nährstoffen nur durch die Algenschicht zwingend angenommen werden muss [Legner, 2011].

Bild 1

Trentepohlia sp. auf Grabsteinen, Jüdischer Friedhof, Hildesheim [Foto HAWK]

Bild 2

Trentepohlia und Pilzhypen auf und in Kalkstein, PAS Anfärbung biogener Strukturen [Foto Legner, 2011]

1.2 Reinigungsmaßnahmen am Naturstein nach Befall von Mikroorganismen

Untersuchungen zu den Effekten von Reinigungsmaßnahmen zeigen im Falle von Heißdampfreinigung ohne biozide Nachbehandlung an verschiedenen Natursteinfassaden in Deutschland zunächst eine Reduzierung der mikrobiellen Besiedlung. Bereits nach 8 Wochen ließ sich aber teilweise gegenüber dem nicht behandelten Stein sogar eine massive Steigerung der Besiedlung aufzeigen [Warscheid et. al., 1988]. Versuche, eine *Trentepohlia*-Besiedlung zu entfernen, zeigten eine deutlich geringere Wasseraufnahme des Gesteins nach der Reinigung mit Heißdampf auf als auf den nicht besiedelten Vergleichsflächen, die auf die Freisetzung

von Öltröpfen zurückzuführen war, die diese Algen als Reservespeicher in ihren Zellen beinhalten. Werden die Algenzellen bei den Versuchen zur Entfernung zerstört, wird das Öl frei und beeinflusst die weiteren Behandlungen des gereinigten Steins [Legner, 2011].

Eine vollständige Entfernung der nicht rein oberflächlich aufliegenden Besiedlungsanteile ist generell nicht möglich.

Nicht abschließend zu beurteilen ist die Möglichkeit der Entfernung mikrobieller Besiedlung durch den Einsatz von Lasern. Nur in wenigen Fällen werden befriedigende Ergebnisse für Beläge durch kolkale Algen oder Cyanobakterien genannt. Keine ausreichenden Effekte sind dagegen für Trentepohlia oder Flechten erzielt worden. In Versuchen wurden regelmäßig deutliche Schädigungen des Gesteins durch den Einsatz der Lasereinigung festgestellt, ohne dass die Besiedlung vollständig entfernt werden konnte [Legner, 2011], [McStay et al., 2005].

Wenig beachtet ist bisher die Problematik des Umgangs mit gereinigten Oberflächen, die durch die vorangegangene Besiedlung durch Mikroorganismen in ihrer Oberflächenstruktur gestört sind. Hier wird eine weniger stabile und durch die Ausbildung von geschädigten Bereichen deutlich vergrößerte Oberfläche exponiert, mit der Folge, dass die den Degradationsprozessen ausgesetzte und zur Wiederbesiedlung verfügbare Oberfläche erheblich vergrößert ist. Hier erscheint es sinnvoll, geeignete Maßnahmen zur Glättung der gereinigten Flächen zu treffen.

1.3 Konsolidierung von Natursteinen unter mikrobiologischen Aspekten

An Steinen mit bekannter mikrobieller Belastung kommt insbesondere die Anwendung von Kieselsäureestern zum Einsatz. Durch das Einbringen dieser Materialien verbleiben nach der Reaktion am Objekt keine organischen Anteile. In vielen Fällen wird jedoch eine massive Ausbildung von Schimmelpilzen deutlich und dies nicht nur in geschlossenen Innenräumen. Dieser Effekt ließ sich eindeutig durch den bei der Reaktion entstehenden

Alkohol erklären [Scheer, 2007], [Reibold-Mühebach, Pohl, 2007]. In Innenräumen konnte durch den Einsatz eines entsprechenden Chemiesorbers dieser Gefahr begegnet werden [DBU Abschlussbericht Az:26289-45, 2012].

Seit langem wurden Techniken erörtert, die eine Konsolidierung der Steine durch Neubildung von Kalzit zum Inhalt hatten. Z. B. sollen Kalzit bildende Bakterien die Konsolidierung induzieren [Orlial et al., 1993], [Biobrush, 2005]. Diese Bakterien bedürfen jedoch auch am Objekt der Versorgung mit organischen Nährstoffen. Die eingebrachten Bakterien selbst sind am Ende der Anwendung vollständig von biogen gebildetem Kalzit umgeben und scheinen daher nicht mehr lebensfähig und in der ummantelten Form auch als Nahrungsquelle nicht angreifbar zu sein. Eine gezielte Abtötung nach der Anwendung ist somit nicht erforderlich. Bei dem Einsatz an Naturstein scheint die Möglichkeit der Biokalzitbildung unkritischer zu sein als bei Anwendung auf Architekturoberflächen und Wandmalereien. Hier ist stets zu überprüfen, ob die eingesetzten Mikroben mit den am Objekt vorhandenen teils giftigen Schwermetallpigmenten verträglich sind und die bakteriellen Umsetzungen nicht durch diese Schwermetalle gehemmt werden.

Beim Einsatz von Schimmelpilzen sollte die Bildung von Oxalsäure, zu der eine Vielzahl von Schimmelpilzen fähig ist, genutzt werden, um eine weitgehend verwitterungsstabile Oberfläche zu schaffen. Der Zusatz von organischen Nährstoffen als Substrat für die Schimmelpilze wäre auch hier erforderlich. Da es bei dieser Technik nicht zu einer Ummantelung der Pilzzellen kommt, wäre zumindest der Aspekt der anschließenden Abtötung und Entfernung zwingend zu berücksichtigen, um die Umsetzung zu stoppen.

Derartige Überlegungen führten dazu, dass nicht mehr der Einsatz lebender Mikroorganismen zur Konsolidierung diskutiert wird, sondern die erforderlichen Oxalationen in Form von löslichem Ammoniumoxalat über Kompressen auf die zu stabilisierende Oberfläche aufgebracht werden.

Konsolidierungen mit synthetischen organischen Materialien (Polymeren) stellen in jedem Fall eine zusätzliche Nahrungsquelle für chemoorganotrophe Mikroorganismen dar. Vielfach belegt sind in

diesem Zusammenhang die wachstumsfördernde Wirkung von Polyvinylacetat und -alkohol wie auch von Acrylaten [Heyn, 2002], [Koestler, 2000].

1.4 Hydrophobierung der Stein- oberflächen und Putze

Eine weitere Möglichkeit, die Natursteindegradation zu verringern, stellt die Anwendung von Hydrophobierungsmitteln dar.

Die Effekte mikrokristalliner Wachse zur Ausrüstung dichten magmatischen Gesteins wurden im Rahmen eines DBU Projekts an Granit untersucht. Verschiedene Handelsprodukte, die aus technischen Gründen wie gute Verarbeitbarkeit und geringe bis keine Farbveränderung ausgewählt worden waren, wurden in unterschiedlichen Applikationsformen mit und ohne Biozide auf reale Objekte sowie Gesteinsproben aufgebracht und teilweise der Bewitterung ausgesetzt. Für die beiden ausgewählten Materialien konnte eindeutig eine Substratwirkung für Schimmelpilze nachgewiesen werden. Die unterschiedliche Besiedlungsintensität und die Tatsache, dass eines der beiden Mittel bereits werkseitig Mikroben enthielt, deutet darauf hin, dass im anderen Mittel nicht deklarierte Biozide vorhanden waren, was die Ergebnisse der Untersuchungen beeinflusst haben könnte [Glienewinkel, 2004].

Auch nach der Anwendung synthetischer Hydrophobierungsmittel wurde eine verstärkte Besiedlung durch Schimmelpilze nachgewiesen [Leznicka et al., 1991]. Labortestungen an ausgewählten Hydrophobierungsmitteln unter Einbeziehung relevanter gesteinsbesiedelnder Schimmelpilze belegen auch hier die Substratwirkung der Hydrophobierungsmittel und die Verminderung ihrer Wirkung durch die Mikroorganismen [Frielinghaus, 2010].

1.5 Mikroorganismen an salz- belasteten Objekten

Die Schädigung von Naturstein durch wiederholte Kristallisationszyklen von Salzen ist unbestritten. Grundsätzlich werden daher seit langem Möglichkeiten der Salzverminderung versucht, insbesondere durch das Aufbringen von Kompressen, in die

sich die zunächst durch Feuchtigkeitszugabe an die Oberfläche zu transportierenden Salze einlagern und die dann mit den Kompressen vom Objekt entfernt werden können. In derartigen Fällen wurde häufig die Ausbildung einer intensiven Schimmelbildung beobachtet. In entsprechenden Laboruntersuchungen [DBU Abschlussbericht, Az:26289-45, 2012] wurden gängige Kompressenmaterialien und Anwendungstechniken auf deren wachstumsfördernde Wirkung auf Schimmelpilze hin untersucht. Arbeiten am Objekt (Heiliges Grab, St. Cyriakus, Gernrode) belegen die positive Auswirkung, die durch das Reinigen staubbelasteter Oberflächen vor dem Aufbringen der Kompressen erzielt werden konnte, da diese Stäube nicht nur massiv Keime enthalten, sondern auch organische Inhaltsstoffe, die als Nahrungsquelle genutzt werden können.

Auch die Oberflächendesinfektion mit UV-C Bestrahlung im Verlauf der Salzreduzierung durch Kompressen verringert die Gefahr der Schimmelbildung drastisch und sollte daher, falls die Objektsituation es zulässt, eingesetzt werden.

Eine weitere Möglichkeit des Einsatzes von Mikroorganismen zur Konsolidierung mittels in Kompressen aufgebrachter Bakterien wäre, die Nitrat- und Sulfatbelastungen (Gipskrusten) zu reduzieren. Die so genannte Nitratatmung, die letztlich zur Bildung von molekularem Stickstoff führt, der in die Atmosphäre entweichen soll, wird unter Sauerstoffabschluss durch »fakultativ anaerobe« Bakterien ausgeführt. Dieser Sauerstoffabschluss ist durch entsprechende Ausführung der Kompressen zu erzeugen. Nach Abnahme der Kompressen auf dem Objekt verbleibende Bakterien schalten jedoch sofort auf die günstigere Form der Energiegewinnung durch Atmung um. Daher ist sicherzustellen, dass die Zellen entweder kein Schadenspotential besitzen oder aber nach der Anwendung abgetötet werden. Neuere Entwicklungen erproben hier den Einsatz immobilisierter Zellen, die an eine Matrix gebunden sind und die daher mit dieser wieder rückstandsfrei entfernt werden können.

Im Gegensatz zu den Nitrat reduzierenden Bakterienarten handelt es sich bei den Sulfat reduzierenden Bakterien um obligat anaerob wachsende Mikroorganismen, die in Gegenwart von Luftsauer-

stoff ihre Lebensfähigkeit verlieren. Somit ist es beim Einsatz von Sulfatreduzierern zur Verminderung von Gipsbelastungen zwar nicht erforderlich, die Bakterien nach der Anwendung vom Objekt zu entfernen, jedoch wird die Handhabung insbesondere unter Baustellenbedingungen deutlich schwieriger. In beiden Fällen sind die Mikroben auf die Zufuhr geeigneter Nahrungsquellen angewiesen. Die Konzentrierung ist auch hier entsprechend zu erproben, um Fremdorganismen nicht zu fördern. Zudem ist bei Sulfatreduktion darauf zu achten, dass durch die damit einhergehende Sulfidbildung keine Metallsulfide entstehen.

Bei Anwendungen an pigmentierten Oberflächen ist zu prüfen, ob die eingesetzten Mikroben eine entsprechende Schwermetalltoleranz aufweisen.

1.6 Sonderfall »Effektive Mikroorganismen«

Es existieren Ansätze, Mikroorganismen zum Abbau organischer Festigungsmittel einzubringen. Die generell zum Einsatz von Mikroben an Objekten gemachten Einschränkungen gelten auch hier, insbesondere wenn nicht gezielt Spezialisten unter den Bakterien eingesetzt werden sollen, sondern eine unspezifische Mischung aus einer Vielzahl von Mikroben, die so genannten »Effektiven Mikroorganismen«. Selbstverständlich werden sich in einer derart unspezifischen Mischung jeweils auch Organismen befinden, welche die zu reduzierenden organischen Materialien enzymatisch angreifen. Allerdings sind diese Prozesse nicht mehr zu steuern. Zudem enthält die Mischung Milchsäurebakterien, die bekanntlich zur Säureproduktion führen. Auch wird es als erforderlich angesehen, die Mischung mit einem pH Wert nicht über 4,5 anzuwenden, was deren Einsatz an carbonatischen Systemen ausschließen sollte. Vernünftiger erscheint in derartigen Situationen die Nutzung spezifischer Enzyme, wie sie sehr erfolgreich für den Einsatz zur Reduzierung schädigender Kaseinüberzüge von Wandmalereien ausgearbeitet wurde, auch wenn die technische Anwendung an großen Flächen eher schlecht realisierbar erscheint [Beutel, 2000].

2 Vermeiden von Besiedlung

Wo dies möglich ist, sollte bereits der Aufbau einer Besiedlung verhindert werden. In Grotten, Krypten und ähnlichen Situationen könnte zum Beispiel der Aufbau einer Besiedlung durch phototrophe Organismen durch die Beleuchtung mit energieärmeren LEDs oder – noch besser – mit grünem Sicherheitslicht zumindest deutlich reduziert werden, da dies die Photosyntheserate nennenswert vermindert [Kunz, 2014]. Auch die Anwendung von Titandioxid kann die Besiedlung im Außenbereich einschränken [Skasa-Lindermeir, 2007]. Allerdings ist hier teilweise mit einer nicht akzeptablen Veränderung des optischen Erscheinungsbildes zu rechnen. Bei einem Eingriff in das Beleuchtungssystem ist jedoch auch die mögliche Auswirkung auf die gegebenenfalls vorhandenen Begleitorganismen, insbesondere Schimmelpilze zu überprüfen [Müller, 2010].

3 Hemmung mikrobieller Besiedlung

Da im Außenbereich bauliche Maßnahmen zur Verringerung der Besiedlungsanfälligkeit eher begrenzt getroffen werden können, ist auch die Problematik einer Hemmstoffanwendung zu diskutieren. Generell liegt hierin die Gefahr einer erheblichen Belastung der Umwelt, da die im Außenbereich aufgetragenen Biozide mehr oder weniger stark ausgewaschen werden und damit in die Umwelt gelangen, was insbesondere bei wachsender Antibiotikaresistenzen problematisch erscheint. Versuche der Kopplung von Hemmstoffen an Festigungsmittel konnten in begrenztem Rahmen erfolgen. Diese Kopplungsprodukte können als weniger umweltbelastend gelten, da die Freisetzung des Biozids nur dann erfolgen würde, wenn das Fixativ verwertet wird. Eine, wenn auch teils verringerte Hemmwirkung, konnte für die Kopplungsprodukte belegt werden. Allerdings waren die technischen Eigenschaften, soweit diese geprüft werden konnten, nicht mehr akzeptabel [DBU Abschlussbericht, Az:26289-45, 2012].

Generell ist bei dem Eingriff in ein so komplexes System zu berücksichtigen, dass zwischen den Mikroorganismen am Standort (Objekt) Wechselwirkungen bestehen. Die Abtötung einzelner Akteure kann daher zu einer ungewollten Förderung anderer Mikroben führen, was z. B. in der Folge zu einer massiven Ausbreitung dunkel pigmentierter Pilze und der damit verbundenen Schädigung des Objektes auch wegen der stärkeren Erhitzung des Steins führen kann [Warscheid, Leisen, 2012]. Derartige Anwendungen sollten daher stets mit einem Langzeitmonitoring einhergehen, was die entsprechende Zugangsmöglichkeit zu den Testflächen voraussetzt. Besonders geeignet erscheinen hier zerstörungsfreie Techniken zur Überprüfung der mikrobiellen Aktivität wie die PAM (Puls-amplifizier-te-modulations Fluorimetrie), Atmungsmessungen und Feststellung des Energiegehalts des Materials (Adenosintriphosphat). Nicht zuletzt ist auch die Kostenfrage wichtig. Hemmstoffkombinationen, die

extrem teure Inhaltsstoffe enthalten, erscheinen kaum geeignet für eine großflächige Anwendung. Das Aufbringen von Metalldrähten aus Kupfer oder Zink [Madagán et al., 2012], aus denen die Freisetzung der das Wachstum hemmenden Metallionen langsam bei Feuchtigkeit erfolgt, wird dagegen schon aus ästhetischen Gründen an vielen Objekten nicht toleriert werden und schon deshalb nur in Sonderfällen möglich sein.

Nur vereinzelt wurden Versuche unternommen, die mikrobielle Besiedlung durch den Einsatz spezifischer Viren zu hemmen. Diese Viren werden nur dann aktiv, wenn die jeweiligen Zielzellen aktiv Stoffwechsel betreiben. Sie könnten also die Vermehrung der Schadorganismen verhindern. Erste erfolgreiche Anwendungen erfolgten gegen Algen und spezifische salztolerante Bakterienarten [May et al., 2011], [DBU, Bericht Az: 26217-45, 2014].

Literatur und Quellen

- [Beutel, 2000] Beutel, S., (2000): Innovative Verfahren zur enzymatischen Abnahme von schädigenden Caseinüberzügen auf Wandmalereien. Diss. Universität Hannover
- [Biobrush, 2005] Biobrush, N., (2005): Novel approaches to conserve our European heritage. Research Monograph, Contract No. EVKA4-CT-2001–00055, Portsmouth
- DBU Abschlussbericht, Az:26289-45, 2012: Entwicklung einer Schutzeinhausung für das stark anthropogen geschädigte Heilige Grab in der Stiftskirche Gernrode
- DBU Abschlussbericht, Az: 26217-45, 2014: Entwicklung von Konservierungsmaterialien und -techniken zum Schutz von Kulturgut vor anthropogen induzierter mikrobieller Zerstörung am Beispiel der Ev.-ref. Dorfkirche zu Sonneborn
- [Dornieden et al., 2000] Dornieden, T., Gorbushina, A. A., Krumbein, W. E., (2000): Patina. In: Of Microbes and Art. S. 105–119 Eds.: Cifferi, O., Tiano, P. and Mastromei, G. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow
- [Drewello et al., 2011] Drewello, R., Snethlage, R., Töpfer, L., (2011): Zwischen Denkmalschutz und Naturschutz. DBU (Hrsg.), Osnabrück
- [Frielinghaus, 2010] Frielinghaus, L., (2010): Untersuchungen zur Möglichkeit der Reduzierung der wasserabweisenden Wirkung hydrophobierter Oberflächen durch Mikroorganismen. Masterthesis, Fak. K, HAWK Hildesheim, Holzminden, Göttingen
- [Gehrmann et al., 1992] Gehrmann, C. K., Krumbein, W. E., Petersen, K., (1992): Endolithic Lichens and the Corrosion of Carbonate Rocks – A Study of Biopitting. In: International Journal of Mycology and Lichenology, Vol. 5, S. 37–48
- [Glienewinkel, 2004] Glienewinkel, U., (2004): Ausgewählte Mikrowachsüberzüge als Hydrophobierungsmittel zum Schutz vor Witterungseinflüssen und mikrobiellem Befall für dichte magmatische Gesteine. Diplomarbeit Institut für Konservierung und Restaurierung, FH Hildesheim
- [Heyn, 2002] Heyn, C., (2002): Mikrobieller Angriff auf Synthetische Polymere – Untersuchungen im Rahmen der Denkmalpflege. Diss., Universität Oldenburg
- [Koestler, 2000] Koestler, R. J., (2000): Polymers and resins as food for microbes In: Of Microbes and Art. S. 153–167. Eds.: Cifferi, O., Tiano, P. and Mastromei,

- G. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow
- [Krumbein et al., 1986] Krumbein, W. E., Grote, G., Petersen, K., (1986): Metal Biotransfer and Biogenic Crust Formation in Building Stones. In: *Biodeterioration of Constructional Materials*, S. 15–27 Ed.: von Morton, L.H.G., The Bio-deterioration Society Occasional Publication Nr. 3
- [Kunz, 2014] Kunz, L., (2014): Zur Problematik der Vergrünung von Kulturgütern aus mineralischen Materialien. Master Thesis, HAWK Hildesheim
- [Legner, 2011] Legner, R., (2011): Zur Bedeutung der Besiedlung von Naturstein durch *Trentepohlia* sp. Master Thesis, HAWK Hildesheim, Holzminden, Göttingen
- [Leznicka et al., 1991] Leznicka, S., Kuroczkin, J., Krumbein, W. E., Strzelczyk, A. B., Petersen, K., (1991): Studies on the Growth of selected Fungal Strains on Limestones Impregnated with Silicone Resins (Steinfestiger H and Elastosil E-41), *Int. Biodeterioration* v. 28, S. 91–111
- [McStay et al., 2005] McStay, D., Wakefield, R., Murray, M., Houston, J., (2005): Laser Stone Cleaning in Scotland. Research Report, Publ. Historic Scotland, Edinburgh
- [Magadán et al., 2012] Magadán, M., Korth, G. M. A., Cedrola, M., L., Charola, A. E., Pozzobon, J. L., (2012): Case Study: Biocontrol Testing at the San Ignacio Miní Jesuit-Guaraní Mission, Misiones, Argentina. S. 91–98. In: *Biocolonization of Stone: Control and Preventive Methods. Proceedings from the MCI Workshop Series*, Eds.: Charola, A. E., McNamara, C. and Koestler, R. J., Smithsonian Institution Scholarly Press, Washington D. C.
- [May et al., 2011] May, E., Zamarreno, D., Hotschkiss, S. Mitchell, J., Inkpen, R., (2011): Bioremediation of Algal Contamination on Stone. In: *Biocolonization of Stone: Control and Preventive Methods. Proceedings from the MCI Workshop Series*. S. 59–70, Eds.: Charola, A. E., McNamara, C. and Koestler, R. J., Smithsonian Institution Scholarly Press, Washington D. C.
- [Müller, 2010] Müller, S., (2010): Untersuchung des Lichtregulator-Komplexes in *Aspergillus nidulans*. Diss. Univ. Karlsruhe
- [Oriol et al., 1993] Oriol, G., Castanier, S., le Metayer, G., Loubière, J. P., (1993): The Biomineralization: A New Process to Protect Calcereous Stone; Applied to Historic Monuments. In: *Biodeterioration of Cultural Property 2*. S. 98–116. Eds.: Toishi, K., Arai, H., Kenjo, T. and Yamano. K., Yokohama
- [Petrushkova, Lyalikova, 1986] Petrushkova J. P., Lyalikova, (1986): Microbiological degradation of lead-containing pigments in mural paintings. *Studies in Conservation*, 31, S. 65–69
- [Reibold-Mühlbach, Pohl, 2007] Reibold-Mühlbach, K., Pohl, M., (2007): Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung von kieselensäureester- und kieseloligefestigten Architekturoberflächen. Bachelor Thesis, HAWK Hildesheim
- [Salvadori, 2000] Salvadori, O., (2000): Characterisation of endolithic communities of stone monuments and natural outcrops. In: *Of Microbes and Art*, S. 89–102 Eds.: Cifferi, O., Tiano, P. and Mastromei, G. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow
- [Scheer, 2007] Scheer, M., (2007): Kieselssäureester auf Architekturoberfläche – Wechselwirkung mit mikrobieller Besiedlung. Master Thesis, HAWK Hildesheim
- [Skasa-Lindermeir, 2007] Skasa-Lindermeir, B., (2007): Untersuchung der Wirksamkeit von photokatalytischem Titandioxid als Prophylaxe gegen mikrobiellen Befall von Sandsteinen. Master Thesis, HAWK, Hildesheim
- [Warscheid, 1990] Warscheid, T., (1990): Untersuchungen zur Biodeterioration von Sandsteinen unter besonderer Berücksichtigung der chemoorganotrophen Bakterien. Dissertation, Universität Oldenburg
- [Warscheid, Leisen, 2012] Warscheid, T., Leisen, H., (2012): Microbial Studies on Stone Deterioration and Development of Conservation Measures at Angkor Wat. S. 1–28. In: *Biocolonization of Stone: Control and Preventive Methods. Proceedings from the MCI Workshop Series*, Eds.: Charola, A. E., McNamara, C. and Koestler, R. J., Smithsonian Institution Scholarly Press, Washington D. C.
- [Warscheid et al., 1988] Warscheid, T., Petersen, K., Krumbein, W. E., (1988): Effekt of Cleaning on the distribution of microorganisms on rock-surfaces. In: *Proceedings of the 7th International Biodeterioration Symposium*, Cambridge, U. K., S. 455–460, Eds. Houghton, D.R., Smith, R., N. and Eggins, O. W., Elsevier Applied Science, London and New York

Reinigung und Entsalzung von Bauwerks- oberflächen – praxisgerechte Methoden

Es wird aufgezeigt, woraus sich Patina bis Schmutzkrusten an Bauwerksoberflächen zusammensetzen und mit welchen Methoden sie abgereinigt werden können. Die Vor- und Nachteile sowie Einsatzbereiche dieser Verfahren werden benannt. Bei Entsalzungsmethoden wird schwerpunktmäßig über die Anwendung der Kompressenentsalzung und Opferputze berichtet.

Gabriele Grassegger

Schlagwörter: Fassadenreinigung, Reinigungsmethoden, technische Reinigungsverfahren, Vor- und Nachuntersuchungen, Aufbau von Schmutzkrusten, Chemie des Schmutzes, Bewertung der Verfahren, Einsatzmöglichkeiten von Reinigungen, Entsalzung, Salzminimierung von Baustoffen, Kompressen, Opferputze, Entsalzungsverfahren

Vor Sanierungen und zum Erhalt von Bauwerks-
oberflächen werden oft Reinigungen, bevorzugt im
Außenbereich, erforderlich. Die Methoden sind
hierbei je nach Reinigungsziel, Verschmutzungsart,
dem Substrat und technischen Vorgaben sehr un-
terschiedlich.

1 Zusammensetzung der Schmutzschichten

Die Schmutzschichten an Bauwerken fallen meist
durch unschöne dunkelbraune bis schwarze Fle-
cken oder Lagen auf, die auch optisch den Bau-
werkscharakter stark verändern können und als
Schmutzkruste aufgewachsen oder bis in Poren
eingedrungen sein können (Bild 1). Halsey et. al.,
[1996] konnten an Westmidlandsandstein/England
statistisch nachweisen, dass die Verschwärzung
der Gebäudeoberflächen in Städten und Indus-
triellagen doppelt so hoch ist: 40% gegenüber 20%
im ländlichen Raum. Zier, Seifert [2001] haben
umfassend für viele thüringische Städte die Ver-
schmutzungen quantitativ analysiert. Dabei wurde
eine gipsdominierte Bindung von Stäuben aus or-
ganischen und anorganischen Stoffen entspre-
chend der lokalen Immissionen, z. B. Schwermetal-

le P, Mn, Ba, V, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, As, Cr, Ni, Sn
und – wo vorhanden – U mit z. T. radioaktiven Spur-
en gefunden. Kationengehalte von »Salzen« in den
Krusten (wasserlöslich) Ca, Mg, Na, K, NH_4 , Sr,
unlösliche Anteile wie Si, Fe, Al und erneut Ca, Mg
sowie als Anionen SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , HCO_3^- und
andere wie F und Karbonsäuren konnten nachge-
wiesen werden. Die dominierenden Ionenspezies
sind fast immer Ca und SO_4^{2-} , HCO_3^- . Die ermit-
telten Staubmengen reichen im Durchschnitt von
4 bis 20 g/m² pro 30 Tage. Als besonders kritisch
müssen die relativ hohen Anteile an organischen
Umweltschadstoffen in den Stäuben aus der Grup-
pe der Kohlenwasserstoffe, Teere, Ruß, Verbren-
nungsrückstände bis PAKs angesehen werden. Die
organischen Komponenten der PAKs lagen bei
20– 350 µg/kg Staub und überschritten z. T. Um-
weltschutzgrenzwerte [Zier, Seifert, 2001]. Bei
Phasenbestimmungen durch Röntgendiffraktome-
trie (XRD) an schwarzen Verschmutzungen bis
Krusten wurden in Deutschland und bei weltweiten
Projekten dominierend in abnehmender Konzentra-
tion die Phasen Gips, Kalzit, Halbhydrat, diverse
Salze und gelegentlich »Rostphasen« neben geoge-
nen Stäuben wie Quarz, Feldspäten, Tonmineralen
gefunden und natürlich Material vom Bauwerk
selbst.

2 Beispielhafte Verschmutzungen

Schwarze Krusten auf Muschelkalk



Bild 1
Verschmutzungen durch aufgewachsene Gips-Rußkrusten
am Ulmer Münster, Pfeilerfläche



Bild 2
Graduelle, behutsame Reinigung der Fläche mit Partikelstrahlen (JOS-Technik)

Schwarze Krusten bis Verstaubungen auf Marmor



Bild 3
Verschmutzung an Marmor (Löwenskulptur): an regengeschützten Stellen schwarze Krusten, sonst schwache Staubauflagerungen (Vergrauung), roter Pfeil: Beprobungsstelle

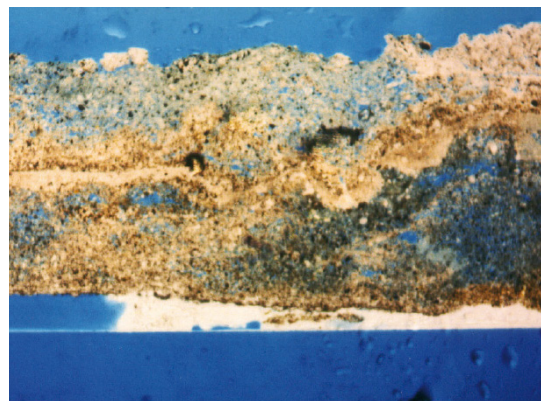
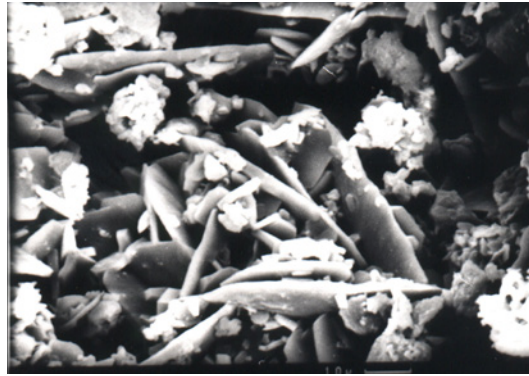


Bild 4
Schwarze, abgelöste Kruste auf Marmor, Querschliff als Dünnschliff, Krustenoberfläche oben, gipsgebunden (hier hellbeige), rhythmisch aufgebaut, schwarzer Eindruck entsteht durch zahlreiche eingelagerte Ruß-, Staub- und Flugrostpartikel (Pol.-optische Aufnahme, parall. Pols)

**Bild 5**

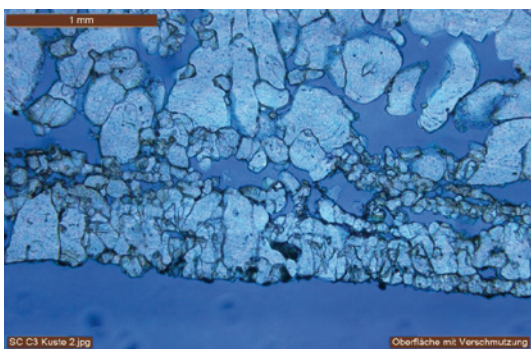
- a) Die gleiche schwarze Kruste als REM-Aufnahme, pelzartig erscheinende Gips-Rußkruste mit warziger Struktur aus Aufwüchsen (ca. 150-fache Vergrößerung)
 b) Detailaufnahme: die Warzen bestehen aus Gipskristallen in Plättchenform, auf denen Staub- und Rußpartikel flockig aufsitzen (ca. 1000-fache Vergrößerung)

Parallel durchgeführte chemische Analysen mittels RFA an Marmorproben (Bilder 3–5) zeigten, dass für die Vergrauung Stäube mit erhöhten SiO_2 -, Na_2O -, Al_2O_3 - und SO_3 -Gehalten typisch waren. Die schwarzen Krusten bestanden fast nur aus Gips, der sehr heterogene Immissionspartikel organogen mit vielen Stäuben verklebte. Gegenüber unbelasteten Marmor waren sie charakterisiert durch eine Anreicherung von Schwefel, Phosphor, Titan, Chlor, Strontium und Zink, wobei es sich um typische Immissionen handelt. Außerdem sind Metalle nachgewiesen worden, die charakteristisch für (mineralische) Stäube sind wie Silicium, Aluminium, Natrium und Kalium. Der leichtlösliche Gipsanteil betrug bis zu 10,8 M.-%.

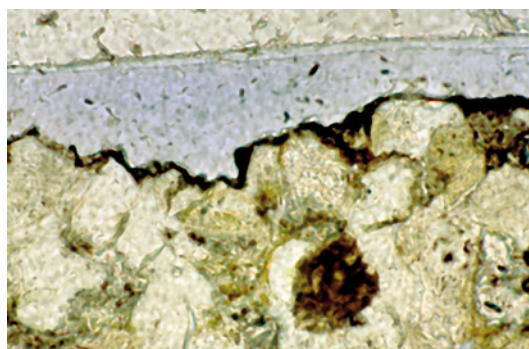
Karbonatische Schmutzkrusten auf Granit und Gipskrusten auf Sandstein

Nahezu identische Gipskrusten (Bilder 6 und 7 zeigen) wurden von Bell et. al. [1996] untersucht, die außerdem nachweisen konnten, dass ca. 50% des gesamten Kohlenstoffgehaltes der Krusten an die Fraktion des organischen Kohlenstoffes, d. h. überwiegend an Ruß der Feuerungsanlagen, gebunden sind.

Auch Snethlage, Pfanner [2013] verweisen auf erhöhte Schadstoffabsorption und die stark verzögerte Trocknungsgeschwindigkeit von Bauwerksoberflächen durch Verschmutzungen.

**Bild 6**

Karbonatische Schmutzkruste als aufgewachsene, lagige, hochporöse Sinterkruste an (im Schliff unten liegender) Bauwerks Oberfläche; dunkle Partikel durch Immissionen und »Algen« treten auch auf Innenflächen, jetzt umwachsen, auf (Pol.optik., parall. blaugefärbte Poren)

**Bild 7**

Stadtkirche Schorndorf, Schmutzkruste auf grünem Schilfsandstein (Bauwerks Oberfläche oben), die Kruste ist optisch nicht mehr auflösbar, feinkörnig, reich an Ruß und opaken Anteilen, ca. 1 mm tief in das Gestein eingedrungen (Pol.opt. Aufnahme, Vergr. ca. 32 ×, II Pol.)

3 Mögliche Reinigungstechniken im Überblick

Reinigen beseitigt kein überwiegend optisches Problem, sondern ermöglicht erst Sanierungen, Konservierungen und ist in vielfältigen Formen auch eine »Umweltschutzmaßnahme«. Es existieren verschiedene Verfahren, die spezifisch angewendet werden können. Tabelle 1 zeigt die grundlegenden Daten für unterschiedliche Anwendungsfälle. Die genannten Erfahrungen zum Einsatz und zur

Wirkungsweise von Reinigungsverfahren stützen sich in der Regel auf Praxisanwendungen. Die Verfahren wurden von Entwicklerseite über die letzten Jahre stark optimiert und sind inzwischen denkmalgerecht und sehr differenziert einzusetzen. Die Qualität hängt sehr stark vom Anwender und der exakten Definition des gewünschten Reinigungserfolges ab.

Tabelle 1

Überblick der möglichen Reinigungstechniken, Einsatz, Vor- und Nachteile

Methode	Technisches Verfahren	Einsatzzwecke	Dosage	Vor- und Nachteile
Dampfstrahlreinigung (Heißwasserhochdruckreinigung)	heißes bis überkritisches Wasser im Temperaturbereich von 80–155 °C wird aus Druckkesseln auf die Oberfläche in einem Strahlverfahren mit 30–180 bar Düsenausgangsdruck aufgebracht, Fördermenge Wasser 240–800 l/h	Oberflächenverschmutzungen außen, gut wasserlösliche Verschmutzungen auf dichten Substraten, fettige, rußige und ölige Verschmutzungen	Druck, Temperatur und Wassermenge variierbar	hoher Wassereintrag; Entsorgung des Wassers notwendig; harte Verschmutzung nicht lösbar
Dampfreinigung, drucklos	heißes Wasser ohne Druck (Neuentwicklung)	Anlösen von Schmutzkrusten und Farbstreifen (auch auf empfindlichen Materialien)	Sprüh- und Saugverfahren	Lösung von Schmutz
Nassreinigung/ Berieselung	Kaltwasser, Wasserstrahl (drucklos)	Abnahme schwacher Verschmutzungen, Lösungseffekte	häufig händisch dosierbar	hoher Wassereintrag, (Verfahren kaum mehr üblich wegen Durchnässung)
Nassstrahlreinigung¹	Wasserstrahl mit Hochdrucklanze unter Zusatz von silikatfreiem Strahlgut (z. B. Korund, grob) auf die Oberflächen gestrahlt	Entrosten, Entlacken, Entzundern, Entfernen von besonders hartnäckigen, harten Schmutz	Druck variierbar, Wassermenge variierbar, Strahlgutgröße »grob«	Industrieverfahren (Ziel starker Abtrag)
Laserreinigung²	Impulslaser verschiedener Frequenz und Pulsenergie tragen in kleinem Brennfleck je nach Energie und Impulslänge Oberflächen über Verdampfung ab	Abtrag gering dimensioniert, bei sehr harten, dichten, bevorzugt dunklen Verschmutzungen auf wertvollem Kulturgut (Skulpturen, Ornamente)	Gegenstand intensiver Forschungen; unterschiedliche Lasertypen je nach Substrat	je nach Laser verschiedene Effekte, meist Selbstbegrenzung von dunklem Schmutz auf hellen Untergründen
Partikelstrahlreinigung¹	Partikel werden trocken auf die zu reinigende Fläche aufgeblasen; Partikeltransport im Luftstrom; Variante »Feuchtstrahlen« – es werden an der Düse geringe Wassermengen zum Binden des Strahlgutes zugesetzt; Variante Druckkesselverfahren Variante Injektorverfahren ^{1,3} Regelung des Strahls erfolgt an der Strahlpistole (Strahlgut wird vor Ort direkt aus dem Gebinde angesaugt)	trockener, gezielter Abtrag der reinen Verschmutzung	zahlreiche Strahlgutarten mit diversen Geometrien, Härten und Größen und Elastizität verfügbar	dosierte Abnahme von sehr weichen bis harten Schmutzkrusten möglich aufwändiger Druckkesseltransport. Strahlmittelbehälter muss mit auf das Gerüst; flexibel; von einer Person bedienbar; fast jedes Strahlgut nutzbar
Trockeneisstrahlreinigung¹	arbeitet mit gefrorenem CO ₂ -Eis als weiches Strahlgut, Temperatur des Strahlguts –79 °C, Trockeneispellets werden auf die Oberfläche gestrahlt und verdampfen sofort. Es kann auch auf empfindlichen Flächen gearbeitet werden; kaum Oberflächenabtrag	sehr schonende Entfernung von Fetten, Ölen, organischen Beschichtungen; durch den Verdampfungsprozess des CO ₂ -Eises wird außerdem ein Mikroabspregprozess des Schmutzes erzeugt.	gekühlte Eispellets; die erforderlichen Drücke und Fördermengen werden durch eine isolierte Anlage erzeugt	kein Rückstand vom Strahlgut; Einsatz im laufenden Betrieb ohne Verstaubung; umweltschonend; heute deutlich kostengünstiger

Tabelle 1 Fortsetzung

Methode	Technisches Verfahren	Einsatzzwecke	Dosage	Vor- und Nachteile
Chemische Abbeiz- und Reinigungsverfahren (Übergang zu chemischen, reaktiven Reinigungen)	Auftrag von Säuren, Basen in wässrigen Lösungen oder Abmischungen mit Löse-mitteln oder Tensiden	meist nur Spezialeinsatz zur Abnahme von modernen Wandfarben; Versuche, hart-näckige Verschmutzungen über chemische Lösung abzunehmen (sehr kritisch)	kritisch, wenn nicht gezielt und unter che-mischer Begleitung an Wandbaustoffen eingesetzt	(wegen großem Zerstörungs-potential für mineralische Baustoffe, besonders bei ho-hen Porositäten) abzuraten
Pastenreinigung⁴	dickflüssige Pasten mit (unterschied-lichen) chemischen Wirkstoffen, z. B. EDTA (Komplexbildner), Ammonium-karbonat ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), Kalzium-Ionenta-u-scher-Harze, Kaliumkarbonat (K_2CO_3)	werden großflächig oder lokal aufgetragen und nach Trocknung abgezogen, sollen nur an Ober-flächen chemische Reaktionen bewirken ohne Eindringen; wirken auch reinigend	für Problemzonen Spezialbehandlung	Umwandlung von Gips in Karbonat möglich, beim Abziehen Lösen des Untergrundes, Verbleib von Resten, Bildung unerwünsch-ter weißer Ammoniumsalze, aufwändig, Handarbeit
Restauratorische Handtechniken	Wischschwämme, Entstaubungen, Radierer, Skalpelle, Glasradierer	sehr behutsam, aber langsam, personal- und zeitintensiv; an hochwertigem Kulturgut üblich;	beliebig fein durch-führbar	hohe Kosten durch Personal-aufwand, fast nur im skulp-turalen und ornamentalen Bereich; Nacharbeiten

1 Geräteparameter und Einsatzschwerpunkte Fa. Kärcher

2 [Klotzbach et al., 2012]

3 [Heuser, 1993]

4 [Snethlage, Pfanner, 2013]

3.1 Dampfstrahl- oder Wasser-reinigungsverfahren

Viele Verfahren nutzen große Wassermengen mit unterschiedlichem Druck oder unterschiedlicher Temperatur (Tabelle 1). Hierbei sind für den Reinigungserfolg die Parameter Wassertemperatur, -druck, -kontaktzeit mit und ohne Anquellen entscheidend. Sehr wichtig ist es, die Zusammensetzung der Schmutzkruste, die Stabilität des Substrates, die Salzbelastung und ggf. die unerwünschte Wasseraufnahme des Baustoffes und der baulichen Situation zu kennen. In der Praxis werden häufig durch Austesten, beginnend mit niedriger Temperatur und niedrigem Druck, in Musterfeldern mit langsamen Steigerungen die Parameter festgelegt. Die Verfahren spülen z. T. auch Schmutz aus tieferliegenden Poren, haben aber den Nachteil der Durchfeuchtung ggf. mit löslichen Salzen. Sie haben sich besonders bewährt bei geringporösen Substraten, anquellbaren Veralgungen, Moosen, Flechten, Verstaubungen von Öl, Ruß und Fetten. Von den professionellen Geräten, die Wasser nutzen, geht der Trend zu Heißwasserge-räten, da fettige und ölige Verschmutzungen wes-entlich leichter zu entfernen sind.

3.2 Partikelstrahlreinigungen – Anwendung

Im Bereich der behutsamen Reinigung von Ober-flächen im Bauwesen kommen trockene, exakt dosierbare Partikelstrahlverfahren (Bild 8) häufig zum Einsatz (Herstellerbezeichnungen: Partikel-strahlverfahren, Puderstrahlreinigungen, Gom-mage-Radierv Verfahren, JOS-/Rotec-Verfahren, Mikrosandstrahlverfahren in der Restaurierung,

Bild 8

Test eines Partikelstrahlverfah-rens zur Reinigungsfestlegung an einem barocken Keller in Brackenheim



Injektor-Partikelstrahlverfahren). Die Partikelverfahren erlauben:

- gezielte Abnahme dünner Schmutzschichten, Verstaubungen bis harter Krusten,
- Erhalt geschädigter Untergründe,
- sehr graduell einsetzbar, extrem flexibel; Abtragsrate steigt linear mit Druck [Scharwaechter, 2007],
- keinerlei chemische Nebeneffekte, da die Problemzone quasi »chemisch inert« in Stufen abgetragen wird [Grassegger, Eckrich, 2014].

Es ist ein erfahrener Anwender und eine Festlegung des Reinigungsgrades nötig.

Heuser [1993] verifizierte mit dem Testgerät »Injektor Partikelstrahlverfahren« die Effekte. In den letzten Jahren wurde die Verfahrenstechnik immer ausgefeilter und die Variabilität erhöhte sich stark, sowohl hinsichtlich der Strahlpistolentechnik wie auch der Vielzahl der Strahlmittel.

Scharwaechter [2007] beschreibt als Strahlparameter von Seiten der Physik die Effekte. Durch das Strahlgut findet eine Impulsübertragung statt, die so gewählt sein muss, dass das Spannungsfeld einen kritischen Wert zur Rissbildung nicht überschreitet. Es handelt sich verfahrenstechnisch um die Betriebsparameter der Strahlgeräte wie Aufprallgeschwindigkeit, Strahlabstand, Anstell- oder Düsenöffnungswinkel, Düsenausgangsdruck, Wassermenge, Strahlgutmenge, Wasserzusatz, Vorschubgeschwindigkeit der Strahleinheit, Strahlgutkorngrößen von ultrafeiner Korngröße (ca. 10–150 µm) bis ca. 0,5 mm, max. 1 mm als grobes Strahlmittel), Partikelform von kantig bis gerundet und von der Härteskala nach Mohs von 1 bis 9 (ca. 2000 Typen von Talk, Holzmehle, Kunststoffgranulate bis Korund) erhältlich.

Praxiserfahrungen für die Umsetzung als Anwendung:

- Die Korngröße sollte deutlich unter der Korngröße des Substrates liegen. Für Sandsteine haben sich Korngrößen $\leq 0,2$ mm häufig bewährt [Heuser, 1993], [Grassegger, 2004].
- Kalksteine (dichte, harte Typen) sind im Bereich von harten, schwarzen Gips-Krusten gut mit »Glaspudermehl ultrafein«, Korngröße 40–180 µm, und bei Verstaubungen mit Dolo-

mitmehl mittelgrob bis fein, reinigbar [Grassegger, 2004].

- Der Verbrauch von Strahlmittel liegt je nach Verschmutzungsgrad zwischen 50 bis 150 kg/Stunde [Kärcher, 2012].
- Übliche Flächenleistungen je nach Verschmutzungsgrad sind 5 bis 40 m²/h, was aber für jeden Einzelfall getestet werden muss.
- Die beste Reinigungswirkung tritt bei weichen Schmutzschichten auf »härteren« Substraten auf.
- Der Gesamtdruck des Partikelstrahls kann so gering dosiert werden, dass selbst stark geschädigte, verschmutzte Oberflächen und z. B. Glasuren gereinigt werden können.
- Es findet im Prinzip an der Oberfläche, dem »Schmutz«, eine Mikroablation durch geringe Aufschlagimpulse der Partikel und untergeordnet Reibeeffekte durch ein Schleifen/Reiben auf den Oberflächen statt. Mindestabstand von 5–10 cm von der Düse, dann haben die Partikel die höchste Geschwindigkeit und damit die größte abrasive Wirkung [Scharwaechter, 2007].

4 Materialuntersuchung und Überprüfungsmethoden zum Reinigungserfolg

Aufbauend auf dem WTA Merkblatt 3-9-95: Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen – wird von geschädigten Oberflächen als Substrat und von Materialuntersuchungen vorher und nachher ausgegangen. Es wurden weitere Bewertungsmaßstäbe entwickelt (Tabelle 2), die chemische, physikalische und optische Methoden umfassen. Neue Methoden bewerten den messbaren Abtrag anhand von Oberflächenprofilierungen vorher und nachher oder schlagen Tests mit Flachglasscheiben als Parallelprobe beim Strahlen vor [Grassegger, Eckrich, 2014].

Nach den in Tabelle 2 benannten Untersuchungen werden in Abstimmung mit den Zuständigen die Reinigungsziele, meist als Musterfelder, festgelegt. Feinste Ornamente und Hinterschnittflächen bedürfen aber häufig noch nachträglicher Handreinigung.

Tabelle 2

Untersuchungsmethoden zur Qualitätsüberprüfung von Reinigungen

	Zielsetzung der Methode	Technische Methode
a	Kontrolle des optischen Reinigungserfolges	Fotodokumentation vorher und nachher in den gleichen Versuchsfeldern mit Farbstandards
b	kapillare Wasseraufnahme vorher und nachher: sind die Poren geöffnet worden, wurden ggf. hydrophob wirkende Schichten entfernt?	Vorort-Messungen des Reinigungserfolges mittels Karsten'schen Prüfrohr oder andere kapillare Wasseraufnahmemessung
c	Farbverschiebung, Verschwärungsgrad, Erfolg meist Aufhellung	Farbmessungen mittels Farbspektrometer vor und nach der Reinigung
d	Porenverschluss, Dichtwirkung der Schmutzauflagen	rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Verschmutzung und des Reinigungserfolges oder wie b
e	Aufbau der Verschmutzung (mineralogisch-chemische Zusammensetzung und Erfassung der Tiefe der Verschmutzungen)	mikroskopische Untersuchung des Aufbaus der Schmutzschichten vorher und nachher, z. B. Röntgenbeugungs- und RFA-Messung (ggf. ergänzend zur REM-Untersuchung)
f	Untergrund gealtert und zersetzt	mikroskopische Untersuchung auf Alterungen und chemische Veränderung des Substrates
g	chemische Zusammensetzung, schädigende Salze in <ul style="list-style-type: none"> ■ der Schmutzkruste ■ dem Substrat meist als »bauschädliche«, leichtlösliche Ionen 	wie e, ggf. mit Resten der löslichen Salze vorher und nachher; Beurteilung, wie gefährlich sind die Schmutzschichten für den Baustoff?
h	Feuchteverhalten und Trocknung mit den Verschmutzungen; Abdichteffekt der Verschmutzung	Dampfdiffusionsmessungen an gereinigten und ungereinigten Proben; Nachweis der veränderten Feuchtwandung und -aufnahme sollte jetzt ungehinderter erfolgen; bessere Trocknung; weniger Abdichteffekt
i	Abschätzung der Härte der Schmutzschichten zur Festlegung der erforderlichen Abtragsmethode	auf Grund der Messungen e, f und g kann die Härte der Verschmutzung abgeschätzt werden
j	unerwünschter Abtrag im Testfeld (Differenzmessungen)	Rauhigkeitsmessungen; Abtragsmessungen; diverse Techniken
Technisches Ziel: Es sollte bei jeder Eigenschaft eine Verbesserung zum Vorzustand oder eine Verringerung des negativen Effekts festgestellt werden.		

5 Verschiedene Verfahren zur Entsalzung

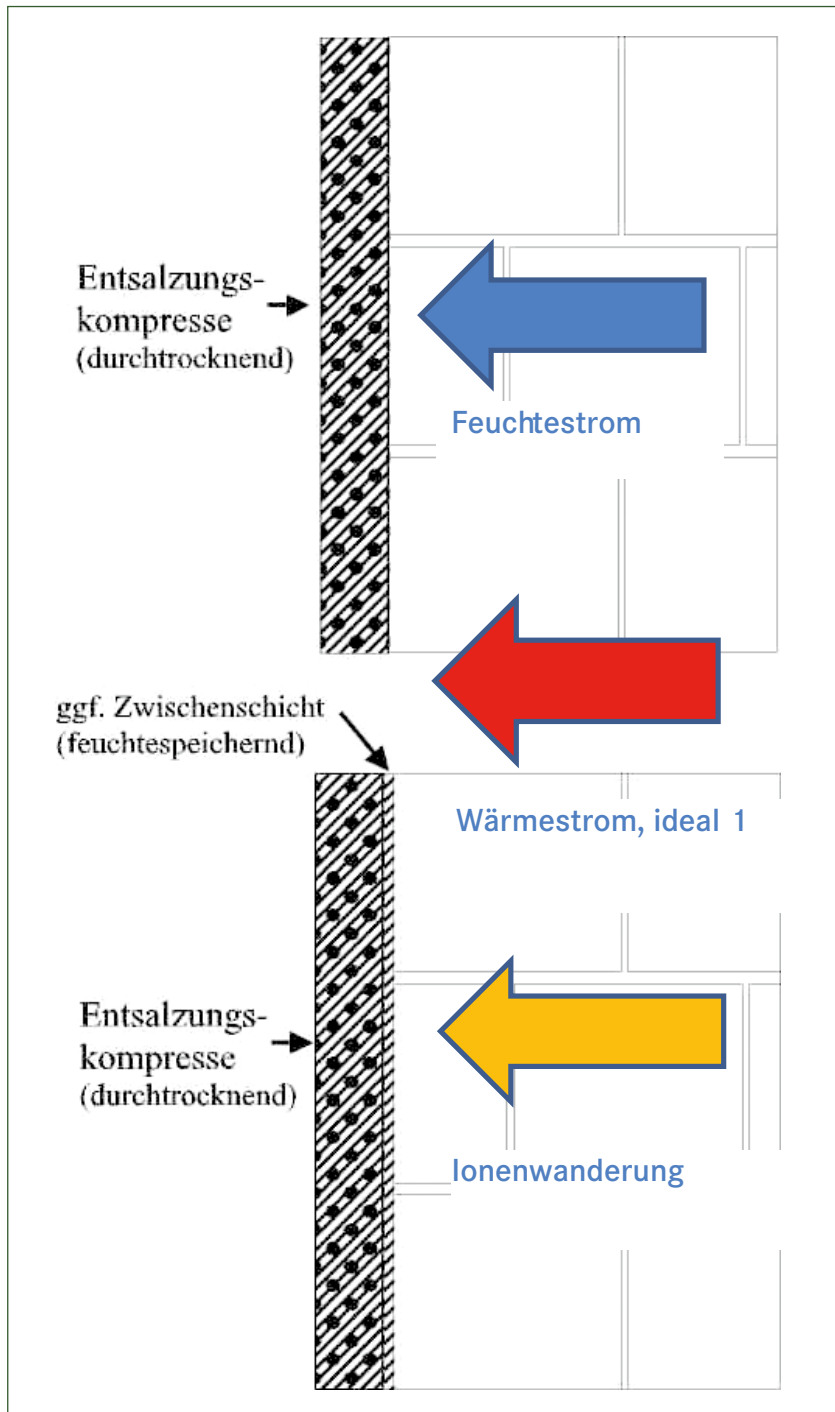
Häufig treten an Bauwerken durch eine Vielzahl von Reaktionen Versalzungen mit Ausblühungen auf (siehe Steiger, Schwarz in diesem Band). Besonders betroffen sind hier Fundamente, Keller, Sockel und Mauerwerksteile, die von aufsteigender Feuchte oder Feuchteschäden betroffen sind. Es existieren prinzipiell die Entsalzungsmethoden:

- A Einlagerung in Wasserbädern – nur für mobile Objekte
- B Entsalzung durch Kompressen: meist Zelluloseflocken mit oder ohne Tone, Sande und Zusätze; auf Bauwerken als 2–3 cm starke Entsal-

zungsschicht auftragbar; Kurzzeitbehandlung im Bereich von Tagen und Wochen

- C Entsalzung durch Opferputze: meist weiche, hoch poröse Kalk-Bindemittel mit geringen Anteilen an Zuschlägen, auf Bauwerken als aufnehmende Putzschicht (Therapieputze) auftragbar; Langzeitbehandlung im Bereich von Monaten und max. 1–2 Jahren, die Putze nehmen Salze auf bis zur Sättigung und Zersetzung

Zu Methode B: Das 2002 erschienene WTA-Merkblatt 3-13-01: Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen – legt die Zusammenhänge dar [Grassegger, 2003]. Prinzipiell wird durch Trocknung zur

**Bild 9**

Kompressenauftrag und Prozessabfolge, durchtrocknende Kompressse mit und ohne feuchtespeichernde Zwischenschicht [Graphik WTA-Merkblatt 3-13-01, ergänzt].

Kompressse hin durch kapillare, diffusive oder Sickerprozesse, d.h. Feuchteströmungen, ein Transport der gelösten Ionen in die Kompressse hinein hervorgerufen. Dies wird ggf. durch Wärme verstärkt und beschleunigt (Bild 10). Die Salze werden mit der Kompressse entfernt. Das Verfahren muss unter chemisch-analytischer Kontrolle meist mehrfach wiederholt werden.

Randbedingungen für Kompressenentsalzung:
Fall a, trocknende Kompressse (Bild 9):

1. Ausblühungen sollten vorher trocken abgenommen werden
2. Salzkonzentrationen und deren Löslichkeit sollten bekannt sein
3. Künstliche Durchfeuchtung (Besprühen) nur bis in den Bereich der vorhandenen Salze
4. Befeuchtung möglichst mit destilliertem Wasser
5. Vollständige Haftung der Kompressse auf Substrat
6. Zwischenlage als Substratschutz mit Spezialpapier
7. Trocknung nach außen in die Kompressse muss gewährleistet sein
8. Abnahme bei getrockneter Kompressse
9. Analytische Kontrolle der Salze in der Kompressse im Vergleich zum Vorzustand
10. Meist Wiederholung bis der gewünschte »Entsalzungsgrad« erreicht wird.

Fall b, dauernasse Kompressse:

Punkte 1–6 sind identisch; die Kompressse wird meist nach 3–6 Wochen abgenommen, da eine maximale Diffusion erreicht wurde.

Bewertung, Problembereiche: Es kann insgesamt mit einer Entsalzung bei jedem Zyklus von mindestens einer Halbierung, maximal auf ca. 10% der Ausgangswerte gerechnet werden [Buchwald, 2000]. Es ist nur eine Salzminderung möglich. Bestimmte extrem stark saugende Gesteine bedürfen einer abgestimmten Kompressse mit starker Saugspannung. Bei sehr schnell trocknenden Fällen kann eine feuchtespeichernde Zwischenschicht erforderlich sein, um den Prozess zu gewährleisten. Diese ist meist höher porös. Es kann durch Kapillartransportprozesse im Mauerwerk zu einem Weiterwandern der Salze in unerwünschte Bereiche oder sogar zu einem Saugen nach »hinten« kommen. Ungezielte Entsalzungen können sekundäre Ausblühungen erzeugen.

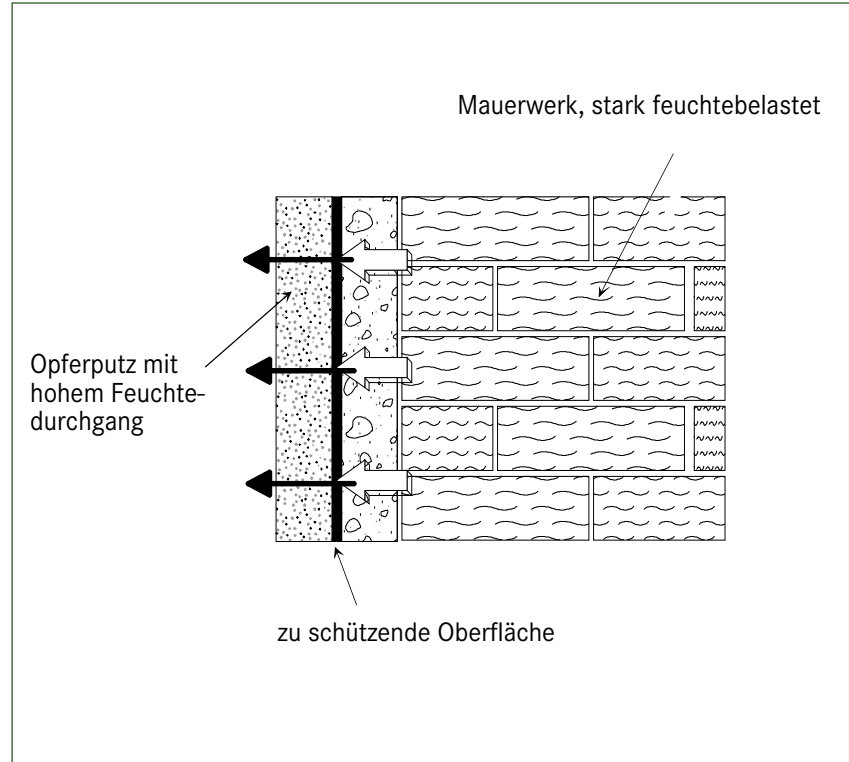
Methode C, Opferputze:

Das 2006 erschienene WTA-Merkblatt 2-10-06: Opferputze – geht von zahlreichen unterschiedlichen Feuchte- und Salzbelastungsszenarien im Innen- und Außenbereich aus, die unterschiedliche

Behandlungsziele haben. Das Spektrum reicht von reiner Entfeuchtung innen bis Salz- und Feuchte-therapie außen bei Frost. So wurden technische Anforderungen an die jeweiligen Opferputze definiert. Bild 10 zeigt das Reaktionsschema. Durch Auftrag der Opferputze wandern Salz und Feuchte langsam in den Putz, lagern sich dort ein und können so den Untergrund therapieren und ggf. auch mechanisch schützen.

Die Putzhersteller können je nach technischen Eigenschaften die Opferputztypen, z. B. OP-I-Salz (Salze – Opferputz für Innen), zur Salztherapie technisch herstellen. Der Kompressenputz ist eine besondere Form des Opferputzes. Er ist für eine hohe Salzeinlagerung konzipiert und kann auch auf stark durchfeuchteten Untergründen eingesetzt werden. Der OP-I-Feuchte-Opferputz dient zum temporären Verputzen von kurzzeitig stark mit Feuchte belasteten Untergründen. Der Putz bewirkt jedoch keine beschleunigte Austrocknung und darf in seinem Leistungsprofil kein »Sperrputz« sein.

Bewertung, Problembereiche: Es muss bei jedem Schaden abgewogen werden, ob Opferputze oder Kompressen geeigneter sind. Die Opferputze sind langdauernde Therapien, die aber gezielt »zerfallen«, um zu signalisieren, dass sie erschöpft sind oder weiter behandelt werden müssen. Sie lagern



in den Poren Salze ein und ziehen Feuchte kapillar und durch relativ hohe Diffusion aus den Wänden. Der große Vorteil ist die Nutzung des Bauwerks während der Therapie und die Entsorgung der Schadstoffe mit der Putzabnahme. Eine Verschimmelung ist kaum zu erwarten.

Bild 10
Modellfunktion eines Opferputzes Typ »OP-I Feuchte«, die Feuchte soll durch die hohen Kapillarkräfte in den Putz wandern [WTA-Merkblatt 2-10-06: Opferputze]

Literatur und Quellen

- [Bell et al., 1996] Bell, E., Dowding, P., Cooper, T. P., (1996): Black crusts formed during two different pollution regimes, S. 47–52. In: Smith, B. J., Warke, P. A. (Eds): Processes of urban stone decay, Donhead Publishing Ltd, Wimbeldon, England
- [Buchwald, 2000] Buchwald, A., (2000): Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadsalzgehalten in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen. Publ. Diss., Shaker-Verlag
- [Grassegger, 2003] Grassegger, G., (2003): Neues Merkblatt: WTA-Merkblatt 3-13-01/D »Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen«. In: Leitner, H., Laue, S. und Siedel, H. (Hrsg.): Mauersalze und Architekturoberflächen, S. 154–157, Hochschule für Bildende Künste (HfBK), Dresden, Klingenberg Buchkunst Leipzig

- [Grassegger, 2004] Grassegger, G., (2004): Technisch-naturwissenschaftliche Begleituntersuchungen zu restauratorischen Feinstrahlreinigungen an mehreren Baudenkmälern zum Nachweis der Qualität. In: Grassegger, G., Patitz, G. und Landesdenkmalamt B.-W. (Hrsg.): »Natursteinsanierung, Stuttgart 2004, 19. März, 2004, S. 7–22, Siegel Verlag, München
- [Grassegger, 2007] Grassegger, G., (2007): Untersuchung des Reinigungseffektes eines Partikelstrahlverfahrens (Rotec-Micro-Wirbelstrahldüse) an Hand von technischen, physikalischen und mineralogischen Untersuchungen an Baudenkmälern mit verschiedenen Materialien (Naturstein, Terrakotta, Glasuren). In: Storz, S., Reichle, S. (Hrsg.): Die Reinigung der Kolonnaden des Petersplatzes in Rom – Die Reinigung von Natursteinfassaden. Band I, Dresdner

- Beiträge zur Baukultur, Forum für Baukultur e. V. Dresden, Villa Salzburg. S. 59–76
- [Grassegger, Eckrich, 2014] Grassegger, G., Eckrich, W., (2014): Verschmutzungen und Schimmel an historischen Bauwerken – Aktuelle Untersuchungsmethoden, Reinigungen und Behandlungen. *Restauro*, Heft 1/2014
- [Halsey et al., 1996] Halsey, D. P., Dews, S. J., Mitchell, D. J., Harris, F. C., (1996): The black soiling of sandstone buildings in the West Midlands, England: regional variations and decay mechanisms, S. 53–65. In: Smith, B. J., Warke, P. A. (Eds): *Processes of urban stone decay*, Donhead Publishing Ltd, Wimbleton, England
- [Heuser, 1993] Heuser, H., (1993): Einfluß der Strahlparameter auf den Reinigungserfolg bei der Anwendung des Injektor-Partikelstrahlverfahrens, S. 1104–1111, In: Wittmann, Folker (Hrsg.): *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, TAE, Expert Verlag, Band. 420, Teil 2
- [Klotzbach et al., 2012] Klotzbach, U., Panzner, M., Wiedemann G., (2012): Verfahrensgrundlagen und Gerätetechnik für die Laserreinigung von Kunst- und Kulturgut. In: Patitz, G., Grassegger, G. und Wölbert, O., (2012) (Hrsg): *Natursteinsanierung* Stuttgart 2012 »Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen«, 16. März 2012 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 36–46
- [Kärcher, 2012] Kurzbericht, Alfred Kärcher GmbH & Co. KG, Thorsten Möwes/Abt. CMC-T, Alfred-Kärcher-Straße 28–40, 71364 Winnenden, Winnenden, im Mai 2005 (interner Bericht, unveröffentlicht)
- [Scharwaechter, 2007] Scharwaechter, P., (2007): Partikelstrahlverfahren und deren Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten von Natursteinoberflächen. In: Storz, S., Reichle, S. (Hrsg.): *Die Reinigung der Kolonnaden des Petersplatzes in Rom – Die Reinigung von Natursteinfassaden*. Band I, *Dresdner Beiträge zur Baukultur*, Hrsg.: Forum für Baukultur e. V. Dresden, Villa Salzburg. S. 45–55
- [Snethlage, Pfanner, 2013] Snethlage, R., Pfanner, M., (2013): *Leitfaden Steinkonservierung*, 4. Auflage, 347 S., Fraunhofer IRB Verlag
- [Zier, Seifert, 2001] Zier, H. W., Seifert, F., (2001): Umweltbedingte Veränderungen auf Materialoberflächen, Teil II: Umweltbedingte Zusammensetzung von Stäuben auf Bauwerksoberflächen in Thüringen. S. 78–171. In: Trütscher, Werner von (Hrsg): *Qualitätssicherung in der Steinkonservierung*, Neue Folge Bd.1, Thüringen Landesamt für Denkmalpflege

Natursteinaustausch – Hinweise zu Auswahl und Beschaffung von Ersatzmaterial

Es wird ein Überblick über die in Baden-Württemberg seit Jahrhunderten verwendeten heimischen oder aus der unmittelbaren Umgebung importierten Naturwerksteinarten gegeben. Hinweise erfolgen zur Herkunftsbestimmung von historischem Werksteinmaterial und zu Möglichkeiten der Materialbeschaffung für den Fall, dass auf dem Markt das benötigte Gestein nicht mehr zur Verfügung steht.

Wolfgang Werner

Schlagwörter: Naturwerkstein, Lagerstätten, Gesteinsaustausch, Gesteinsuntersuchung, Lagerstättenenerkundung, Gewinnung

1 Naturwerksteine Südwestdeutschlands

Seit rund zwei Jahrtausenden werden die Naturwerksteine Südwestdeutschlands für alle Belange des Bauens genutzt. Während römische Steinmetze auch vor sehr harten Gesteinen wie Quarzdioriten oder Graniten nicht zurückschreckten, wurden vom Mittelalter bis ins frühe 20. Jh. vor allem die verschiedenen Sandsteintypen wegen ihrer guten Bearbeitbarkeit, Haltbarkeit und weit verbreiteten Lagerstätten vielfach verwendet.

Als Folge der seit den 1920er Jahren beschleunigten Stilllegung von Werksteinbrüchen, die besonders auf den umfangreichen Einsatz der modernen künstlichen Baustoffe und die anwachsenden Steinimporte aus aller Welt zurückzuführen ist, stehen heute immerhin noch 52 Steinbrüche in 42 Abbaugebieten (Bild 1) in Baden-Württemberg in Nutzung. Viele Steinbrüche werden nur zeitweise betrieben, andere fast regelmäßig. In den Nachbarregionen vom Elsass über Rheinland-Pfalz und Bayern bis in die Schweiz stehen über 100 weitere derartige Brüche bereit, um Projekte der Baudenkmalpflege und der modernen Architektur mit hochwertigem Gesteinsmaterial zu versorgen. Der Bekanntheitsgrad der heimischen Lagerstätten ist

jedoch selbst in Kreisen des Steinhandwerks oft gering. Um diese Situation im Sinne einer nachhaltigen, hochwertigen Baudenkmalpflege zu verbessern, ist die möglichst konsequente Verwendung der heimischen Originalgesteine erforderlich, was sich nicht nur positiv auf das ansässige Steinhandwerk (Gewinnung, industrielle Verarbeitung, Steinmetz- und Bildhauerbetriebe) sondern auch auf die langfristige Versorgungssicherheit mit identischem und qualitativ hochwertigem Steinmaterial auswirken würde.

2 Natürlicher Reichtum an Werksteinen

Südwestdeutschland ist auf vergleichsweise engem Raum reich an verschiedenartigen und qualitativ hochwertigen Naturwerksteinen: hell- bis dunkelrote, violettrote, gelbliche, graugrünliche bis fast weiße Sandsteine, ockerfarbene Kalksandsteine, fossilreiche oder marmorartig texturierte Kalksteine in grauen bis beigen oder rötlichen Farbtönen, Travertine, Süßwasserkalksteine und Kalktuffe, überwiegend in hellbräunlichen bis gelblichgrauen Schattierungen, sowie graue und rötliche Granite, Gneise und Porphyre des kristallinen Grundgebirges [Werner et al., 2013 a].

Derzeit betriebene Naturwerksteinbrüche

- Granit
- Travertin, Kalktuff
- Kalkstein
- Ölschiefer
- Sandstein

Steinbrüche mit gelegentlicher Naturwerksteingewinnung

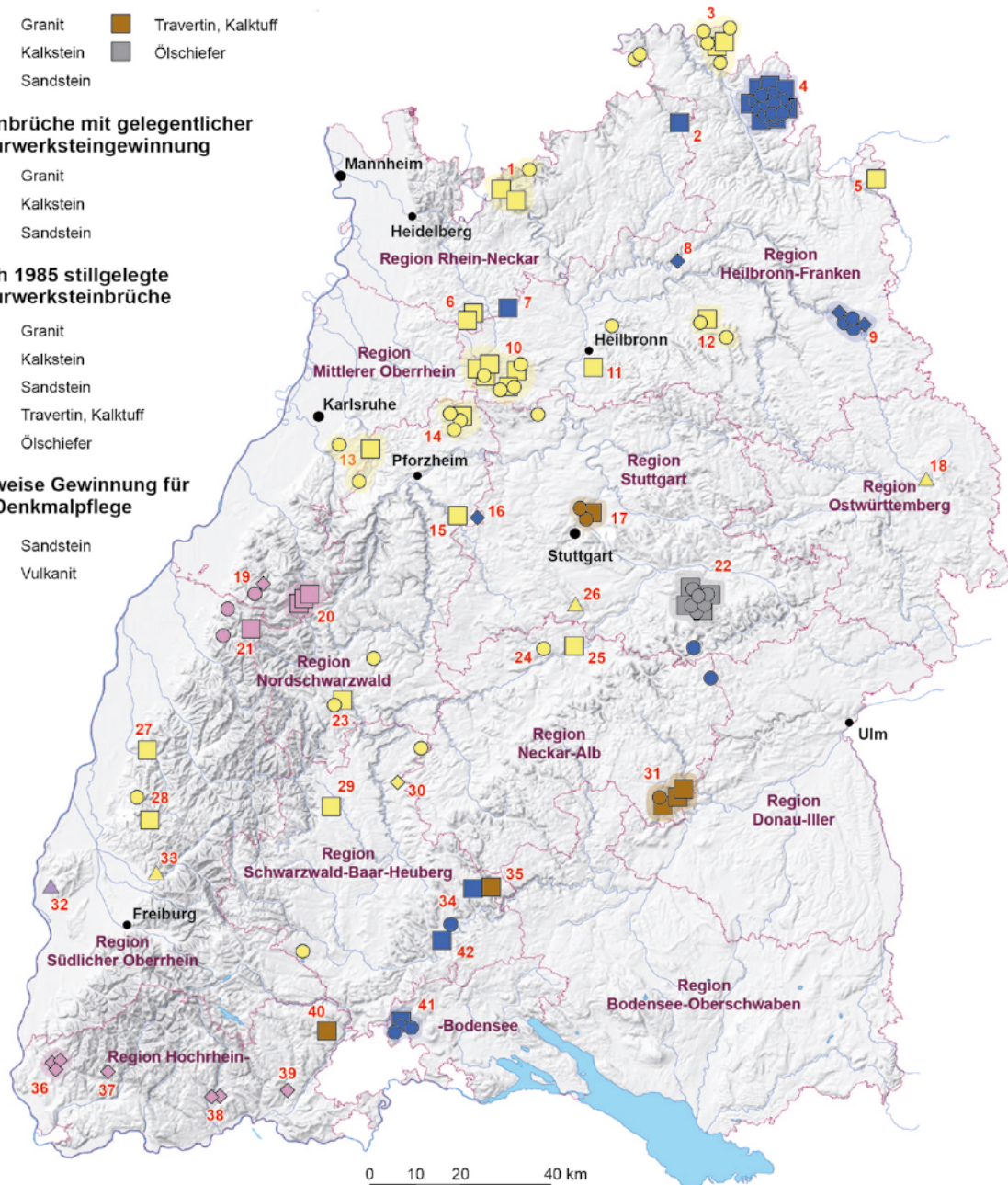
- Granit
- Kalkstein
- Sandstein

Nach 1985 stillgelegte Naturwerksteinbrüche

- Granit
- Kalkstein
- Sandstein
- Travertin, Kalktuff
- Ölschiefer

zeitweise Gewinnung für die Denkmalpflege

- Sandstein
- Vulkanit

**Steinbrüche bzw. Abbaugelände:**

- | | | |
|--|--|--|
| 1 Eberbach (Odenwald) (Buntsandstein) | 15 Tiefenbronn (Buntsandstein) | 29 Schramberg (Buntsandstein) |
| 2 Hardheim-Bretzingen (Mittlerer Muschelkalk) | 16 Heimsheim (Oberer Muschelkalk) | 30 Trichtingen (Schilfsandstein) |
| 3 Wertheim (Buntsandstein) | 17 Bad Cannstatt (Travertin) | 31 Zwiefalten (Travertin / Süßwasserkalkstein) |
| 4 Grünsfeld-Krenshelm (Oberer Muschelkalk) | 18 Lauchheim (Eisensandstein) | 32 Achkarren (Vulkanit) |
| 5 Freudenbach (Lettenkeuper) | 19 Bühlertal (Granit) | 33 Tennenbach (Buntsandstein) |
| 6 Sinsheim-Weiler (Schilfsandstein) | 20 Raumünzach (Granit) | 34 Kolbingen (Plattenkalk, Oberjura) |
| 7 Bad Rappenau-Grombach (Oberer Muschelkalk) | 21 Seebach (Granit) | 35 Bärenthal (Kalktuff) |
| 8 Schöntal-Berlichingen (Oberer Muschelkalk) | 22 Ohmden (Posidonienschiefer, Fleins) | 36 Malsburg-Marzell (Granit) |
| 9 Kirchberg + Satteldorf-Neidenfels (Oberer Muschelkalk) | 23 Freudenstadt (Buntsandstein) | 37 Tegernau (Granit) |
| 10 Eppingen-Mühlbach + Güglingen (Schilfsandstein) | 24 Tübingen-Pfrondorf (Rhätsandstein) | 38 Albbruck (Granit) |
| 11 Heilbronn (Schilfsandstein) | 25 Pliezhausen (Stubensandstein) | 39 Waldshut-Tiengen (Granitporphyr) |
| 12 Neuenstein (Lettenkeuper) | 26 Waldenbuch (Stubensandstein) | 40 Wutach-Lembach (Kalktuff) |
| 13 Remchingen-Wilferdingen (Buntsandstein) | 27 Lahr-Kuhbach (Buntsandstein) | 41 Tengen (Randengrobkalk) |
| 14 Maulbronn (Schilfsandstein) | 28 Kenzingen (Buntsandstein) | 42 Tuttlingen (Dickbankkalk, Oberjura) |

Bild 1

Naturwerksteinbrüche in Baden-Württemberg, Stand 2014 (Grafik: LGRB)

Für Baden-Württemberg und die unmittelbar angrenzenden Regionen existiert eine umfassende Darstellung nahezu aller Gesteinstypen, die häufig als Werksteine verwendet wurden und werden [Werner et al., 2013 b]. Die genannten Gesteinstypen sind für die Baudenkmalpflege besonders wichtig (Tabellen 1 bis 3).

In geringerem Umfang verwendete Gesteine sind: Angulaten-Sandstein (bestes Beispiel: Hohenzollernburg Hechingen), Arietenkalk, Böttinger Marmor, Kaiserstühler Tuffstein (Breisacher Münster), Pfaffenweiler Kalksandstein, Posidonienschiefer, Suevit (Nördlinger St. Georgskirche).

Tabelle 1

Verwendung der wichtigsten Gesteine seit römischer Zeit bis etwa Ende des 19. Jh. in Süddeutschland

Gestein	Beschreibung	Verwendung in Architektur
Buntsandstein	rote, gelbliche und z. T. auch weißliche Sandsteine, meist mit kieseliger oder kieselig-kaolinitischer Bindung, im jüngsten feinkörnigen Abschnitt tonig gebunden (Plattensandstein)	Münsterbauten in Freiburg, Basel, Straßburg sowie zahlreiche Kirchen, Burgen und Schlösser am Oberrhein und im Nordschwarzwald
Lettenkeuper-Sandstein	überwiegend tonig gebundener, gelblichbrauner, selten rötlicher Feinsandstein	Comburg, Michaelskirche und Rathaus in Schwäbisch Hall, Schloss Weikersheim, Schloss Neuenstein
Schilfsandstein	Fein- bis Mittelsandstein in gelblichbraunen, grünlichgrauen oder gelblich und rot »geflamten« Varietäten, überwiegend tonig gebunden	Burg Steinsberg b. Sinsheim-Weiler, Kloster Maulbronn, Stiftskirche Stuttgart, Kilianskirche Heilbronn, Wasserturm in Mannheim, Erzbischöfliches Archiv Freiburg
Stubensandstein	meist ein mittel- bis grobkörniger, hellgrauer bis gelblich-weißer Quarzsandstein, entweder karbonatisch (»Fleins«) oder kieselig-kaolinitisch gebunden; je nach Kornbindung sehr unterschiedliche Gesteinseigenschaften	Stiftskirche Tübingen, Schloss Hohentübingen, Marienkirche in Reutlingen, St. Vitus in Ellwangen, Hauptturm des Ulmer Münsters (19. Jh.), Teile des Kölner Doms und von Schloss Neuschwanstein
Eisensandstein	ockerbrauner Fein- und Mittelsandstein des Braunjuras, auch als Donzdorfer oder Westerhofener Sandstein bekannt; der Donzdorfer ist karbonatisch, der Lauchheimer ferritisch gebunden	Bauten aller Art in und um Lauchheim, Ulmer Münster, Schloss Hohenrechberg, Wallfahrtskirche Vierzehnheiligen und Kloster Banz
Molassesandstein	überwiegend tonig-karbonatisch gebundener, grünlichgrauer oder grauer Fein- und Mittelsandstein des Molassebeckens im Vorland der Alpen	Konstanzer Münster, Schloss und Münster in Salem, Überlinger Altstadt, Insel Reichenau
Kalktuff	hochporöses/kavernöses, in Fließgewässern der Schwäbischen Alb und der Muschelkalkgebiete entstandenes Karbonatgestein, härtet an der Luft aus	Stiftskirche St. Amandus in Bad Urach, Kloster Beuron, Stadttor in Mühlheim a. d. Donau

Tabelle 2

Gesteine und Nutzung auf Grund neuer maschineller Gewinnungs- und Bearbeitungstechniken seit der 2. Hälfte des 19. Jh.

Gestein	Beschreibung	Verwendung in Architektur
Odenwälder Granite und Granodiorite, Schwarzwälder Granite wie Bühlertal-, Raumünzach-, Oberkirch-, Seebach-, Triberg- und Malsburg-Granit	graue und z.T. rötliche, grobkörnige bis porphyrische Biotit- oder Zweiglimmergranite, sehr witterungsbeständig, gut polierfähig	große Bauwerke aus Granitblockmauerwerk entlang der im 19. und frühen 20. Jh. gebauten Eisenbahnstrecken im Schwarzwald, Brücken, Talsperren, Grabsteine bis 1940
Quaderkalk Typ Krensheim, fossilreicher Crailsheimer Muschelkalk	polierfähiger, dicht gepackter Schillkalkstein, hellgrau bis beige-grau	Hauptbahnhof Stuttgart, Olympiastadion Berlin, Museum Würth in Schwäb. Hall, Bundesgerichtshof in Karlsruhe
Weißjura-Kalkstein (Schwäbisch-Fränkische Alb)	massige bis bankige, dichte Kalksteine grauer bis beiger Färbung; für Werksteine besonders Brenztal-Oolith, Korallenkalke und massige Dolomitsteine der Ostalb, Platten- und Dickbankkalke von Tuttlingen, Thiergarten, Urach und Schopfloch sowie von Eichstätt Solnhofen Kelheim	Galluskirche in Sontheim a. d. Brenz, Kloster Neresheim; Hauptverwendungsperiode 20. Jh.; besonders typisch sind die weit verbreiteten polierten Boden- und Wandplatten aus »Juramarmor«
Süßwasserkalkstein (Jungtertiär der Schwäbischen Alb)	fossilreicher, kreibiger bis sehr gut verfestigter Kalkstein der Schwäbischen Alb, besonders aus dem Raum Zwielfalten (Gauinger, Sonderbucher oder Riedlinger »Travertin«)	Zwiefalter Münster, Olympiastadion Berlin, Neue Synagoge in München
Cannstatter Travertin (Stuttgart)	verschiedene gelbliche bis bräunliche Varietäten	Neue Staatsgalerie und Mitternachtbau Stuttgart, ehem. I.G.-Farben-Haus Frankfurt (heute Univ.)

Tabelle 3

Werksteine aus angrenzenden Regionen

Gestein	Vorkommen
Rouffacher Kalksandstein	Elsass
Elsässer Sandstein in roten, gelben bis fast weißen Varietäten	Vogesen-Sandstein, Elsass
Buntsandstein	Pfälzerwald
Udelfanger Sandstein	Lkr. Trier-Saarburg, Rheinland-Pfalz
Roter Mainsandstein	Roter Maintäler, Miltenberger Sandstein, Unterfranken
Gelber Mainsandstein	Steigerwald-»Quarzit«, Burgsandstein bzw. Stubensandstein, Steigerwald Bayern
Grüner Mainsandstein/Schilfsandstein	Unterfranken
Kirchheimer Muschelkalk	Unterfranken
Quaderkalke	Raum Würzburg-Rothenburg o. d. T.
Jura-Dickbankkalk und Solnhofener Plattenkalk	Fränkische Alb
Ries-Suevit	Nördlinger Ries
Schwarzachobler Quarzsandstein/Molassesandstein	Bregenz, Vorarlberg
Rorschacher und Bollinger Molassesandstein	Kanton St. Gallen

3 Ermittlung von Art und Herkunft geschädigter Gesteine

Macht die Schadens- und Gefährdungsanalyse am Bauwerk den Gesteins austausch erforderlich, so sind im nächsten Schritt die genaue Bestimmung der Gesteinsart und ihre erdgeschichtliche Einstufung durchzuführen. Es reicht nicht festzustellen, dass es sich z. B. um einen hellen Quarzsandstein mit kieselig-kaolinitischer Bindung handelt. Der Befund sollte auch die erdgeschichtliche Einstufung beinhalten, z. B. »Quarzsandstein aus den oberen Stubensandstein-Schichten«. Auch das Herkunftsgebiet sollte ermittelt oder zumindest eingegrenzt werden, weil die Gesteinszusammensetzung (Korngrößen, Bindemittel, Gefüge, Farbtöne usw.) je nach Lagerstättenrevier variiert.

An fast allen historischen Bauwerken sind mehrere Gesteinstypen verwendet worden. Gründe dafür können sein z. B. die Verfügbarkeit während der einzelnen Bauperioden, unterschiedlichen Einsatzbereiche der Steine und dadurch erforderliche Materialeigenschaften, Veränderungen der wirtschaftlichen, technischen oder politischen Bedingungen [Wölbert, 2013]. Beispiel für eine solche technische und wirtschaftliche Veränderung sind die neuen Eisenbahnlagen, die etwa ab Mitte des 19. Jh. Schwertransporte von großen Mengen an Steinmaterial aus dem Rhein- und Maingebiet in viele Landesteile ermöglichten.

Die Gesteinsbestimmung am Bauwerk erfordert Erfahrung und gute landeskundliche und regionalgeologische Kenntnisse. Sie muss an zahlreichen und möglichst sauberen Flächen eines Bauwerks, am besten sogar am frischen Anbruch oder an aus dem Mauerwerk gezogenen Bohrkernen erfolgen. Ein rein optischer Analogieschluss kann, insbesondere wenn er an angewitterten oder patinierten Steinoberflächen erfolgt, ebenso in die Irre führen wie die Orientierung an überlieferten umgangssprachlichen Gesteinsbezeichnungen. Hinzu kommt, dass manche Varietäten einer geologischen Gesteinseinheit solchen aus ganz anderen Formationen zum Verwechseln ähnlich sehen können.

Besonders schwierig ist hierbei die sichere Bestimmung von fein- bis mittelkörnigen Sandsteinen, die auf derselben Lagerstätte in wechselnden Farbtönen und mit verschiedenen Bindemitteln auftreten (z. B. Schilfsandstein, Lettenkeuper-Sandstein, Eisensandstein, Molassesandstein).

Wie kann der Baudenkmalpfleger oder der Steinrestaurator herausfinden, woher der Originalstein stammt und in welchem Abbaugbiet die haltbarste Varietät gewonnen wurde? Das ist angesichts der natürlichen Vielfalt an Werksteinlagerstätten in Südwestdeutschland nicht leicht. Im Gebiet des heutigen Baden-Württemberg gab es weit über 1700 Steinbrüche, die früher ganz oder teilweise zur Werksteingewinnung dienten. Und nicht wenige Steinbrüche lieferten mehrere unterschiedliche Gesteinstypen und -qualitäten.

Leider gibt es für die sichere Gesteinsbestimmung am Bauwerk kein Patentrezept. Mit Petrographie und Landesgeologie vertraute Fachleute sollten daher bei allen größeren Projekten herangezogen werden. Doch auch diese müssen, mit geeignetem Probenmaterial vom Bauwerk ausgestattet, die alten Steinbrüche in den infrage kommenden Gebieten bereisen und Gesteinsvergleiche im Feld und im Labor durchführen und prüfen. Nur durch sorgfältige Aufnahmen in den wahrscheinlichen Herkunftsgelieten, Begutachtung der dortigen Bauwerke, durch Gespräche mit ansässigen Firmen und vor allem aufgrund sorgfältiger Analysen an zahlreichen Gesteinsproben aus mehreren Steinbrüchen und Werksteinlagern lässt sich eine zuverlässige Aussage machen.

Glücklicherweise werden heute alte Steinbrüche nur noch selten aufgefüllt. Ihr Wert für die Artenvielfalt (Biotop) ist allgemein anerkannt, was auch von Vorteil für die Denkmalpflege ist, weil somit wertvolle Werksteinlager sichtbar bleiben. Historische Steinbrüche können selbst Industriedenkmale sein. Sind das Herkunftsgeliet der Gesteine und die Quelle der besten Qualitäten in diesem identifiziert, so sollten die Erkenntnisse möglichst sicher dokumentiert, am besten sogar publiziert werden. Eine solche Dokumentation fand früher nur in den seltensten Fällen statt.



Bild 2

Von der Ulmer Münsterbauhütte gefertigtes Werkstück aus ferritisch gebundenem Eisen-sandstein; Herkunft: Probeabbau bei Lauchheim.
[Foto: W. Werner, LGRB]

4 Empfehlungen für das prinzipielle Vorgehen bei der Projektierung eines Steinaustausches

Folgendes Vorgehen wird vorgeschlagen:

Bild 3

Mit der Seilsäge geschaffene frische Aufschlusswand im neuen »Münstersteinbruch« bei Tennenbach; gestreifte Varietät von Buntsandstein im Niveau des Unteren Geröllsandsteins.
[Foto: W. Werner, LGRB]

- Ermittlung von Art und Häufigkeit der Schädigung der Gesteinstypen und ihrer Lage am Bauwerk (Gesteins- und Schadenskartierung, Bilddokumentation).
- Auswertung der Schadens- und Gesteinskartierung, gezielte Probenahme, Ursachenforschung (Petrographie, Geochemie).

- Ergibt die Ursachenforschung eine *bau- oder renovierungsbedingte Schädigung* wie z. B. statische Überbeanspruchung, Rostsprengung an verbauten Eisenelementen, falsche Mörtel, Dauerdurchfeuchtung durch ungünstigen Wasserablauf, falschen Einbau usw., so sind bauliche Maßnahmen erforderlich.
- Ergibt die Ursachenforschung eine überwiegend *steinbedingte Schädigung* sind Gesteinsuntersuchung und Herkunftsbestimmung erforderlich.
- Ergibt die Gesteinsuntersuchung, dass die Schäden vor allem komponenten- und/oder bindemittelbedingt sind, ist zu prüfen, ob es in derselben Lagerstätte bessere Abschnitte mit stabilerem Bindemittel bzw. ohne störende Mineralbeimengungen gibt. Falls dies nicht zutrifft muss untersucht werden, ob es alternative Gesteine in anderen Gebieten oder geologischen Einheiten gibt, die bei gleichem Erscheinungsbild günstigere Eigenschaften aufweisen.
- Wenn die Gesteinsuntersuchung eine *rein gefügebedingte Schädigung* ergibt, ist die Herkunftsbestimmung erforderlich und es ist zu prüfen, ob es lagerfreie (d. h. z. B. ohne Tonlagen) Abschnitte auf selber oder benachbarter Lagerstätte gibt. Falls dies nicht zutrifft, muss nach alternativen Gesteinen in anderen Gebieten oder geologischen Einheiten gesucht werden, die bei gleichem Erscheinungsbild günstigere Gefügeeigenschaften aufweisen.
- Suche nach einem betriebenen Steinbruch mit den geforderten Werksteinqualitäten
- Falls kein relevanter Steinbruch mehr in Betrieb ist, muss gesucht werden, wo Restblöcke in stillgelegten Brüchen noch vorhanden sind, ob ein Lieferant von aus Abrissmaßnahmen stammendem historischem Gesteinsmaterial existiert oder ob ein historischer Steinbruch reaktiviert werden kann.

Die Wiedernutzbarmachung einer früher genutzten Lagerstätte setzt Geduld und Erfahrung voraus, war in den letzten Jahren aber stets innerhalb einiger Jahre durchführbar, einschließlich der zugehörigen Genehmigungsverfahren. Positiv bei den Planungen und Anträgen wirken sich die geringe erforderliche Größe eines Werksteinbruchs, die schonenden,

emissionsarmen Gewinnungsverfahren und besonders der Zweck der Steinentnahme, nämlich der Erhalt des denkmalgeschützten Gebäudebestandes, aus (Bilder 2 bis 4).

5 Bezugsmöglichkeiten von heimischen Naturwerkstein

In Baden-Württemberg betreiben derzeit 42 Firmen regelmäßig oder zeitweilig je nach Auftrag oder für den eigenen Bedarf die Gewinnung von Werksteinblöcken in eigenen oder in gepachteten Steinbrüchen [Werner et al., 2013 b]. Aufgrund der oft schwierigen wirtschaftlichen Situation auf dem Werksteinsektor und wegen der meist zeitlich befristeten Genehmigungen ist zu erwarten, dass mit den Jahren Veränderungen im Werksteinbereich eintreten. Informationen über die jeweils aktuellen Bezugsmöglichkeiten können ggf. über das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB, Freiburg), den Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. (ISTE, Ostfildern) oder den Landesverband des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks (Heilbronn) erhalten werden.

6 Auswahl von Rohblöcken für den Steinaustausch Qualitätssicherung

Die Auswahl der Rohblöcke im Steinbruch oder im Natursteinwerk setzt Materialkenntnisse und gutes räumliches Vorstellungsvermögen voraus. Außer Zusammensetzung, Farbe und Struktur des Gesteins ist eine Reihe von petrographischen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften zu berücksichtigen [Werner et al., 2013 b]. Die wichtigsten Parameter bei Gesteinsprüfungen für die Baudenkmalpflege sind Wasseraufnahme, Verhalten beim Frost-Tau-Wechsel, dynamischer Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit. Liegen entsprechende gesteinsphysikalische Gutachten vor, so können zu meist mittels Analogieschluss gleichwertige Gesteine im Steinbruch ausgewählt werden, ohne erneut aufwendige Analysen zu benötigen.



Die heimischen Gesteine sind grundsätzlich für die Renovierung bzw. Instandsetzung geeignet. In besonders witterungsexponierten Bereichen sind, wenn möglich, bevorzugt kieselig gebundene Sandsteine oder gut kornverzahnte, tonfreie Karbonatgesteine einzusetzen. Tonig gebundene Sandsteine wie der Plattensandstein aus dem obersten Buntsandstein (Seedorfer oder Wilferdinger Sandstein, Roter Mainsandstein), der Lettenkeuper-Sandstein und der Schilfsandstein sind auch im Außenbereich verwendbar, wenn sie keine tonigen Lagen oder Flasern und ausreichende offene Porosität aufweisen. Zu meiden sind tonig gebundene Feinsandsteine, die eine Einregelung der Tonminerale und viele verwitterte Feldspäte aufweisen.

Bild 4

Gewinnung von Stubensandstein-Rohblöcken im Probeabbau bei Waldenbuch, Auftraggeber Münsterbauhütte Ulm [Foto: W. Werner, LGRB]

Die früher übliche längere Lagerung von ausgewählten Blöcken im Steinbruch oder auf dem Werkslager mit dem Ziel, das Witterungsverhalten über mindestens einen Winter hinweg zu beobachten, sollte vom Auftraggeber eingefordert werden. Erfahrene Natursteinfirmen legen ihre verschiedenen Gesteinsorten über längere Zeit auf das nicht überdachte Lager um sicher zu gehen, dass nur beste Ware zur Weiterverarbeitung gelangt. Die natürliche Bewitterung und die allmähliche Entspannung des Gesteinsblocks führen nicht selten zur Bildung von Rissen, die unmittelbar nach dem Abbau auch bei genauer Begutachtung nicht erkennbar waren. Außerdem ist es sinnvoll, vor Anfertigung von Maßrohblöcken mindestens in einer

Ebene senkrecht zum Lager, d. h. zur Schichtung, einen Schnitt anlegen zu lassen.

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl von Rohblöcken von Sedimentgesteinen ist die Berücksichtigung des flächenhaften Parallelgefüges. Schichtungsgefüge entstehen durch Wechsel in Korngröße, Porosität, Bindemittel und durch Einlagerung von Tonmineralen. Viele Schäden an Bauwerken sind darauf zurückzuführen, dass die Orientierung der sedimentären Schichtung zu den Mauer- oder Lagerfugen nicht berücksichtigt wurde. Zahllose Beispiele belegen, dass ein Einbau »auf Spalt« die Steinschädigung begünstigt. Massige, schichtungslos erscheinende Gesteine sind den deutlich feingeschichteten vorzuziehen. Kommen aber nur feinschichtige Sandsteine aus denkmalpflegerischer Sicht in Frage, so muss bei der Blockauswahl auch auf Form und Größe der Rohblöcke geachtet werden. Die Bankstärke sollte ausreichend sein, um den Einbau des neuen Werkstücks »im Lager« (Schichtung parallel Lagerfuge) zu ermöglichen.

Empfehlungen für die Vorgehensweise

Die Auswahl des am besten geeigneten Gesteins für Austauschmaßnahmen im Rahmen der Bau-

denkmalpflege ist eine anspruchsvolle Aufgabe, zumal die korrekte Ansprache des Gesteins und vor allem seines Herkunftsgebiets nur vom erfahrenen Steinfachmann zu leisten sind. Das Kennen und Erkennen der zahlreichen Gesteinstypen am Bauwerk, der verschiedenen zugehörigen Varietäten und der in unterschiedlichen Landesteilen und Nachbarregionen Baden-Württembergs liegenden Lagerstätten gehört nicht zum Basiswissen eines Steinmetz- bzw. Restaurierungsbetriebs. Hier ist Kooperation gefordert. Geologen, besonders aus den Fachrichtungen Lagerstättengeologie und Petrographie, sollten bei der Planung der Austauschmaßnahmen in einem frühen Stadium hinzugezogen werden. Umfangreiches Wissen über die Geologie des Landes ist aber auch in Form von geologischen Karten und zugehörigen Erläuterungen, in Datenbanken des LGRB und in neueren Buchpublikationen (s. u.) über die Werksteinlagerstätten des Landes verfügbar.

Aufbauend auf diesem Fundus und den Erkenntnissen aus gemeinsamen Begehungen am Bauwerk und ggf. in Steinbrüchen kann der beauftragte Handwerksbetrieb in enger Abstimmung mit der staatlichen Baudenkmalpflege meist zügig seine Planung für den Steinaustausch entwickeln.

Literatur und Quellen

[Werner, 2013 b] Werner, W. (2013 b): Heimische Steinbrüche als Lieferanten von hochwertigem Naturwerkstein für die Baudenkmalpflege. In: Siegesmund, S. & Snelthage, R. (Hrsg.): Naturstein in der Kulturlandschaft. S. 60–69, 14 Abb., 1 Tab., Halle (Mitteldeutscher Verlag)

[Werner et al., 2013 a] Werner, W., Kimmig, B., Tschernay, P., Wittenbrink, J., Bock, H., Kleinschnitz, M. (2013 a): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2012/2013. Bedarf, Gewinnung und Sicherung von mineralischen Rohstoffen – Dritter Landesrohstoffbericht. LGRB-Informationen, 27: 204 S., 228 Abb., 7 Tab., Freiburg i. Br. (L.-Amt Geol., Rohst. Bergb. Baden-Württ., Hrsg.)

[Werner et al., 2013 b] Werner, W., Wittenbrink, J., Bock, H., Kimmig, B. (2013 b), Mitarbeit von Grüner, F., Stein, K. J., Koch, R., Hildebrandt, L. & Reiff, W.: Naturwerksteine aus Baden-Württemberg – Vorkommen, Beschaffenheit und Nutzung. 765 S., 1248 Abb., 45 Tab., Freiburg i. Br. (L.-Amt. Geol., Rohst. Bergbau, Hrsg.)

[Wölbert, 2013] Wölbert, O. (2013): Naturstein – Denkmalgestein. In: BHU Bund Heimat und Umwelt in Deutschland (Hrsg.): Werksteinabbau und Kulturlandschaft. Chancen und Konflikte für das Natur- und Kulturerbe. Dokumentation der Tagung am 22. und 23. März 2012 in Maulbronn. S. 43–50, 8 Abb., Bonn

Techniken der Steinbearbeitung und des Steinaustausches

Oberflächenbearbeitungen und Verarbeitungstechniken von Naturstein unterlagen seit der Antike einer ständigen Weiterentwicklung. Überall dort, wo früher Stein zum Einsatz kam, ist er heute ein gesuchtes Material in der Denkmalpflege. Der Umgang mit diesen historischen Denkmälern erfordert dabei grundsätzlich neben baugeschichtlichem und kunstwissenschaftlichem Wissen auch die Kenntnis ihrer materiellen Beschaffenheit und ihres handwerklichen Werdegangs. Ohne dieses Wissen um die Beschaffenheit des Baumaterials, den richtigen Einsatzmöglichkeiten der Werkzeuge und einer dem Stand der handwerklichen Technik angemessenen Ausarbeitung ist eine verantwortungsvolle Pflege und Erhaltung dieses baulichen Erbes nicht möglich.

*Eduard Schnell
Gustav Treublieb*

Schlagwörter: Schadensphänomene, historische Oberflächenbearbeitungstechniken, Steine zeitgemäß austauschen und versetzen, Oberflächenbearbeitungen, Steinrisse

Verwendete Steine petrografisch einordnen, historische Bearbeitungstechniken erkennen und die geeigneten Verarbeitungstechniken ausführen ist ein im Steinmetzhandwerk vorhandenes Grundwissen. Der Steinmetz kann entscheiden, welches Natursteinmaterial und welche Verarbeitungstechniken den Erfordernissen einer zeitgemäßen Denkmalpflege gerecht werden. Praktisch heißt das: Der Steinmetz kann helfen, das Alte in der Kenntnis seiner historischen Funktion unter der Nutzung des gestalterischen Zeichengefüges benutzt-, bewohnt- und belebbar für die Bewohner und Benutzer von heute zu machen.

Natursteine zu treffen und in die Praxis umzusetzen. Er kann erkennen, wo Auswechslungen notwendig sind, wo Steine ausgetauscht, die sogenannten Naturstein-Vierungen eingebaut werden müssen. Dabei steht am Beginn jeder Maßnahme die Analyse der Bausubstanz und der Bautechnik. Neben der Bestimmung der sichtbaren und unsichtbaren Schadensphänomene sind eine möglichst exakte Beschreibung der verwendeten Baumaterialien, der zu ihrer Bearbeitung eingesetzten Werkzeuge und eine eingehende Analyse der Bauzeit und des Baustils notwendig.

1 Die Substanz der Steine

Die Pflege und Erhaltung der Denkmale aus Naturstein ist dabei an die möglichst umfassende Erhaltung der Originalsubstanz gebunden. Das Ziel muss deshalb heißen, die Originalsubstanz einfühlbar zu konservieren, wo notwendig zu restaurieren und nur dort, wo es unbedingt erforderlich ist, zu ersetzen. Der Steinmetz bringt die Voraussetzungen mit, am historischen Bauwerk die notwendigen Entscheidungen hinsichtlich einer möglichen Konservierung oder eines notwendigen Austausches der

2 Die sichtbaren Schäden der Steine

Natursteine unterliegen vielfältigen Einflüssen. Auslöser für Schäden sind in der Regel Fehler in der Projektion, in der eigentlichen Ausführung, dem unaufhaltsamen physischer Verschleiß sowie in einer mangelhaften Unterhaltspflege. Daneben spielen die unkontrollierte Aufnahme von Wasser sowie Luftschadstoffe eine entscheidende Rolle. Wie bei allen anderen Baustoffen auch, gibt es bei Stein unterschiedliche Verwitterungs- und Schadensphänomene: Ab- und Auswaschung, Erosion

und Abtragung. Diese substanziellen Veränderungen des Steins können bis zur kompletten Auflösung der Steinsubstanz und zum Zerfall des Gesteins selbst führen. Eher selten sind plastische Verformungen. Sie treten meist nur bei dünn-schichtigen Natursteinen mit geringerer Sprödigkeit auf, die starken Klimaschwankungen oder kontinuierlichen Feuchte-Tau-Wechseln ausgesetzt sind.

Risse und Brüche der Steine

Rissbildungen und Brüche treten bevorzugt bei spröden Gesteinen auf. Verantwortlich sind hier Schwachstellen im Stein selbst oder andere Faktoren wie Hitze, Frost und/oder Frost-Tau-Wechsel. Zu Rissen oder Brüchen kann auch eine Volumenvergrößerung korrodierter Eisenanker führen. Pressrisse sind meist die Folge von Fugenverdrückungen, -verformungen sowie -abscherungen.

Zerfall und Auflösung der Steine

Der Zerfall der Steine oder ihrer Oberflächen ist durch chemische und physikalische Veränderungen gekennzeichnet, die zum Abbau der Bindemittel im Stein selbst führen. Es entstehen Phänomene wie Sanden, Mehlen und Kreiden der Steine.

Korrosion der Steine

Korrosionserscheinungen bei Steinen werden durch einen hohen Feuchtigkeitsgehalt oder eine im Stein bestehende Salzbelastungen ausgelöst. Folge sind oft Krakeleebildungen, die zu einem Absplittern der Oberfläche führen.

Verfärbung oder Ablagerung der Steine

Säuren, Laugen, Ruß, Fette oder biogener Bewuchs, aber auch konservatorische oder vormalige restauratorische Eingriffe können färbende oder ausbleichende Bestandteile im Gestein lösen und an der Oberfläche ablagern. Auch Schmutz wie z. B. Vogelkot können zu solchen Ablagerungen führen.

Krusten

Auslöser für flächige, fest anhaftende dünne Krusten oder auch poröse, fragile Krusten, die Teile der originalen Oberfläche einbinden und abheben, sind häufig bauphysikalische Mängel wie die Aufnahme von Regenwasser oder Feuchtigkeit aus dem Fundament des Bauwerks. Daneben sind Krustenbildungen bei Sandstein häufig auf falsche oder zu übertriebene Festigung oder Hydrophobierungen zurück zu führen. Die Oberflächen von weicheren, sedimentierten Natursteinen neigen bevorzugt zur Krustenbildung. Auf Kalksteinen sind meist Kalkkrusten und Gipskrusten, auf Sandsteinen vorwiegend Gipskrusten anzutreffen. Viele der sogenannten »Schwärzungen« auf Natursteinen sind Gipskrusten.

Biogener Bewuchs und Beschichtung der Steine

Biogener Bewuchs durch Mikroorganismen und Pflanzen wie Algen, Moose, Flechten und Pilze hat in erster Linie eine optische Beeinträchtigung zur Folge, kann aber auch für den Stein selbst schädigende Säuren bilden.

3 Historische Spuren der handwerklichen Bearbeitung der Steine

Die handwerkliche Bearbeitung der Steine gibt immer einen Hinweis auf die Entstehungszeit eines Werkstücks. Bearbeitungspuren an der Oberfläche der Steine geben so nicht nur Aufschluss über das verwendete Werkzeug, sondern sind auch eine entscheidende Hilfe bei der Datierung der Entstehungszeit eines Bauwerks.

Die Abspitzung der Bosse mit Zweispitz oder Spitz-eisen ist die bevorzugte Oberflächenbehandlung der Frühromanik bis ins 11. Jahrhundert. Die Hieb-rillen verlaufen noch weitgehend unorganisiert auf der sichtbaren Oberfläche. Bei diesem »Abspitz« einer Fläche parallel zum Bossen entstehen Spitzbahnen, die auf der Fläche häufig mehrere Richtungen aufweisen. Der Rand- oder Saumschlag ist schmal, nur bis zu 1,5 cm breit.

Bis zu Beginn des 13. Jahrhunderts beschränkten sich die Werkzeugformen für die Oberflächen-gestaltung auf diese absprengende Wirkung der Werkzeugspitze bei Spitzseisen, Zweispitz sowie Spitz- oder Zahnfläche. Bei einer Spitzfläche entsteht durch eine enge Aneinanderreihung einzelner Zähne eine gezahnte Schneide. Die Blütezeit der Zahnflächung als oberflächengestaltendes Werkzeug liegt im 13. Jahrhundert und wird in verfeinerter Form und Hiebführung als künstlerisches Gestaltungsmittel noch bis nach dem 14. Jahrhundert weiterverwendet.

Ende des 13. Jahrhunderts setzt sich allgemein eine deutlichere Verfeinerung der Oberflächenbehandlung mit der sogenannten Glatthfläche durch. Durch die feingliedrigeren Steinkonstruktionen des immer populärer werdenden Baustils der Gotik benötigen die Steinmetze exaktere Oberflächen auf und vor allem auch zwischen den Bauteilen. Die beidhändig geführte Glatthfläche wird in ungeordneten Schlägen über die Bosse geführt. Charakteristisch für Oberflächenbearbeitungen mit der Glatthfläche sind Hackspuren, an denen die Breite der Werkzeugschneide abzulesen ist. Hauptsächlich sind es parallel geführte Hiebrillen, die entweder den Kanten des Quaders folgen oder schräg dazu verlaufen. Sie gestalten das Relief des Quaderspiegels. Der Randschlag wird optisch wichtiger und erreicht Breiten bis zu 2,5 cm.

Die oft sehr vierteilige Konstruktion der Bauteile erforderte auch eine feinere Ausarbeitung der Fugen. Neben der Glatthfläche wird das um die Mitte des 15. Jahrhunderts aufkommende Scharriereisen – ein Flachmeißel – zum Hauptwerkzeug. Je nach der Härte des zu bearbeitenden Materials sind Schneidenbreite und Schlankheit des Scharriereisens unterschiedlich. Vierteleisen haben eine Schneide mit einer Breite von etwa 40 bis 60 mm, Halbeisen 80 bis 100 mm und Breit- oder Volleisen bis zu 240 mm. Gut sichtbar wird nun auch der Randschlag, der mit schrägen, dicht aneinandergesetzten Hieben die Außenkante des Steins bildet. Typisch an ihrer Oberfläche sind gleichmäßig, etwas 60 Grad schräg ausgerichtete, oft parallel verlaufende Hiebe, die sich gut sichtbar voneinander abheben und ein regelmäßiges Oberflächenbild ergeben.

Für die Epoche der Renaissance sind gekrönelte Oberflächen typisch. Beim beidhändig geführten Krönel sind bis zu 15 beidseitig wirkende stählerne Werkzeugspitzen eingesetzt und mit einem Eisenkeil verspannt. Mit den Werkzeugspitzen werden durch Aufschlagen auf die Steinoberfläche Unebenheiten egalisiert und es entsteht eine gepunktete Oberflächenstruktur, die entweder weiter handwerklich bearbeitet wird oder als Endbearbeitung dient. Die Fläche wird zunächst mit einem Randschlag versehen, dann abgespitzt und zuletzt mit dem Krönel schräg zur Fläche abgetrieben. Anschließend wird der Krönel noch einmal über Kreuz eingesetzt, um eine gleichmäßige Oberflächenstruktur zu erreichen. Eine besondere, sehr feine Oberflächenbearbeitung ist seit dem späten 16. Jahrhundert das Ziselieren von Oberflächen. Die Fläche wird dabei zunächst mit einem Randschlag versehen. Der überstehende Bossen wird dann fein abgespitzt und bis zur Zahnfläche geglättet. Kleine Unebenheiten werden zuletzt mit einem Scharriereisen abgetrieben.

Im 17. und 18. Jahrhundert wurde die Bearbeitung der Oberflächen sehr präzise. Die Oberflächen sollten perfekt anmuten. Deshalb wurde die Fläche meist mit sehr breiten Scharriereisen überarbeitet. Möglich wurde dies durch die Benutzung des Volleisens, ein bis zu 240 mm breites Scharriereisen. Die Scharrierbahnen zeigten keine Unregelmäßigkeiten mehr.

Im späten 19. und im 20. Jahrhundert nahmen das zunächst händische und dann das maschinelle Schleifen und Polieren der Oberfläche einen immer breiteren Raum ein.

4 Austausch der Steine

Die Standsicherheit oder der optische Gesamteindruck eines Bauwerks können einen teilweisen oder kompletten Austausch geschädigter Werksteine erfordern. Diese Vierung genannten »Ersatzsteine« sind eine traditionelle Methode, schadhafte Teile zu ergänzen oder zu erneuern. Im Idealfall wird der Austauschstein aus dem am Bauwerk eingesetzten Stein hergestellt. Sollte dieser Stein nicht mehr zur Verfügung stehen, ist ein diesem

Material in Farbe, Struktur und technischen Eigenschaften nahekommendes Ersatzmaterial zu verwenden.

Anreißen der Steine

Um ein genaues Arbeiten zu gewährleisten, müssen »Risse« von Profilen und Konturen des Originalsteins auf den neuen Werkstein übertragen werden. Als Reißwerkzeug dienen verschiedene harte Bleistifte oder Rötel (Eisenoxidfarbe), der mittels einer Gänsefeder auf den Stein aufgetragen wird. Die Farbe ist abwaschbar. Um Anrisse auf Dauer sichtbar zu machen, ist es notwendig, sie zu fixieren. Der aufgetragene Bleistiftstrich wird beispielsweise mit Schellack überstrichen und so wasserfest fixiert. Bei der Bearbeitung von Steinprofilen oder Werkstücken kommen verschiedene Risstypen zum Einsatz. Ein Mittlerriss auf der Mittelachse des Werkstückes ist die wichtigste Bezugslinie für alle weiteren Anriss- und Messpunkte. Er muss auf alle Flächen übertragen werden und bildet so ein umfassendes Raster für die Genauigkeit des Werkstücks. Der Körperriss umfasst alle Linien, die Form und Größe des Werkstücks wiedergeben und stellt somit hauptsächlich die Ansichtsfläche des Werkstückes dar. Er ist deckungsgleich mit der Auflageschablone. Der Profilriss kommt vorwiegend an den Stoßfugen zum Einsatz. Hier können auch Hilfslinien für eventuell erforderliche Hilfsflächen integriert werden. Er entspricht der Profilschablone.

Ausarbeiten der Steine

Als oft recht umfangreich stellt sich das Abarbeiten der zum Auswechseln vorgesehenen Steine auf eine Mindestdiefe von 12 bis 15 cm heraus. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Ersatzsteine aus einem Material bestehen, das in seiner optischen Erscheinung und in den physikalischen Werten dem des Originals möglichst ähnlich ist. Die Ausarbeitung im Altbestand und das neue Passstück können, um ein Herausfallen des neuen Steins zu verhindern, schwalbenschwanzförmig ausgeführt werden. Für ein rechtwinkliges, vierungsartiges Ausarbeiten dieser Stellen gibt es vor allem ästhe-

tische, weniger technische Gründe. Weder die eine noch die andere Forderung sollte jedoch hervorgehoben werden, denn gegen eine rechtwinklige Ausarbeitung könnte sogar angeführt werden, dass dabei viel mehr originale Substanz zerstört werden muss als bei einer nur unregelmäßigen Ausbildung der Fehlstellen. Auch über die oft geäußerte Ansicht, eine mit rechtwinkligen Ausbesserungsstellen übersäte Steinfassade wirke ruhiger als eine solche mit unregelmäßigen, kann durchaus unterschiedlich diskutiert werden. Die Oberflächen der Ersatzsteine müssen darüber hinaus der Behandlung der Originalsteine entsprechen. Ein scharrierter Originalstein muss auch wieder durch einen scharrierten Stein ersetzt werden, ein gespitzter durch einen gespitzten Stein, ein gebeilter durch einen gebeilten Stein, ein zahngelächter durch einen zahngelächten Stein. Gesägte Oberflächen dürfen nur dort in Erscheinung treten, wo auch die Originalsteine gesägt waren. Beim Versetzen von Natursteinauswechslungen ist darauf zu achten, dass die neuen Steine bei Quadergröße mindestens eine Dicke von 8 bis 10 cm haben, an ihrer Rückseite satt im Mörtel sitzen und sich hier keine Hohlräume und Kavernen bilden.

Wo Mauerquader so geschädigt sind, dass sie in ihrer ganzen Stärke zu ersetzen sind, müssen die Ersatzquader die Stärke der Originalsteine aufweisen und nicht nur die oben genannte Stärke von 12 bis 15 cm.

Verdübelung der Austauschsteine

Eine Verdübelung ist bei der Montage von Bauteilen, Verkleidungen oder Ergänzungen möglich. Die Dübel können zur Befestigung des Bauteils am Träger aus Mauerwerk oder Stahlgestell dienen oder Steinteile miteinander verbinden. Grundsätzlich kommen korrosionsarme oder -freie Armierungen zum Einsatz. Dazu gehören Edelstähle der Qualität V2A, V4A oder besser. Messing, Bronze und Kupfer sind nicht zu empfehlen, da sie bei hellen und empfindlichen Materialien, die der Feuchtigkeit ausgesetzt sind, zur Korrosion und Bildung von Kupfersalzen führen können. Die Dübel werden trocken ins Bohrloch eingesetzt, eingeklebt, vermörtelt oder eingeleit.

Versetzen der Austauschsteine

Die Versetztechnik richtet sich nach Art und Größe des zu versetzenden Bauteils und nach den örtlichen Gegebenheiten. Dabei ist zu bedenken, dass sich Mörtelmischungen in historischen Bauten von Ort zu Ort unterschiedlich zusammensetzen. Die Mischungsverhältnisse und die verwendeten Zuschlagstoffe waren gut gehütete Geheimnisse der Bauhütten und Werkstätten und basierten auf jahrzehnte- oder sogar jahrhundertelanger Erfahrung. Beim Auswechseln von Steinquadern muss, um alle Fugen mit Fugenmörtel zu füllen, bei Bedarf die Gießtechnik angewendet werden. Der gründlich genässte Quader wird an seine Position gebracht, eingerichtet und dann noch einmal genässt. Nun werden die Fugen bis sie gut abgedichtet sind mit Fugenmörtel geschlossen. Oder es werden Hanfseile, die der Fugenbreite angepasst sind, in die Fugen eingepresst und mit Wasser anschließend zum Quellen gebracht. Alternativ zu den Hanfseilen kann auch mit Lehm oder Ton gearbeitet werden. Anschließend füllt man die flüssige Mörtelmischung von oben oder von einer Seite in die Fuge ein. Die Luft entweicht aus den Fugen, bis diese ausgefüllt sind. Zuletzt lassen sich die Fugen noch mit dem Holzspatel verdichten und steinbündig abziehen.

Verkleben und Vermörteln der Austauschsteine

Eine Vermörtelung oder Verklebung kann mit verschiedenen Mörteln oder Klebstoffen erfolgen. Viele der bisher angewendeten Kleber von Baumharz und Schelllack über Zement bis zu Acryl-, Polyester- und Epoxidharzen bilden eine Trennschicht zwischen Werkstück und Vierung, die immer wieder zu weiteren Schäden führen kann. In den letzten Jahren wurde vom Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg und von [Busch et al., 2010] ein silikatisch gebundener und damit bei hoher Feuchtigkeit diffusionsoffener Steinkleber entwickelt. Dieser rein mineralische, wasserdampfdurchlässige Kleber kann objektspezifisch mit begleitenden petrographischen Untersuchungen auf das Objekt hin angepasst und optimiert werden. Generell ist eine Überprüfung der wesentlichen Kenndaten wie Haftzugfestigkeit und Wasseraufnahmekoeffizient zu empfehlen. Zur Verarbeitung

muss der Untergrund trocken, sauber, tragfähig sowie frei von losen Staubteilen, Öl- und Fettrückständen sein. Die zu klebenden Oberflächen müssen eben und aufgeraut sein. Dies hat durch flächige Überarbeitung mit dem Zahneisen zu erfolgen, so dass eine Fläche mit einer Oberflächenbearbeitung »frei vom Hieb« entsteht. Die zu klebende Vierung soll an den Flächen passgenau gearbeitet sein, so dass Klebefugenbreiten von maximal 3 mm entstehen. Überhängende oder absturzgefährdete Vierungen müssen nach den anerkannten Regeln der Technik rückverankert werden oder die Ausarbeitung an der vorhandenen Bausubstanz muss so ausgeführt sein, dass ein Abstürzen der unverklebten Vierung nicht möglich ist. Die Klebung soll je Vierung an mindestens drei unterschiedlichen Ebenen ausgeführt werden, wobei als Faustformel für die Gesamtklebefläche gelten soll, dass sie mindestens in etwa der Ansichtsfläche der Vierung entspricht. Die Klebeflächen an Vierung und Bauwerk sind mit Alkohol zu tränken, um ein Abwandern des flüssigen Anteils des Klebers in den umgebenden Stein zu verhindern. Die festen und flüssigen Komponenten sind im Volumenverhältnis 2:1 gleichmäßig und gründlich zu einem homogenen Gemisch zu verrühren. Der Auftrag des Klebers auf die Klebeflächen erfolgt vollflächig mit dem Spatel oder Kelle. Die Vierung wird satt eingesetzt und leicht angedrückt. Die Vierung ist bis zum Abbinden des Klebers etwa zwei bis drei Stunden zu fixieren. Oberflächlich austretende Kleberflüssigkeit muss sofort entfernt werden. Das Abfließen von Kleberflüssigkeit an Fassaden oder Bauwerksflächen ist zu vermeiden oder die Flächen entsprechend zu schützen. Nach beginnendem Eintreten der Klebewirkung werden die Klebefugen oberflächlich mit dem Spatel oder der Fugenkelle etwa 5 bis 10 mm tief ausgekratzt. Falls erforderlich, müssen Reinigungen an der Steinoberfläche ausschließlich mit Alkohol oder Aceton und auf keinen Fall mit Wasser erfolgen. Die Klebefugen sind wegen ihrer Bindemittelzusammensetzung in den ersten zwei Wochen nach dem Einbau hydrophob. In dieser Zeit kann nicht mit wässrigen oder wasserlöslichen Materialien im Bereich der Klebefugen gearbeitet werden. Die ausgekratzten Fugen werden nach den Vorgaben für Fugenausbildungen am Objekt und nach dem Erscheinungsbild des umgebenden



Steinmaterials mit geeigneten mineralischen Fugen oder Kittmörteln abgedeckt. Nach Abschluss der Reaktionszeit des Stein-Silikat-Klebers können die Vierungen am Folgetag steinmetzmäßig oberflächlich überarbeitet werden. Bei dickeren Fugen verlängert sich die Abbindezeit entsprechend.

Als Beispiel sei das Einsetzen einer Vierung am Grabmal Hepting – Vöhrenbach gezeigt (Bilder 1 bis 6, Bildnachweis Eduard Schnell, Fridingen). Als Material kam feinkörniger, Schwarzwälder Buntsandstein zum Einsatz. Schwarzwälder Sandstein ist ein mittelkörniger Quarzsandstein aus Quarz- und Feldspatkörnern. Diese besitzen einen Überzug aus rotem Eisenoxid. Dadurch erhält der Sandstein seine charakteristische karminrote bis rosa-rote Farbe. Auf bruchrauen Spaltflächen fallen feine, silbrig schimmernde Schuppen aus Muscovit-Glimmer auf. Nach der Mohsschen Härteskala (1 bis 10) besitzen die Quarz- und Feldspatkristalle zwar einen Härtegrad von 6 bis 7, das Bindemittel erreicht jedoch nur eine Härte von 3,5 bis 4. Der Stein wird in einem Steinbruch im Schwarzwald-Baar-Kreis gewonnen.

Verfugung der Austauschsteine

Für die Verfugung können Anstrichmassen auf der Basis von hydraulischen Pulverkalken oder künstlich hergestellten Bindemitteln sowie mineralischen Zuschlagstoffen verwendet werden.



Bild 1

Vorbereiten eines in Kornstruktur und Farbe passenden, möglichst gleichen Sandsteines; die Vierung soll möglichst genau in die Ausarbeitung eingepasst werden

Bild 2

Einbeizen der Bruchstelle

Bild 3

Einpassen der Vierung

Die kalkgebundenen Mörtel werden meist als Fertigmischungen geliefert und eignen sich auch für größere Antragungen. Witterungsabhängig können Ablagerungen von Kalziumcarbonaten auf der Oberfläche dieser Antragung entstehen. Diese stellen keine schädigende Ausblühung dar, sind aber optisch beeinträchtigend und müssen meist durch Lasuren oder Retuschen überarbeitet werden. Bei der Verwendung von zementhaltigen Massen, die seit der Mitte des 19. Jahrhunderts vielfach eingesetzt wurden, sind dagegen schädigende Salzausblühungen und damit verbundene Oberflächenbeeinträchtigungen unumgänglich.

Verbleiung der Austauschsteine

Vereinzelt kann aus statischen Gründen ein Verbleien von Austauschsteinen notwendig sein. Zunächst werden in die Oberseiten der Austauschsteine fugenübergreifend ausreichend große, unterstochene Aussparungen für die Metallklammern eingearbeitet. Sind die Austauschsteine versetzt und verfugt, folgt die Verbleiung. Um die Aussparung werden mit Ton Abdichtungen angebracht, um ein Abfließen des Bleis zu verhindern. Nun wird die Klammer passgenau eingelegt. Das an der gelben Anlauffarbe zu erkennende etwa 360 bis 400 Grad Celsius heiße Blei wird vorsichtig in die staubfreie und trockene Aussparung eingefüllt und anschließend mit einem Bleihammer verdichtet.



Bild 4

Zweikomponenten-Stein-silikatkleber anmischen

Bild 5

Kontaktstellen vollständig mit mineralischem Kleber – hier rot eingefärbt

Bild 6

Passgenaues Einsetzen der Vierung; dabei müssen Kontaktstellen vollständig mit Kleber gefüllt sein



Erscheinungsbild der Austauschsteine

Eine Vierung wird nach der Oberflächenbearbeitung und der Ausführung der Fugen beurteilt. Die beste handwerkliche Bearbeitung des Passstücks kann durch eine mangelhafte Montage deklassiert werden. Im Idealfall entstehen nur sogenannte Messerfugen mit Fugenbreiten von 1 bis höchstens 2–3 mm. Trotz der immer wieder erhobenen Forderung, die »Ergänzungen« sichtbar zu halten, ist es absolut notwendig, die Arbeiten so auszuführen, dass es nicht zu einem Bruch des Erscheinungsbildes kommt. Für die fachgerechte Fertigung von optisch »originalgetreu« wirkenden Steinober-

flächen werden die Werkzeuge der jeweiligen Zeit benötigt. Dabei handelt es sich meist um nach alten Vorlagen geschmiedete Einzelanfertigungen. Aus denkmalpflegerischer Sicht ist die Verwendung dieser Handwerkzeuge dem Einsatz von Maschinen und Druckluftwerkzeugen unbedingt vorzuziehen. Aus der bearbeiteten Steinfläche ist auch zu erkennen, ob sie nur von der Sägefläche weg überarbeitet wurde oder ob zumindest ein 1 bis 2 cm starkes Übermaß abgearbeitet wurde. Hier sollte im Hinblick auf den denkmalpflegerischen Anspruch das Abarbeiten dem Überarbeiten vorzuziehen sein.

Literatur und Quellen

[Busch et al., 2010] Busch, St., Ettl, H., Reiner, P., (2010): Neues zur Anwendung des Stein-Silikat-Klebers – Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften und Auszugsversuche an Gewindestäben. In: Grassegger, Patitz, Wölbert (Hrsg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2010, Stuttgart, S. 33 ff

[Frohberg, 2013] Frohberg, B. (2013): Denkmalpflege und Restaurierung. In: Richard Watzke, (Hrsg.): Der Steinmetz, Handbuch für Ausbildung und Praxis, München 2013, S. 493 ff

Chemie der Steinfestigung mit Kieselsäureestern

Reaktionen bei Erhärtung, Anwendung und Modifizierung

Als Steinfestigungsmittel zum Erhalt von Natursteinbauwerken und Kulturgut sind nahezu ausschließlich Kieselsäureester-Produkte in Deutschland und Europa im Einsatz. Es wird chemisch für Kieselsäureester (TEOS) dargestellt, welche Varianten von der Herstellungs- und Produktseite bis zur Kondensation im realen Porenraum verschiedener Gesteine auftreten können. Besonderer Wert wird auf die Chemie der Aushärtung, ihre Störungen, die optimale Auswahl von Typen und auf Praxisprobleme gelegt.

**Eberhard Wendler
Gabriele Grassegger**

Schlagwörter: Kieselsäureester, TEOS, Festigung von Naturstein, Katalyse, Vernetzung, Kondensation, chemische Modifizierung, Gele, Gelaufbau, Störung der Reaktion, Reaktion mit Mineralen, Porenraum, Resthydrophobie, Produktauswahl

Die Festigung geschädigter Gesteinssubstanz mit unterschiedlichen Bindemitteln wird, abgesehen von vereinzelten Hinweisen aus der Antike, seit mehr als hundert Jahren praktiziert. Insbesondere organische Materialien wie härtende Öle, Wachse, Leime, Polysaccharide, Lacke und, zu späteren Zeitpunkten, unterschiedlichste Verbindungsklassen an Polymeren (Polyester, Acrylate, Epoxidharze, Polyurethane) kamen dabei mit höchst variablem Erfolg zum Einsatz.

Abgesehen von vereinzelten Fehlanwendungen, die etwa eine speckig-glänzende Oberfläche oder eine Krustenbildung durch massive Überhärtung der behandelten Zone zur Folge hatten, war eine festigende Wirkung zunächst meist gegeben. Bedingt durch die physikomechanischen Eigenschaften dieser Bindemittel (insbesondere deren thermodynamische Instabilität/starke Alterung und Verfärbung, ihren sehr hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten und reduzierter Diffusionsfähigkeit für Wasserdampf) kam es in der Folge im Verlauf von Jahren/Jahrzehnten jedoch in der Regel zu starken Veränderungen wie Fixierung von Schmutzpartikeln durch Restklebrigkeit (Wachse), Nachdunklung der Oberfläche durch photochemische oder oxidative Prozesse (Öle, Polyester), Abbau der Wirksamkeit durch chemischen oder biogenen Bindemittelab-

bau oder Lockerung des Mineral-Bindemittelkontaktes durch Relativbewegungen im Gefüge (ausgelöst durch thermische/hygrische Wechselbelastungen oder Kristallisationsprozesse von Salzen).

1 Erste Kieselsäureester-Einsätze

Daneben wurden seit fast ebenso langer Zeit anorganisch-silikatische Bindemittel auf der Basis von Kaliwasserglas oder Fluaten (z. B. Magnesiumhexafluorosilikat) eingesetzt, deren festigendes Reaktionsprodukt (neben einer Salzbildung) jeweils ein wasserhaltiges Siliziumdioxidgel ist. Häufig auftretende Folgeschäden durch überhärtete Oberflächen und zum Teil massive farbliche Beeinträchtigungen führten dazu, dass beide Stoffklassen seit den 1970er Jahren keine Verwendung in der Gesteinskonsolidierung mehr finden. Durch anderen chemischen Bedarf wurde ab 1970 Tetraethylorthosilikat (TEOS, »Kieselsäureester«) gewonnen. Die Verwendung der glasklaren, niedrigviskosen und mit Wasser nicht mischbaren Flüssigkeit als Steinfestigungsmittel entwickelte sich ab ca. 1975 im großen Stil. Allerdings beschränkte sich der Einsatz im Wesentlichen auf Mitteleuropa und die

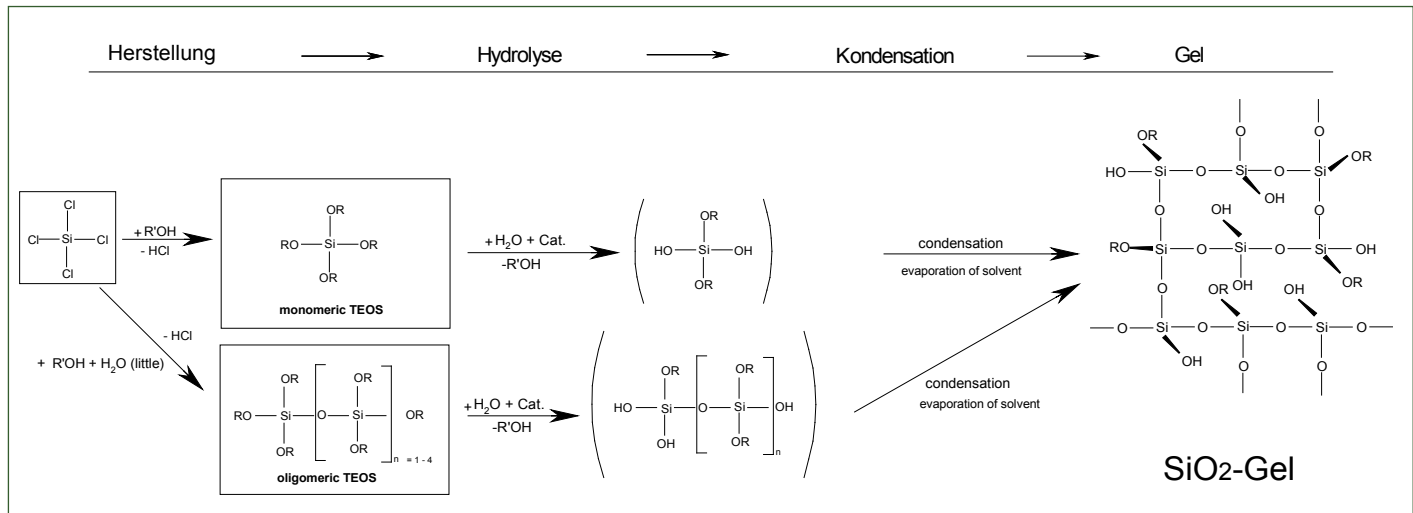
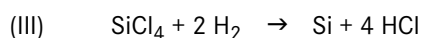
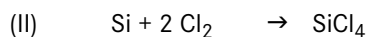
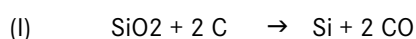


Bild 1 Herstellung von monomerem (oberer Reaktionsweg) und vorvernetztem TEOS aus Tetra-chlorsilan; daran anschließend die schematische Erhärtungsreaktion (= Gelbildung rechts im Reaktionsschema)

USA, während insbesondere in Südeuropa Acrylate mit dem Hinweis auf angebliche (in Wahrheit nicht gegebene) Reversibilität und leichtere Anwendung bis vor kurzem noch dominant vertreten waren.

2 Herstellung und Erhärtung von Kieselsäureestern

Die mehrstufige Herstellung von Kieselsäureester umfasst die Schritte: Reinstsilizium wird aus Quarzsand gewonnen, der zunächst mit Kohle zum Rohsilizium reduziert (I) wird. Dieses wird dann mit Chlorgas zu Siliziumtetrachlorid umgesetzt (II):



Dieses wird durch Destillation gereinigt und kann anschließend durch Reaktion mit Wasserstoff unter Abspaltung von Chlorwasserstoff zu Reinstsilizium reduziert werden (III) oder mit Ethylalkohol umgesetzt werden, zum Reaktionsprodukt TEOS (Bild 1). Setzt man bereits dem Ethylalkohol geringe Mengen an Wasser zu, so entsteht dabei ein vorkondensiertes KSE-Produkt mit höherer Molekülgröße (unterer Reaktionsweg). Durch schrittweise Hydrolyse werden Silanolgruppen (Si-OH) durch Abspaltung der organischen Seitengruppen ($-\text{OR}$) gebildet, die dann sukzessive unter Wasserabspaltung miteinander vernetzen (Kondensation). Endprodukt ist

ein räumlich vernetztes SiO_2 -Gel, welche als Reste noch unvernetzte Silanolgruppen und (noch nicht hydrolysierte) Alkoxygruppen (Si-OR) enthalten.

Im Inneren der dreidimensional vernetzten Clusterstruktur befinden sich ferner Reaktionsprodukte wie Wasser und Ethanol, was auch durch DTA/TG-Messungen nachgewiesen werden konnte [Grassegger, 1992]. Diese werden erst im Verlaufe von Jahren abgegeben und bewirken durch den Volumenverlust ein weiteres Schrumpfen des Gels [Sattler, 1992]. Das primäre Schrumpfen findet innerhalb weniger Wochen bei der Erhärtung durch die Kondensation und Abspaltung von z. B. 100 Vol.-% des flüssigen Produktes auf 30–50 Vol.-% Gel (je nach Vorkondensation) statt. Dabei kann es auch zu zahlreichen Störungen kommen.

2.1 Erhärtungsreaktion und KSE-Produkte im Handel

Steinfestiger auf Kieselsäureesterbasis werden als klare Flüssigkeiten, unverdünnt oder in LösemitteIn auf bestimmte Wirkstoffkonzentrationen eingestellt, appliziert, dann durch Kapillarkräfte vom porösen Substrat aufgenommen und weiterverteilt. Alle marktgängigen Produkte enthalten sowohl monomere wie vorkondensierte molekulare Komponenten, sodass im BlockscheMa in Bild 1 stets beide Reaktionswege (oben und unten) beschriftet werden.

Zu Beginn der Erhärtungsreaktion (Hydrolyse) muss erst ein Teil der an den Siliziumatomen ge-

Tabelle 1

Überblick der Kieselsäureester im Handel, deren Zusammensetzung und Eigenschaften

Festiger	TEOS-Komponente Lösemittel	Gelabscheiderate Gew.-%	Zusätze	besonderer Einsatzzweck
KSE 100	überwiegend vorkondensiert Benzinfraktion (Kohlenwasserstoffgemisch)	8–12	(Katalysator)	zur Erzielung hoher Wirkungstiefe bei mäßiger Entfestigung
KSE OH	überwiegend vorkondensiert Methylethylketon (Keton)	26–30	(Katalysator)	bewährtes Standardprodukt
KSE 510	überwiegend vorkondensiert lösemittelfrei	45–55	(Katalysator)	für entfestigte grobe Sandsteine
KSE 300	überwiegend monomer lösemittelfrei	27–33	(Katalysator)	zur Erzielung hoher Wirkungstiefe bei deutlicher Entfestigung
KSE 300 HV	überwiegend monomer lösemittelfrei	27–33	Haftvermittler für Carbonate, Typ Aminoalkylsilan	besonders für entfestigte, saugfähige Kalksteine
KSE 300 E elastifiziert	überwiegend monomer lösemittelfrei	27–33	Weichsegmenten vom Typ Polyether	für stark entfestigte, mittelkörnige Gesteine
KSE 500 E elastifiziert	überwiegend vorkondensiert lösemittelfrei	45–55	Weichsegmenten vom Typ Polyether	für stark saugende, stark entfestigte grobe Sandsteine

bundenen Ethoxygruppen ($-O-C_2H_5$) mit (im Porenraum verfügbarem) Wasser in Silanolgruppen umgewandelt werden ($Si-O-H$), dabei wird Alkohol abgespalten.

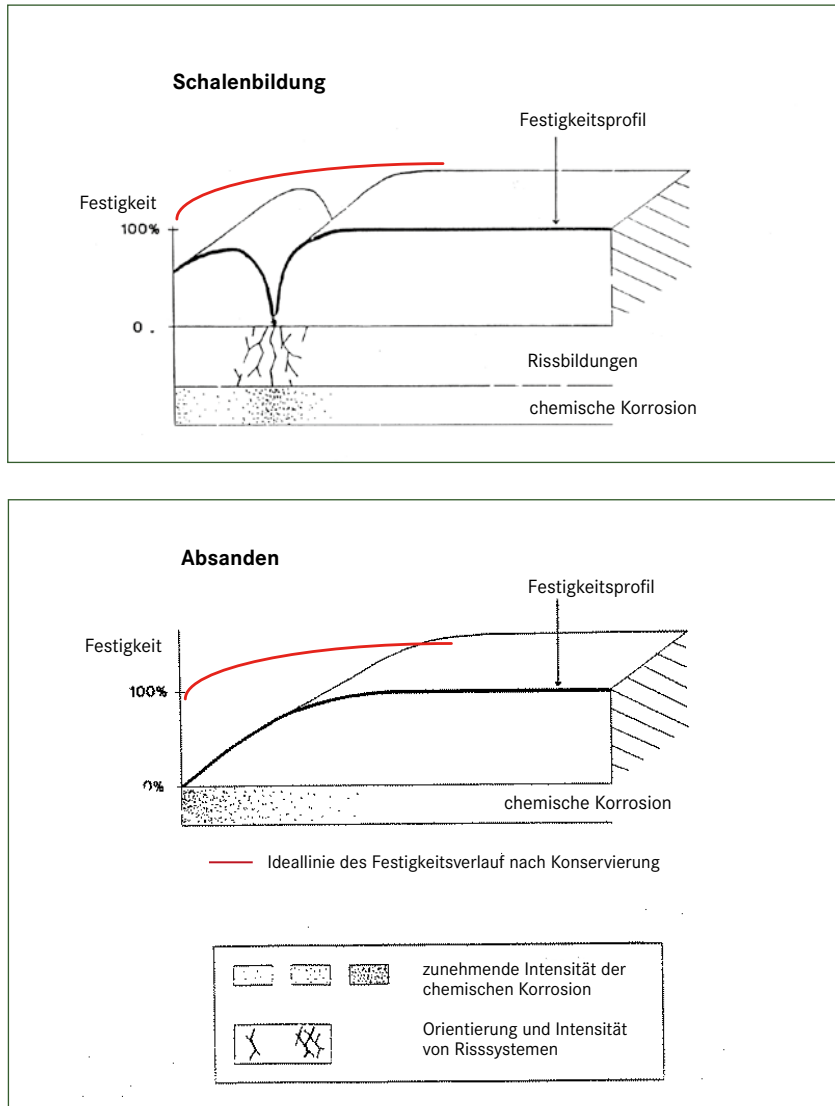
Silanolgruppen können (bei gegenseitiger Annäherung) unter Abspaltung von Wasser miteinander vernetzen (Kondensation), dabei bilden sich Siloxangruppen ($Si-O-Si$). Dieser Schritt stellt die eigentliche Vernetzung der kleineren Moleküle zu einem räumlich ausgedehnten Makroverbund dar. Bei der Kondensation entsteht jedoch nur halb so viel Wasser, wie für die Hydrolyse des (monomeren) TEOS benötigt wird. Ohne im Porenraum verfügbares oder über die Luftfeuchte herangeführtes Wasser kann eine Gelbildung (Hydrolyse + Kondensation) also überhaupt nicht stattfinden. Aus der Massenbilanz ergibt sich für den (theoretischen) Idealfall, also einen vollständigen Ablauf der Reaktionsabfolge ein Wasserbedarf, der etwa bei 15 Vol.-% des eingebrachten Kieselsäureesters liegt.

Die Reaktion wird üblicherweise katalytisch beschleunigt. Da die Ethoxygruppen leicht protonierbar sind, wird die Hydrolyse durch Zugabe von Säure katalysiert. Basen wirken ebenfalls stark beschleunigend, dabei entstehen stärker vernetzte Gele. Sowohl saure wie basische Katalyse sind schlecht steuerbar (die Produkte sind zudem nicht

lagerstabil), die Gelbildung läuft häufig zu rasch ab. Daher enthalten kommerziell erhältliche Festiger (organische) Katalysatoren, die in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise zwar ähnlich sind, aber erst bei Wasserkontakt wirksam werden. Bis vor kurzem wurden häufig für den Anwender stark giftige zinnorganische Katalysatoren (z. B. Zinn-dibutyl-dilaurat, ca. 0,2 %) oder auch sekundäre Amine eingesetzt. Derzeit wird (wegen erhöhter Umweltauflagen) intensiv an weniger giftigen Systemen geforscht.

Als Lösemittel zur Steuerung der Gelabscheiderate sowie zur Lagerstabilisierung wurden bis vor kurzem häufig gut eindringende Ketone wie 2-Butanon, Aceton oder MEK eingesetzt. Vor allem wegen erhöhter Anforderungen hinsichtlich des Brandschutzes werden heute vorwiegend mittelkettige Kohlenwasserstoffe (Benzine) eingesetzt, die einen höheren Flammpunkt aufweisen.

Der eingebrachte Festiger ist (temperaturabhängig) nach 8–24 Stunden angesteift und bildet ein zunächst gallertartiges, im weiteren Verlauf festes Gel. Dieses kann man sich als stark vernetztes (Bild 1) dreidimensionales, makromolekulares »Knäuel« (ungeordnete Glasstruktur) vorstellen, welches in seinem Inneren noch geringe Mengen Ethanol, Wasser und ggf. noch monomeres TEOS enthält. TG/DTA-Messungen und pyknometrische

**Bild 2**

Sehr unterschiedliche Festigkeits- und Schadensverläufe bei Schalenbildung und sandigem Zerfall und optimales Festigkeitsprofil, rot, nach der Festigung

Dichtebestimmungen von Sattler [1992] an unterschiedlich alten Gelen zeigten, dass der mit einer Schrumpfung des Gels einhergehende Masseverlust durch die Abgabe dieser kleinmolekularen Komponenten im Wesentlichen nach 3 Wochen abgeschlossen ist (bei 20 °C). Der weitere, über Jahre andauernde »Alterungsprozess« zeigt mit zunehmendem Gelalter immer geringere Masseverluste, die bei steigender Dichte des Gels auf eine zunehmende Vernetzung durch Kondensation schließen lassen. Die Reißneigung steigt durch diesen »Reifungsprozess«. Gleichzeitig nimmt das verbliebene Vernetzungspotential ab, da eine Annäherung von Silanolgruppen aus sterischen Gründen zunehmend erschwert ist. Auch die Hydrolyse läuft keinesfalls vollständig ab. Alkoxygruppen bleiben z. T. eingeschlossen im Gelnetzwerk zurück

und sind somit abgeschirmt für einen hydrolytischen Angriff. Diese Gruppen lassen sich sogar noch nach Erhitzen der Gele auf über 250 °C nachweisen [Klein, Nelson, Higgins, 1984]. In Tabelle 1 werden handelsübliche Kieselsäureester und ihre Eigenschaften aufgeführt.

2.2 Festigungswirkung

Die Bilder 2a und 2b zeigen Festigkeitstiefenprofile für zwei häufig angetroffene Schadensbilder. Durch das Einbringen von Kieselsäureester lässt sich die entfestigte Außenzone bei gleichmäßigem Absanden (Fall 2b) häufig wieder in ihrem Festigkeitsniveau soweit anheben, dass ein annähernd gleichmäßiger Profilverlauf resultiert. Dagegen besteht bei Schalenbildung (Fall 2a) die Gefahr, dass sich die Aufnahme des Festigers (und damit die Gelbildung) auf die Schale beschränkt, da die dahinter liegende Mürbzone den kapillaren Weitertransport des Kieselsäureesters verhindert. Die Folge wäre eine Überfestigung der Schale, woraus häufig eine Beschleunigung des Schadensprozesses durch erhöhte Scherspannungen resultiert. Durch eine vorherige Verfüllung der Mürbzone mit ebenfalls Kieselsäureester-gebundenen Injektionsmörteln lässt sich ggf. eine Überbrückung und kraftschlüssige Anbindung der Schale erreichen. Eine mikroskopische Betrachtung und FEM-Modellierung zeigte die gute Zwickelfüllung zwischen Sandkörnern als mechanisch wirksamste Position der Gele [Bossert, Ozbolt, Grassegger, 2004].

Durch eine KSE-Festigung (im Bild 2 rote Ideallinie) kann in der Regel nur Profil 2b (Absanden) wieder auf das Ausgangsniveau angeglichen werden. Bei Profil 2a besteht wegen der kapillar brechenden Wirkung der Mürbzone die Gefahr einer Überfestigung der Schale.

Voraussetzung für eine festigende Wirkung durch das Einbringen von Gel aus Kieselsäureester ist dessen kraftschlüssige Anbindung an die mineralischen Grenzflächen der entfestigten Gesteinssubstanz [Häberl, Rademacher, Grassegger, 1990]. Insbesondere bei Sandsteinen kann die Erfolgsquote als hoch bezeichnet werden. Im Gefügebild erkennt man oft die Ausbildung von kraftschlüssigen Gelbrücken in den Zwickelbereichen der Gesteinsstruktur. Andererseits liegen häufig auch Gelfrag-

mente ohne Anbindung in den größeren Poren vor und tragen damit nicht zur Festigung bei. Die zur strukturellen Konsolidierung notwendige Menge an Gel könnte also deutlich geringer sein, wenn es gelänge, die Gelabscheidung kraftschlüssig auf die entfestigten Gefügebereiche zu fokussieren.

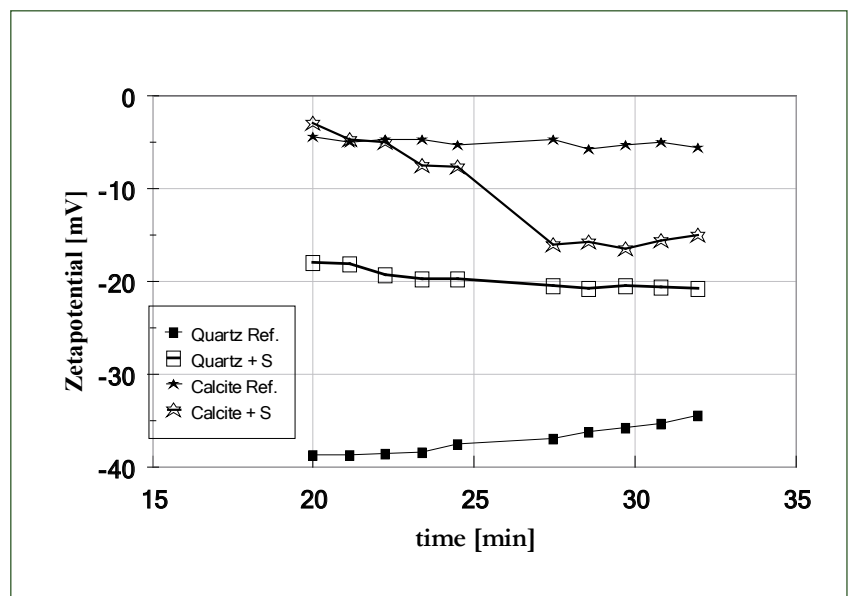
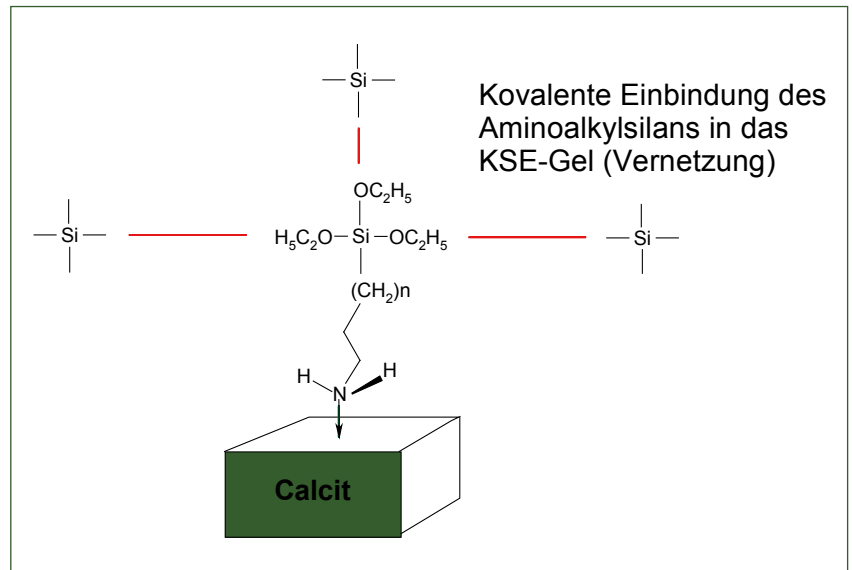
2.3 Modifizierung von Kieselsäureestern

Die Anwendung von Kieselsäureester auf entfestigten carbonatischen Gesteinen führte häufig nicht zum gewünschten Erfolg. Dies führte in den 1980er Jahren zu Überlegungen über die Art der Grenzflächenwechselwirkung zwischen silikatischen Gelen und silikatischen sowie karbonatischen Gesteinskomponenten.

Im Sinne der klassischen Vorstellung von Oberflächenladungen (Zetapotentiale) besitzen nur Silikate gute Anbindungsstellen für Kieselsäureester, deshalb wurden Varianten mit zusätzlichen Haftvermittlern für Karbonate entwickelt, Produktnamen KSE-HV (Bild 3). Dabei wird dem TEOS ein amino-funktionelles Silan (ca. 10 %) zugesetzt, welches im Verlauf der Erhärtung kovalent in das sich bildende Gelnetzwerk eingebunden wird. Die funktionelle Gruppe (-NH₂) bindet wirksam an die Calcitfläche an [Wendler, Klemm, Snethlage, 1991], [Wendler, 1997]. Der Nachweis, dass hier tatsächlich eine Anbindung erfolgt, zeigt Bild 4. Die stark unterschiedlichen Oberflächenladungen von Quarz und Calcit gleichen sich nach Zugabe von Aminoalkylsilan als Folge der Belegung der Grenzflächen mit dem Silan einander an.

Die Aminogruppe kann über ihr freies Elektronenpaar bindende Wechselwirkungen mit der karbonatischen Oberfläche eingehen. Eine molekulare Verknüpfung als Trialkoxysilylverbindung ermöglicht die Integration in das Gelnetzwerk des Kieselsäureesters.

Die polare Quarzoberfläche (ca. -35 mV) ist nach 20 Minuten bereits stabil belegt. Die Kalksteinoberfläche besitzt nur geringe Polarität (-5 mV), die Belegung verläuft entsprechend langsam. Nach 30 Minuten ist auch die Kalksteinoberfläche stabil belegt, erkennbar am fast gleichen Potentialwert (-15 bis -20 mV) [Steinhäuser, Wendler, 2004].



Die mit der beschriebenen Gelreifung (»Alterung«) verbundene Rissbildung ließ Befürchtungen über eine mangelhafte Dauerhaftigkeit von Steinfestigungsmaßnahmen aufkommen. Stark vernetzte Gelstrukturen reagieren zudem auf äußere Einflüsse inelastisch, entsprechend weicht das Spannungs-Verformungsverhalten gefestigter Zonen oft unerwünscht deutlich von demjenigen des unbehandelten (inneren) Gesteinsmaterials ab [Wendler, 1997].

Ein flexibleres Verhalten ist nur bei geringerem Verknüpfungsgrad zu erwarten, ein weitmaschiges, beweglicheres Netzwerk sollte in der Lage sein, ohne Bruchvorgänge zu schrumpfen [Iler, 1979].

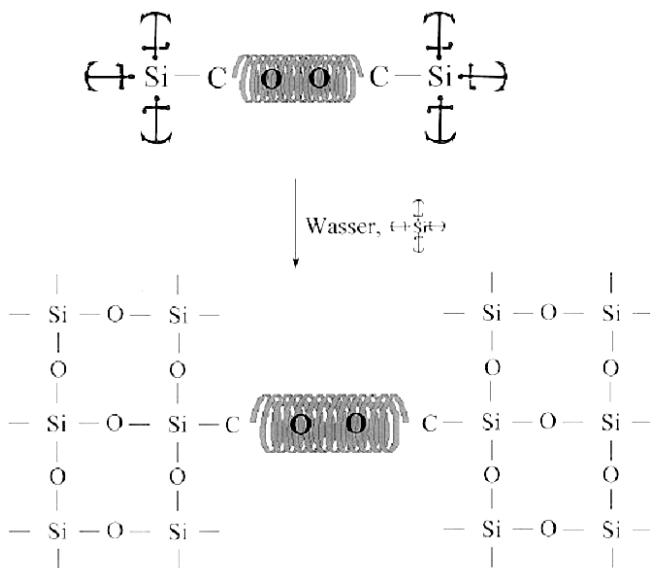
Bild 3

Haftvermittlergruppe für Karbonate auf Basis eines N-funktionellen Silans

Bild 4

Zeitlicher Verlauf des Zetapotentials (Oberflächenladung) von Quarz und Jurakalk nach Zugabe von Aminopropyltriethoxysilan (S); Messbeginn: 20 Min. nach Zugabe des funktionellen Silans

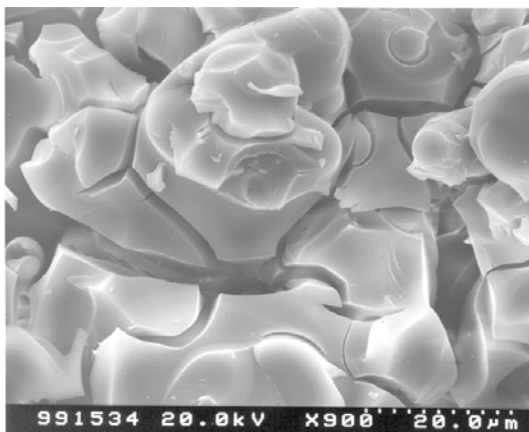
Weichsegmente mit hydrolytisch nicht spaltbaren Si-C-Bindungen

**Bild 5**

Integration eines flexiblen »Weichsegments« in Kiesel-säureester; nach Hydrolyse und Kondensation bildet sich im Porenraum ein elastifiziertes Gel aus; die starre Raumnetzstruktur wird durchbrochen [geändert, nach Grobe et al., 2000]

Bild 6

KSE-Gel auf Glasfritte, getränkt mit Funcosil 300. 900-fach [Foto: G. Hilbert]



Unterschiedliche Ansätze einer Elastifizierung des Gels durch gezielten Einbau von Weichsegmenten wurden in den 1990er Jahren verfolgt [Grobe et al., 2000], [Wendler, 1997]. Bild 5 zeigt schematisch den Einbau eines vorgefertigten, beidseitig Si.-funktionellen Weichsegments mit einem zentrisch stabil eingebundenen, linear-organischen Kettenglied. Alternative Weichsegmente bestehen aus Polyetherstrukturen, die wegen ihrer unterschiedlichen Art der Einbindung in das Gel (Si-O-C) allerdings nicht hydrolysestabil sind.

Die resultierenden Gele sind elastisch und zeigen nur sehr geringe Rissneigung. Gefestigte Gesteine zeichnen sich (bei vergleichbarer Festigungswir-

kung) durch einen weniger starken Anstieg im E-Modul aus. Ein Nachteil der elastifizierten Produkte ist deren höhere Viskosität, die sich oft durch ein schlechteres Eindringverhalten zeigt.

2.4 Einflussfaktoren auf die Gelbildung und mögliche Störungen

Mikroskopische Untersuchungen zu normalen KSE-Gelgefügen (Bild 6) in Sandsteinen und Sanden zeigen Gelsäume/»Auskleidungen« von 30 µm um große Poren und füllende Strukturen in Poren bis zu ca. 50 µm. Größere Poren werden im Poreninneren nur teilgefüllt von scherbüg gerissenen Gelen mit geringen Anhaftungen [Grassegger, Adam, 1992]. Ettl [1987] entwickelte aufgrund von ähnlichen Befunden aus der positiven Erfahrung mit Mehrfachfestigungen von Steinersatzmassen die Empfehlung, mehrfach nach der 1. Aushärtung zu festigen, um eine gute Festigkeit zu erreichen, was sich in der Praxis inzwischen häufig bewährt hat.

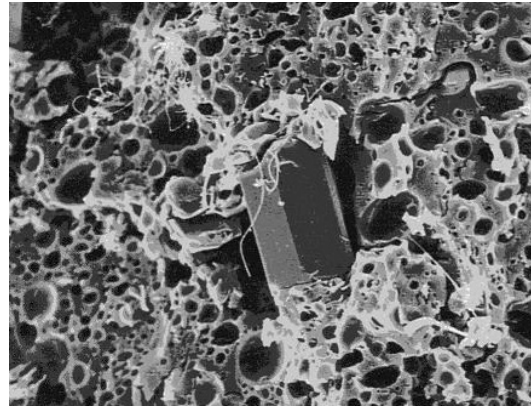
2.4.1 Salzeinfluss und mögliche Störeffekte

Neben den oben genannten Effekten, sei hier zusätzlich auf mögliche Störeffekte und Auswahl- bzw. Ausschlusskriterien summarisch hingewiesen.

Wie zahlreiche Anwendungen zeigen, ist die Umsetzung des KSE innerhalb von 2–4 Wochen auf Stein annähernd abgeschlossen. Nach entsprechenden Untersuchungen war sie auch bei Kontakt mit Wasser und Salzgemischen nach ein paar Wochen im Labor abgeschlossen. Aber in den Poren der schaumigen Gele (Bild 7) waren größere Mengen von Alkohol eingeschlossen als in gut ausgehärteten Gelen [Grassegger, Adam, 1992].

Als Störungen bei Festigungen mit KSE können folgende Zusammenhänge und deren chemische Hintergründe genannt werden:

- a Sehr hoher Wassergehalt, z. B. Poren fast gefüllt: KSE kann in die Poren nicht mehr kapillar aufgenommen werden und ist geringer affin als Wasser zu den mineralischen Oberflächen. Bei großen Wassermengen flockt er in den wassergefüllten Poren aus, bildet weiße Schleier und wird gar nicht aufgenommen. Grenz-

**Bild 7**

Aushärtung von KSE bei Kontakt mit Salzwasser; Bildung von z. T. schlecht haftende schaumige Grenzschichten aus einer KSE-Matrix [Grassegger, Adam, 1992]; (REM-Aufnahmen links ca. 100 ×, rechts ca. 500 ×)

wert: ca. 10–20% der maximalen Wassersättigung der Gesteine. Die als »weiße Schleier« gefällten Silica-Pulver haben Oberflächen von 30–800 m²/g (lt. technische Herstellung aus [Brooke, 2000]) und haben keine Festigungswirkung. Neuere Stoffentwicklungen auf Basis sogenannter o/w-Microemulsionen zeigen, dass auch feuchteres Gestein bis zu einem Grenzwert von ca. 50% der maximalen Sättigung wirksam mit Kieselsäureester gefestigt werden kann, da hier der Eintrag über eine Diffusion im Porenwasser erfolgt.

- b Hohe Salzgehalte > 1,5 M.-% Salze gesamt (u. a. im WTA-Merkblatt Kompressenentsalzung, 2000). Man geht davon aus, dass manche Salze in die Katalyse/Hydrolyse in unerwünschter Weise eingreifen und die Reaktion auch stark beschleunigen, besonders bei sauren und alkalischen pH-Werten [u. a. Brooke, 2000]. Bei Reaktionen mit Salzen konnte bei mikroskopischen Gefügeuntersuchungen nachgewiesen werden, dass das KSE-Gel dann nicht mehr als normale Schichten aushärtet (Bild 7), sondern als schaumige, salzdurchsetzte Gele. Chemisch gesehen kommt es durch die Salze zu einer vorzeitigen Hydrolyse ohne Vernetzung zu längerkettigen Gelen und somit zu einer raschen Fällung als feine SiO₂-Partikel (vorzeitige Ausflockung), die kaum festigende Eigenschaften haben [Grassegger, Adam, 1992].
- c Darüber hinaus kann hohe Salzbelastung bei manchen Gesteinen die Mittelaufnahme wie die resultierende Gelabscheiderate bis zur völligen Wirkungslosigkeit reduzieren (Sattler, 1992). Eine Festigung versalzter poröser Baustoffe kann auch zu gravierenden Folgeschä-

den führen. Künstlich mit Natriumchlorid versalzte und anschließend gefestigte Ziegelproben zeigten nach wenigen Zyklen im Luftfeuchtwechsel deutlich größere Schäden als ungefestigte, die dabei auftretenden Relativbewegungen im Gefüge waren nach Festigung wesentlich größer [Snethlage, Wendler, 1998].

- d Trockener als die Ausgleichsfeuchte von ca. 5 M.-% Feuchte. Viele Gesteine, insbesondere Kalksteine können durch Adsorption aus der Luftfeuchte weit weniger Wasser aufnehmen, als für einen hinreichend raschen Start der Hydrolysereaktion erforderlich wäre. Damit ist auch praktisch keine Vernetzung möglich, und die Verdunstung des eingebrachten Kieselsäureesters verläuft rascher als die Erhärtungsreaktion. Vielfach erklärt sich daraus die Wirkungslosigkeit von Steinfestigungsversuchen auf diesen Untergründen.
- e Hohe Rissbreiten im Schadensbild: Schuppen und Risse größer ca. 100 µm werden – in Abhängigkeit von der Viskosität der KSE-Lösung – nicht von den Flüssigkeiten überbrückt und somit nicht von Gelen verfüllt (Anhand von Modellgefügen mikroskopisch erfasst und als FE-Simulation der mechanischen Stärkung gerechnet [Häberl, Rademacher, Grassegger, 1990]).
- f Zu hohe Temperaturen, größer als 30 °C Materialtemperatur: der KSE selbst z. T. und das Lösemittel verdunsten (Flammpunkt ca. 45 °C), es kommt zu keiner vollständigen Hydrolysereaktion.
- g Zu tiefe Temperaturen unter 5 °C oder Frost: die Reaktionsgeschwindigkeit sinkt rasch ab.

Gealterte KSE-Lösung: Die Kieselsäureester sollten nur innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Lagerstabilität verwendet werden, da danach zahlreiche Reaktionen denkbar sind und der KSE nicht mehr die volle Festigungsleistung erbringen kann.

Kontraindikationen: Die Aufzählung zeigt, dass die obigen baulichen Situationen bei einer Anwendung vermieden werden sollen. Probleme treten häufig auch bei den im Folgenden genannten Substraten auf:

- Sehr heterogene vulkanische Tuffe mit überwiegend Kugelporen, Grobporen, z. B. Suevit: keine kapillare Eindringtiefe und Poren zu grob für Festigung
- Werkstoffe, Gesteine ohne Kapillarporen: kein Transport in den Werkstoff; hier ist nur eine Oberflächenbehandlung möglich; dies sind zu dichte Gefüge
- Schon organisch (mit Kunstharzen) vorbehandelte Substrate: keine Anlagerung von KSE
- Stark gerissene, schalenartige Schadensbilder; hier ist nur eine Strukturfestigung mit KSE möglich; die Risse etc. müssen separat konserviert werden (siehe Kozub/Hauff in diesem Band)

2.4.2 Ursachen von Resthydrophobie

Die zur Gelerhärtung führenden Reaktionswege werden in vielfältiger Weise beeinflusst. In der Praxis wird immer wieder Resthydrophobie nach Kieselsäurefestigungen beobachtet. Die Gründe hierfür sind nicht endgültig erforscht, aber einzelne Versuchsreihen mit unterschiedlich vor- und nachkonditionierten Prüfkörpern und Beobachtungen bei Fallstudien legen nahe, dass nicht hydrolysierte Alkoxygruppen dafür verantwortlich sind: Nach ihrer Einbindung in das makromolekulare Gelnetzwerk sind sie sterisch abgeschirmt, somit kann eine spätere Hydrolyse nur stark verlangsamt erfolgen. Erhöhte Temperaturen (trotz extrem niedriger Relativfeuchten baute sich die Resthydrophobie einer Festigungsmaßnahme in der südägyptischen Wüste innerhalb von Monaten ab, E. v. Plehwe-Leisen, persönliche Mitteilung) sowie ein längeres Angebot erhöhter Luftfeuchte begünstigen die Hydrolyse dieser hydrophoben Gruppen und führen damit oft zu einem rascherem Abbau

der Resthydrophobie. Aus der Praxis kommt die Beobachtung, dass häufig auch ein Nachwaschen mit Aceton zum Abbau der Resthydrophobie führt.

2.5 Abstimmung der KSE-Anwendung auf Schadenstypen

Der Grad der Entfestigung, der Schadenstyp und seine Tiefenerstreckung muss bekannt sein, um eine sachgerechte Auswahl treffen zu können (Bild 2a und 2b). Ziel der Maßnahme ist das Erreichen eines möglichst gleichmäßigen Festigkeitsprofils, [z. B. in Wendler, Klemm, Snethlage, 1991]. Hiernach wird der Steinfestiger gezielt ausgewählt und dies in Versuchsflächen ausgetestet. Da die Saugfähigkeit der Gesteine die Wirkungstiefe entscheidend mitbestimmt, sollte auch diese wenigstens in ihrer Größenordnung bekannt sein. (Für weitere Details zur Konservierung wird auf die Artikel von Kozub und Hauff in diesem Band verwiesen.)

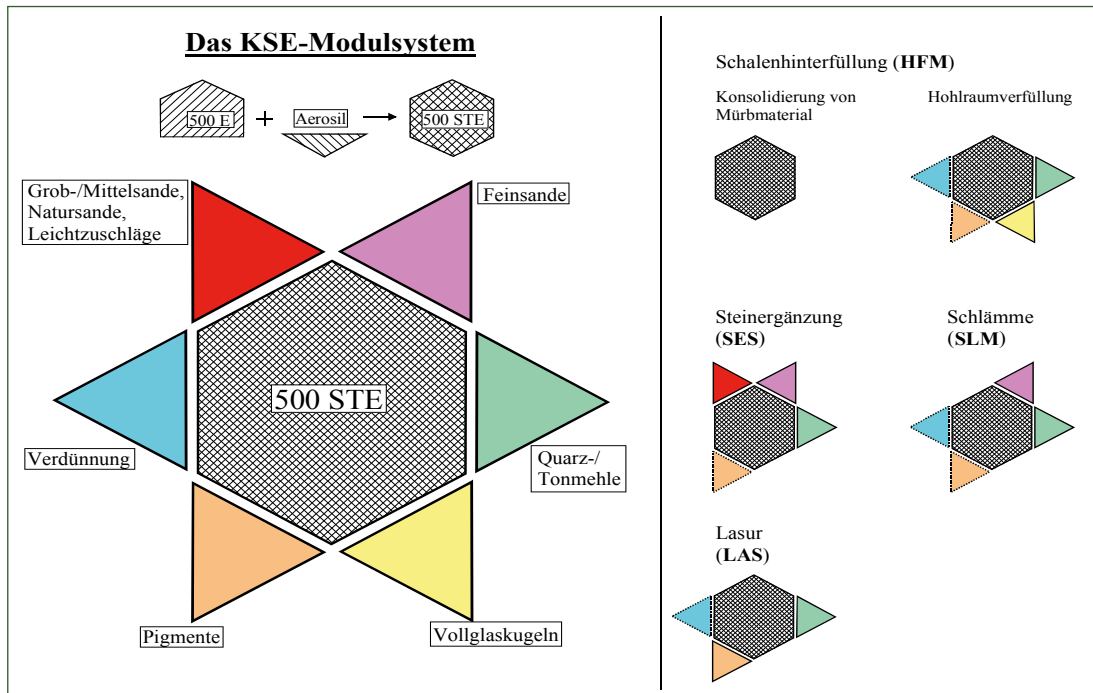
2.6 Das Kieselsäureester-Modulsystem

Die Grundidee des Baukastensystems liegt in der Rezeptierung unterschiedlicher Restaurierungsstoffe im gleichen Bindemittelsystem vorzugsweise mit elastifiziertem Kieselsäureester [Boos et al., 1997]. Aus der in Bild 8 aufgezeigten Auswahlmatrix werden innerhalb des Baukastens folgende Aufgabebereiche durch unterschiedliche Zusätze abgedeckt:

Festigung, Schalenhinterfüllung, Steiner Ergänzung, Oberflächenschlämme, Lasur.

Für die strukturelle Festigung des Gefüges können, abhängig vom Grad der Entfestigung und der Saugfähigkeit, unterschiedliche Kieselsäureesterprodukte verwendet werden. Als Bindemittel für die übrigen Schritte wird üblicherweise ein elastifizierter Kieselsäureester mit hoher Gelabscheiderate eingesetzt, dem Aerosile zugesetzt sind. Auf diese Weise lassen sich ohne weiteren Zusatz von Feinzuschlägen Mikrorisse von bis zu 300 µm Weite kraftschlüssig überbrücken.

Durch Zusatz mineralischer Feinmehle können Hinterfüllmassen zur Hohlraumverfüllung hinter Scha-



len rezeptiert werden. Darauf aufbauend lassen sich durch Zugabe entsprechender Sande Restauriermörtel herstellen. Eine gesteinsangepasste Abtönung lässt sich durch Pigmentzusatz, aber auch durch den Einsatz entsprechend gefärbter Natursande erzielen. Wesentlich für die hygrischen und mechanischen Eigenschaften der Restauriermörtel ist eine optimal eingestellte Sieblinie des Zuschlags, wobei je nach Erfordernis sowohl Körnungen gemäß der Fullerverteilung wie auch Ausfallkörnungen geeignet sein können. Als vorteilhaft erweist sich häufig auch der Einsatz von Siebfrak-

tionen gebrochener Natursteine. So ließ sich durch Zusatz von Schilfsandsteingranulat im oberen Kornklassenbereich das hygrische Quellmaß des Restauriermörtels optimal an dasjenige des Schilfsandsteins anpassen.

Ein weiterer Vorteil des Baukastensystems ist der Wegfall von Wartezeiten für die Aushärtung, es kann »nass-in-nass« gearbeitet werden. Durch das identische Bindemittel ist eine Verträglichkeit der Stoffe untereinander gewährleistet.

Literatur und Quellen

- [Brooke, 2000] Brooke, M. A., (2000): Silicon in organic, organometallic, and Polymer Chemistry, 680 pages, John Wiley & Sons, Inc. New York u. a.
- [Boos et al., 1997] Boos, M., Grobe, J., Hilbert, E., Wendler, E., (1997): Steinfestigung – Möglichkeiten und Grenzen im KSE-System. Bautensch. & Bausan. 8 (20. Jhrg.), S. 39-41
- [Bossert, Ozbolt, Grassegger, 2004] Bossert, J., Ozbolt, J., Grassegger, G., (2004): FE-Modelling of the Conservation Effects of an artificial Resin on Deteriorated Heterogeneous Sandstones in Building Restoration. In: Environmental Geology, (2004), 46, S. 323-332
- Ettl [1987] Ettl, H., (1987): Kieselsäureestergebundene Steinersatzmassen. Münchner Geowiss. Abh. Reihe b., 53 S., Verlag Friedrich Pfeil, München
- [Grassegger, 1992] Grassegger, G., (1992): Charakterisierung der Gel-Strukturen von Kieselsäureester-Steinfestigern unter verschiedenen Erhärtungsbedingungen mittels thermoanalytischer Methoden (DTA/TG). In: R. Snethlage (Hrsg.). Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 2 – 1990, Verlag Ernst & Sohn, S. 179-185
- [Grassegger, Adam, 1992] Grassegger, G., Adam, S., (1992): Untersuchungen zur Entwicklung der mikroskopischen Gefüge von Kieselsäureester-Gelen

- in Porenräumen mit und ohne Salz-, Feuchtestöreffekte. In: Snethlage, R. (Hrsg.) Jahresberichte Steinerfall – Steinkonservierung. Band 4 – 1992, S. 127–133
- [Grobe et al., 2000] Grobe, J., Wendler, E., Hilbert, G., Boos, M., (2000): Abschlussbericht des DBU-Projektes: Schutz von Natursteinoberflächen vor Umweltschäden durch Applikation elastischer Kieselsäureester, 1997–2000
- [Häberl, Rademacher, Grassegger, 1990] Häberl, K., Rademacher, A., Grassegger, G. (1990): Modellierungen und Finite-Element-Berechnungen zur Lastabtragung von Natursteinen und der mechanischen Auswirkung von Kieselsäureester-Festigern. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft im Gespräch. Workshop in Fulda 1990. Ein Förderprojekt des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT), S. 102–105
- [Hestermann, Wendler, 2001] Hestermann, M., Wendler, E., (2001): Gelgebundene Ergänzungsmörtel für Natursteine. Zielgerichtete Anpassung an Gesteinsparameter und praxisorientierte Umsetzung. In: Interacryl AG (Hrsg.): Tagungsband 8. Fachtagung Natursteinsanierung Bern, 3/2001
- [Klein, Nelson, Higgins, 1984] Klein, L. C., Nelson, C., Higgins, K. L., (1984): Micro-Raman-Spectroscopy of fresh and aged silica gels. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 32, S. 293–299, Elsevier, New York
- [Iller, 1979] Iller, R. K., (1979): The chemistry of silica. Wiley & sons, New York
- [Sattler, 1992] Sattler, L., (1992): Untersuchungen zu Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. Dissertation LMU München, S. 88–90 und 124 ff
- [Snethlage, Wendler, 1998] Snethlage, R., Wendler, E., (1998): Steinerfall und Steinkonservierung – neueste Ergebnisse der Münchner Forschungen. In: Altermann, W. et al. (Hrsg.): Münchner Geologische Hefte, A 23, Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. Dietrich D. Klemm, S. 177–201
- [Steinhäuser, Wendler, 2004] Steinhäuser, U., Wendler, E., (2004): Conservation of Limestone by Surfactants and Modified Ethylsilicate. In: Deterioration and Conservation of Stone, Proc. of the 10th International Congress, Stockholm, 2004, S. 439–446
- [Wendler, Klemm, Snethlage, 1991] Wendler, E., Klemm, D. D., Snethlage, R., (1991): Consolidation and Hydrophobic treatment of Natural Stone. In: Durability of Building Materials and Components, Proc. 5th International Conference, Brighton, 7.–9. Nov. 1990, Baker, J. M., Nixon, P. J., Majumdar, A. J., Davies, H. (eds.), 1991 Chapman and Hall, S. 203–212
- [Wendler, 1997] Wendler, E., (1997): New Materials and Approaches for the Conservation of Stone. In: Baer, N. S. & Snethlage, R. (eds.): Saving our Architectural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Report of the Dahlem Workshop, Berlin, March 3–8, 1996, S. 181–98.

Restauratorische Steinfestigung mit Kieselsäureestern oder Kunstharzen

Anforderungen, Applikationsmethoden und -bedingungen

Gottfried Hauff

Zu den wichtigen Qualitätskriterien für eine strukturelle Steinfestigungsmaßnahme gehört u. a. die Beachtung der Kompatibilitätsanforderungen, die für die visuellen und physikalischen Eigenschaften der gefestigten Gesteinsschicht im Vergleich zu denen des ungefestigten Gesteins gelten. Auch die ausreichende Eindringtiefe des Festigungsmittels spielt eine maßgebliche Rolle, da ansonsten als Folgeerscheinung das Abschalen der gefestigten Schicht droht. Hier ist die Auswahl einer geeigneten, auf das Saugverhalten des Gesteins abgestimmten Applikationsmethode gefragt. Im Bereich der Natursteinbauwerke kommen in der Hauptsache das Flut-, das Kompressen-, das Injektions- und das Unterdruckverfahren zum Einsatz. Für den Erfolg einer Steinfestigung sind von großer Bedeutung die Einhaltung korrekter Umfeld- und Objektbedingungen wie Gesteinsfeuchte, Schutz gegen Regen, Wind und Sonneneinwirkung und eventuell auch gegen Rückmigration des Festigungsmittels sowie die Beachtung der Verarbeitungsvorschriften des Herstellers.

Schlagwörter: strukturelle Steinfestigung, Eindringtiefe, Festigungsmethoden, Flutverfahren, Kompressenverfahren, Injektionsverfahren, Unterdruckverfahren, Applikationsbedingungen

In der strukturellen Natursteinfestigung hat sich zumindest in Deutschland in den letzten Jahrzehnten als Festigungsmittel für unterschiedliche Gesteine hauptsächlich Kieselsäureester (KSE) durchgesetzt, wobei sich im Laufe der Zeit die Palette der unterschiedlichen KSE-Typen erweiterte. In anderen Ländern und in speziellen Fällen auch in Deutschland kommen aber noch weitere Festigungsmittel zum Einsatz. So finden Kunstharze primär bei kompakten Gesteinen wie verschiedenen Metamorphiten oder plutonischen Magmatiten aber auch bei problematischen porösen Sedimenten Verwendung; bei grobporigen Kalksteinen Nanokalk Sole.

1 Anforderungen an eine Steinfestigung

Eine im Zusammenhang mit den Applikationstechniken besonders relevante Anforderung für den langfristigen Erfolg einer Festigung liegt in der ausreichenden Eindringtiefe des Festigungsmittels. Diese ist von verschiedenen Faktoren des Gesteins und des Festigungsmittels abhängig, etwa von der offenen Porosität und Porengrößenverteilung des Gesteins, von den Eigenschaften des Festigungsmittels wie der Molekülgröße, Viskosität und Ober-

flächenspannung oder auch vom Lösungsmittel, in dem Festiger gelöst sein können. Die Applikationsmethode des Festigungsmittels spielt für die Eindringtiefe eine entscheidende Rolle.

Schon seit langem gilt die Richtlinie, dass das Festigungsmittel durch die gesamte entfestigte Schicht hindurch zumindest bis zum unverwitterten Kern eindringen soll. Erfasst die Eindringtiefe nur einen Teil der entfestigten Schicht, führt dies zur Bildung einer oberflächlichen festen Schale über einer entfestigten Schicht und letztlich auch meist zum Verlust dieser Schale. So kann eine Steinfestigung zu einer Beschleunigung der Verwitterung und Erhöhung des ursprünglich zu erwartenden Schadensausmaßes führen.

Die Entfestigungstiefe ist abhängig von Schadensprozessen, bei denen Wasser eine große Rolle spielt. Messungen und Berechnungen der mittleren Feuchteverteilung im Gestein nach einer Oberflächenberegnung und anschließender Trocknung führten zu der Anforderung, die Eindringtiefe solle »größer als [die] Zone der maximalen mittleren Feuchte« [Snethlage, Pfanner, 2013] sein. Für diese Zone wiederum wird ein Zusammenhang mit dem jeweiligen gesteinsabhängigen Wasseraufnahmekoeffizient hergestellt. Auf dieser Grundlage werden für drei Gruppen von Gesteinen mit definierten

Tabelle 1

Anforderung für Eindringtiefe des Festigungsmittels in Abhängigkeit vom w -Wert_{unbeh.}
[Snethlage, Pfanner, 2013]

Gesteinsgruppe	Wasseraufnahmekoeffizient w (unbehandeltes Gestein)	Anforderung Eindringtiefe s
Gruppe 1: niedriger w -Wert	$0,1-0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{t}$	$\geq 1 \text{ cm}$
Gruppe 2: mittlerer w -Wert	$0,5-3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{t}$	$\geq 3 \text{ cm}$
Gruppe 3: hoher w -Wert	$> 3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{t}$	$\geq 6 \text{ cm}$

**Bild 1**

Zyklische Flutung eines Kirchenportal-Abschnitts mit dem Drucksprüngerät [Foto: Bärbel Dieruff, Karl Fiedler]

Wasseraufnahmekoeffizienten die Richtwerte zur Mindesteindringtiefe des Festigungsmittels postuliert, wobei letztere immer auf den unbehandelten Zustand der Gesteine bezogen sind (Tabelle 1).

Die erforderliche Menge an Festigungsmittel, die für die jeweilige Eindringtiefe nötig ist, lässt sich über den möglicherweise bekannten Wert der offenen Porosität oder über die Messung des volumenbezogenen Wasseraufnahmegrads abschätzen.

Neben der Eindringtiefe lassen sich noch weitere ebenso wichtige Qualitätskriterien für den langfristigen Erfolg einer Festigung festmachen.

So soll eine Festigung die visuellen Eigenschaften des Natursteins bewahren und die Anforderungen erfüllen

- »möglichst keine Farbänderung
- möglichst keine Dunkelung
- kein Glanz« [Snethlage, Pfanner, 2013].

Weiterhin sollen bei einer Festigung die physikalischen Eigenschaften der gefestigten Gesteinschicht mit denen des natürlichen, unbehandelten

Gesteins kompatibel sein. Besonders wichtig sind hierbei die Parameter

- Festigkeit,
- Elastizität,
- Wasseraufnahme,
- Trocknung,
- hygrische Längenänderung,
- thermische Längenänderung.

2 Applikationsmethoden bei der Steinfestigung

Für die Durchführung einer Steinfestigung am Bauwerk stehen dem Restaurator verschiedene Tränkungsverfahren zur Verfügung [Wihr, 1980], [Rentmeister, 2003], [Snethlage, Pfanner, 2013]. Den einzelnen Verfahren werden jeweils mehr oder weniger hohe Eindringtiefen für Festigungsmittel zugeschrieben. Auf dieser Basis sind sie eher für Gesteine mit hoher kapillarer Saugfähigkeit oder für solche mit niedrigerer Saugfähigkeit zu empfehlen. Eine korrekte, fundierte Auswahl der für das individuelle Bauwerk am besten geeigneten Methode setzt im Regelfalle Labor- und Musterflächen-Versuche voraus.

Neben der ausreichenden Eindringtiefe fallen in der Praxis natürlich immer auch andere Kriterien wie Aufwand und Kosten ins Gewicht. Im Hinblick auf die Effektivität und Nachhaltigkeit einer Festigungsmaßnahme müssen diese Aspekte aber zurückstehen.

2.1 Das Flutverfahren

Die am häufigsten angewandte Festigungsmethode ist das meist mehrfache, flächige Fluten der entfestigten Steinoberfläche mit dem gewählten Festigungsmittel. Durch die Kapillarwirkung der Gesteinsporen wird die aufgebrachte Flüssigkeit direkt nach innen transportiert. Als Flutungs-Geräte kommen üblicherweise abhängig von der Größe der Flächen folgende Geräte zum Einsatz (Bild 1):

- Niederdruckspritzen,
- Drucksprüngeräte/»Gartenspritzen«,
- Spritzflaschen,
- Pinsel zum »Betupfen«/Bestreichen,
- Injektionsspritzen.

Flut-Festigungen finden sinnvoll im Zuge einer einzigen Festigungskampagne statt. Große Flächen werden in Einzelabschnitte aufgeteilt und sukzessive behandelt. Die Eintragsmenge und dadurch auch die Eindringtiefe des Festigungsmittels lassen sich über die Wiederholung von »nass-in-nass«-Flutungszyklen steuern. So sind auch lange Festigungszeiten zu erreichen. Zonale Unterschiede in der Saugfähigkeit der entfestigten Oberfläche können über die jeweilige Flutungszeit ausgeglichen werden.

Zum Einsatz kommt hierbei nicht unbedingt nur ein und dieselbe Festigungsmittel-Konzentration bzw. Gelabscheidungsrate. Es ist auch eine »nass-in-nass«-Abfolge unterschiedlicher Konzentrationen oder Typen möglich. Auf eine möglichst tiefer eindringende Vorfestigung mit einem niedrig konzentrierten, niedrig viskosen Mittel kann z. B. eine Hauptfestigung mit einer höheren Festigungswirkung folgen. Dies kann in bestimmten Fällen zu einem ausgeglicheneren Festigkeitsprofil führen.

Merkblättern zu Kieselsäureester führen auch die Möglichkeit einer Festigungsmittel-Applikation in Form von zwei, durch einen Zeitraum von 2–3 Wochen getrennten Kampagnen auf. Exakte Kenntnisse zu den womöglich gesteinspezifischen Vor- und Nachteilen der beschriebenen Varianten liegen meines Wissens nur für einzelne Fälle vor [Pfefferkorn et al., 2001].

Vorteile des Flutverfahrens:

- Das Flutverfahren eignet sich für die Festigung von Gesteinen mit eher hoher Saugfähigkeit.
- Es ist vor Ort und in der Werkstatt anwendbar.
- Die mechanische Belastung der entfestigten Steinoberfläche ist gering.
- Die Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit der Festigungsmittelaufnahme ist relativ gut am Glanzgrad der gefluteten Oberfläche erkennbar.

Nachteile des Flutverfahrens:

- Oft wird eine Begrenzung der einzelnen Flutungszeiten angestrebt, die den Entfestigungszeiten entsprechen und intakte Bereiche aussparen soll. Dies ist aufwendig und schwierig.
- Das Flutverfahren eignet sich nicht für die Festigung von Gesteinen mit einer Saugfähigkeit,

mit der sich selbst bei vielen Flutungszyklen die notwendige Eindringtiefe nicht erzielen lässt.

2.2 Das Kompressenverfahren

Bei der Festigung von entfestigten Steinoberflächen über dicht anliegende, kapillar leitfähige Kompressen werden zunächst die Kompressen selbst mit der Festigerflüssigkeit getränkt, die dann in die Gesteinsporen weitertransportiert wird. Dadurch kann ein ununterbrochener Festigungsmittelnachschub gewährleistet werden. Um Verdunstung oder etwa bei Kieselsäureester auch eine Reaktionsbeschleunigung durch die Luftfeuchte zu verhindern, wird die Komresse während der Tränkung mit einer lösungsmittelresistenten Folie abgedeckt. Es stehen unterschiedliche Technikvarianten zur Verfügung.

Ganzflächige Zellstoff- oder Schaumstoffkompressen

Zellstoffkompressen können entweder aus nass auf die Objektoberfläche applizierten Zellstoffbögen oder aus einer Schicht aus breiartig angetragenen Zellstoffflocken bestehen. Sie sind erst in völlig getrocknetem Zustand gebrauchsfähig. Polyurethanschaum kann für kapillaraktive und lösungsmittelbeständige Schaumstoffkompressen, mit denen die entfestigten Oberflächen belegt werden, zum Einsatz kommen. Zur Fixierung unter leichtem Andruck sind u. a. Stoffbahnen einsetzbar, die in den Fugen zu befestigen sind. Die Kompressen werden meist über Infusionsgeräte oder bei großen Fassadenflächen mit einem System aus Behältern und Zuleitungen aus Rohren und Schläuchen mit Festigungsmittel versorgt (Bild 2).

Punktueller Zellstoff- oder Schaumstoffkompressen

Neben der ganzflächigen Kompressenbedeckung des Werkstücks oder des Objekts wird in manchen Fällen auch mit »Kompressen-Inseln« aus Zellstoff oder Schaumstoff gearbeitet, die in ausreichend enger Anordnung dennoch die vollständige Durch-



Bild 2
Ganzflächige Bedeckung entfestigter Mauerquader mit jeweils eigener Schaumstoffkompressen
[Foto: Ewa Piaszczyński]



Bild 3
Punktueller, inselartiger Bedeckung einer Oberfläche mit Zellstoffkompressen, Festigeraufnahme während des Saugvorgangs
[Foto: Georg Hilbert]

tränkung der erforderlichen Gesteinsschicht versprechen. Auch hier erfolgt die Versorgung mit Festigungsmittel je nach Größe der Fläche entweder händisch mit Spritzflaschen oder über Infusionsgeräte mit dosierter Zufuhr (Bild 3).

Vorteile des Kompressenverfahrens:

- Das Kompressenverfahren mit Zellstoff und Schaumstoff eignet sich für die Festigung von Gesteinen mit vergleichsweise niedriger Saugfähigkeit.
- Es ist vor Ort und in der Werkstatt anwendbar.
- Die Begrenzung der einzelnen Tränkungszone ist gut möglich.

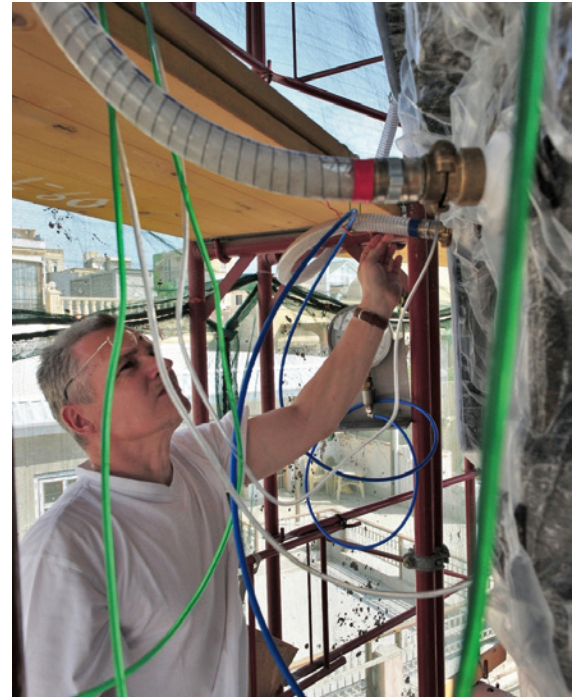
Nachteile/Unsicherheitsfaktoren des Kompressenverfahrens:

- Das Kompressenverfahren ist im Vergleich zum Flutverfahren aufwendiger und arbeitsintensiver.
- Bei den ganzflächigen Kompressen sind die Gesteinsoberfläche und der Saugvorgang des Festigungsmittels nicht direkt sichtbar und kontrollierbar.
- Bei den punktuellen Kompressen ist die visuelle Kontrollierbarkeit zwar gewährleistet, aber die ausreichende Anzahl und Positionierungsdichte der »Kompressen-Inseln« ist schwer einschätzbar.

- Bei Zellstoffkompressen kann die Aufrechterhaltung eines kapillar leitfähigen Kontaktes zur Steinoberfläche über längere Zeiten Schwierigkeiten bereiten, zumal an vertikalen oder überhängenden Flächen.
- Bei Zellstoffkompressen ist ein gewisses Risiko mechanischer Belastungsschäden der entfestigten Steinoberfläche gegeben, und eine völlig rückstandslose Entfernung kann schwierig sein.
- Bei Schaumstoffkompressen ist das mechanische Risiko zwar deutlich geringer. Allerdings schafft die Anbringung auf der Oberfläche zusätzlichen technischen Aufwand und Probleme.

2.3 Das Infusionsverfahren

Das Infusionsverfahren, in der Restaurierungsliteratur auch öfter »Injektionsverfahren« genannt, kommt meist nur in einem speziellen Schadensfall zum Einsatz, wenn eine strukturell entfestigte Gesteinsschicht unter einer stark verdichteten Oberflächenschicht, einer Kruste, liegt. Diese oft nur weniger als 1 mm dicke Oberflächenschicht wird durchbohrt und das Festigungsmittel über die Bohrlöcher in tiefer liegende, entfestigte und saugende Bereiche eingebracht. Üblicherweise werden



hierbei die Bohrlöcher in bereits vorhandene Fehlstellen, z. B. Ausbrüche oder Rückwitterungszonen positioniert, um Verluste an originaler Oberfläche zu vermeiden. Die Zufuhr erfolgt dann über Infusionsschläuche, die in die Bohrlöcher platziert und abgedichtet sind (Bild 4).

Vorteile des Infusionsverfahrens:

- Das Infusionsverfahren eignet sich für die Festigung von Objekten mit einer Kruste von niedriger Saugfähigkeit.
- Es ist vor Ort und in der Werkstatt anwendbar.
- Die Begrenzung der einzelnen Tränkungszone ist gut möglich.

Nachteile/Unsicherheitsfaktoren des Infusionsverfahrens:

- Das Infusionsverfahren beinhaltet zumindest einen Verlust an originaler Substanz im Bohrlöcher, manchmal möglicherweise auch an originaler Oberfläche.
- Die ausreichende Anzahl und Positionierdichte der Bohrlöcher ist teilweise schwer einschätzbar.

2.4 Das Unterdruckverfahren

Die Unterdruckmethode kommt in speziellen Fällen bei stark verdichteten Oberflächen abschnittsweise an Bauwerksteilen und Fassaden zum Einsatz.

Der einzelne Abschnitt wird hierbei mit einer Folie dicht abgedeckt und mit Schlauchleitungen verbunden (Bild 5). Durch eine Vakuumpumpe ist Unterdruck zu erzeugen. Das Festigungsmittel wird kreislaufartig zu- und der Überschuss wieder abgeführt [Pummer, 2007]. Der angelegte Unterdruck soll die Eindringtiefe und Aufnahmemenge des zugeleiteten Festigungsmittels im Vergleich zu den rein kapillar wirkenden Methoden erhöhen.

Vorteile des Unterdruckverfahrens:

- Das Unterdruckverfahren eignet sich für die Festigung von Gesteinen mit niedriger Saugfähigkeit und von Objekten mit einer Kruste von niedriger Saugfähigkeit.
- Es ist vor Ort und in der Werkstatt anwendbar.
- Die Begrenzung der einzelnen Tränkungszone ist gut möglich.

Nachteile/Unsicherheitsfaktoren des Unterdruckverfahrens:

- Beim Unterdruckverfahren kann ein gewisses Risiko mechanischer Belastungsschäden der entfestigten Steinoberfläche gegeben sein.
- Die Methode ist sehr aufwändig.

2.5 Das Badverfahren

Die Werkstatt-Methode des Badverfahrens wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt. Sie ist aus-

Bild 4

Eintrag des Festigungsmittels durch eine Kruste hindurch mit Hilfe eines eingedichteten Infusionsschlauchs, Festigeraufnahme während des Saugvorgangs [Foto: Georg Hilbert]

Bild 5

Anwendung des Unterdruckverfahrens an einem Natursteinbauwerk [Foto: Georg Hilbert]



Bild 6 Abdeckung einer Fassade vor, während und nach der Festigung zum Schutz vor Regen, Wind und Sonne

schließlich für transportable Objekte anwendbar und kommt daher im Zusammenhang der Erhaltung von Natursteinbauwerken nur für abnehmbare Werkstücke oder Skulpturen in Frage. Diese werden entweder in einem Behälter aufgestellt bzw. es wird ein Behälter um dieselben herumgebaut. Mit Hilfe einer sogenannten Folienwanne [Wihr, 1980] lässt sich der freie Raum des Behälters und damit die Gesamtmenge des einzufüllenden Festigungsmittels minimieren. Der Füllvorgang erfolgt zunächst nur bis unter die Oberfläche des Objektes, um eine Porenentlüftung zu gewährleisten.

Vorteile des Badverfahrens:

- Das Badverfahren eignet sich für die Festigung von Gesteinen mit niedriger Saugfähigkeit, möglicherweise auch von Objekten mit einer Kruste von niedriger Saugfähigkeit.

Nachteile/Unsicherheitsfaktoren des Badverfahrens:

- Das Badverfahren ist nur in der Werkstatt anwendbar.
- Abbau und Transport können ein gewisses Schädigungsrisiko mit sich bringen.
- Die Begrenzung der einzelnen Tränkungszone ist nicht möglich.

3 Applikationsbedingungen und Voraussetzungen bei der Steinfestigung

Die Qualität einer Steinfestigung hängt nicht zuletzt auch von der Einhaltung der Objekt- und Umfeldbedingungen ab. Dies gilt vor allem hinsichtlich des Feuchtegehalts des zu behandelnden Gesteins. Bei der Festigung von feuchten oder nur oberflächlich abgetrockneten Zonen wird die Aufnahme eines Festigungsmittels durch die Feuchtefront behindert. Im Falle von Kieselsäureester kommt es zu einer verfrühten Hydrolyse. Grundsätzlich führt dies zum Risiko einer Schalenbildung. Daher können Bauwerkszonen mit aufsteigender Feuchte nicht gefestigt werden. Berechnete Bauwerkszonen dagegen müssen vor einer Festigung so lange vor Regen geschützt sein, bis sie nur noch ihre durch die umgebende Luftfeuchte hervorgerufene Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. Dies bedeutet, dass eine schützende Abdeckung schon Wochen vor der Maßnahme angebracht werden muss und auch während sowie nach der Festigung verbleiben soll. Eine solche Abdeckung dient zudem zum Schutz vor der schädlichen Einwirkung von Sonne und Wind zum Zeitpunkt der Steinfestigung selbst (Bild 6).

Im Hinblick auf die Reaktionsbedingungen und Viskosität von Festigern sowie die Verdunstung von Lösungsmitteln sollten die Temperaturen während des Festigungsvorgangs zwischen ca. 10–25°C liegen und eine entsprechende Luftfeuchte vorherrschen. Direkt nach dem Festigungsvorgang kann zur Vermeidung von Glanzbildung die Gesteinsoberfläche mit einem passenden Lösungsmittel nachbehandelt werden. Bei Kieselsäureester kommt hierfür z. B. Ethanol in Frage, bei einem Kunstharz das zugehörige Lösungsmittel bzw. Lösungsmittelgemisch.

Im Falle einer Festigung mit in Lösungsmittel gelösten Kunstharzen bedarf es einer weiteren Nachsorgemaßnahme. Für diese Festigungsmittel besteht aus Erfahrung das Risiko einer Rückmigration der Festigerlösung zur Oberfläche und damit die Gefahr einer Überfestigung der oberflächenschicht. Es ist notwendig, entweder über der

Objektoberfläche in einem »Folienzelt« ein Lösungsmittel-Klima zu schaffen oder die Oberfläche mit Aluminiumfolie bzw. Lösungsmittelresistenter Plastikfolie abzudecken und dadurch das Abdampfen des Lösungsmittels zu verlangsamen bzw. bei reaktiven Harzen den Zeitraum der Reaktion zu verlängern [Domaslowsky, Strzelczyk, 1986].

Die Festigung von Gesteinen mit schadensrelevanten Salzgehalten bringt Risiken und Nachteile mit sich. Die Salze können die Reaktionsprozesse und Eindringtiefe von Festigern negativ beeinflussen sowie die Effektivität der Festigung deutlich herabsetzen. Die Präsenz von Schadsalzen führt auch nach einer Festigung zum beschleunigten Fortgang der Steinverwitterung. Der Festigung muss also eine Salzreduktionsmaßnahme vorausgehen. Sinnvoll kann allerdings bei stark entfestigten, salzkontaminierten Gesteinspartien eine Vorfestigung

sein, der dann eine Salzreduktion und Hauptfestigung nachfolgen muss.

4 Qualitätssicherung

Insgesamt gesehen hängt der Erfolg einer Naturstein-Festigung von der Beachtung aller drei Qualitätsfaktoren ab, nämlich einer sorgfältigen Auswahl des mit dem Stein kompatiblen Festigungsmittels, der Auswahl einer adäquaten Applikationsmethode und der Einhaltung der Applikationsbedingungen. Dies macht es in der Regel erforderlich, dass die Planung und Durchführung von Festigungsmaßnahmen in den Händen von akademischen Restauratoren, möglichst in Kooperation mit Naturwissenschaftlern in der Denkmalpflege liegen muss.

Literatur und Quellen

- [Domaslowsky, Strzelczyk, 1986] Domaslowsky, W., Strzelczyk, A., (1986): Evaluation of applicability of epoxy resins to conservation of stone historic monuments. In: IIC Preprints of the Contributions to the Bologna Congress, 21–26 Sept. 1986, Case Studies in the Conservation of Stone and Wall Paintings, London, S. 126–132
- [Pfefferkorn, Siedel, 2001] Pfefferkorn, St., Siedel, H., (2001): Zur Festigung von Cottaer Elbsandstein mit Kieselsäureester am Schlosskapellenportal in Dresden. In: Natursteinkonservierung – Grundlagen, Entwicklungen und Anwendungen. WTA-Schriftenreihe, Heft 23, Aedificatio Verlag Freiburg
- [Pummer, 2007] Pummer, E., (2007): Vakuum – Kreislauf – Festigung. Eine alternative Applikationsmethode für Steinfestiger. Restauro, Heft 6, S. 367–370.
- [Rentmeister, 2003] Rentmeister, A., (2003): Instandsetzung von Natursteinmauerwerk. Stuttgart München, Deutsche Verlagsanstalt
- [Snethlage, Pfanner, 2013] Snethlage, R., Pfanner, M., (2013): Leitfaden Steinkonservierung – Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 4. Aufl.
- [Wihr, 1980] Wihr, R., (1980): Restaurierung von Steindenkmälern. München: Callwey Verlag

Injektion von Rissen, Spalten und Schalenhöhlräumen an Steinskulpturen

Die beschriebenen verschiedenen Injektionsmethoden und Injektionsmaterialien erlauben bei Beachtung der erwähnten Anforderungen und Regeln in den meisten Fällen eine erfolgreiche Durchführung einer Injektion. Die Verwitterungsvorgänge unterschiedlicher Gesteine, die zu sehr differenzierten Schadensbildern mit unterschiedlichen Spaltenbreiten, Ausdehnungen der Hohlräume und unterschiedlichem Verlauf mit Verzweigungen und mehrschichtigem Aufbau führen, machen die Probleme, die durch eine Injektionsmaßnahme bewältigt werden sollen, insgesamt sehr komplex und schwierig. Da unter einer oft völlig intakt erscheinenden Oberfläche der Verlauf der Hohlräume in der Tiefe von außen nicht eindeutig erkennbar ist und der genaue Verlauf sowie die Ausdehnung der Hohlräume auch durch aufwändige Untersuchungsmethoden nur bedingt festgestellt werden können, gehört die Injektion zu den schwierigsten Maßnahmen in der Steinkonservierung.

Peter Kozub

Schlagwörter: Adhäsion, Kohäsion, Injektionsmasse, Penetrationsverhalten, Applikationsmethoden, Ablauf der Injektion, Isolierungsmaterialien, Abdichtungsmaterialien, Bindemittel, Zuschlagstoffe, Additive der Injektionsmassen

Der Terminus Injektion (lat.: *in*icere – »hineinwerfen«, »einfüllen«) wird in der Restaurierung grundsätzlich in zwei Bereichen genutzt. Zum einem versteht man darunter eine Maßnahme, die ein Bauteil gegen aufsteigende Feuchte abdichten soll. Durch die gezielte Einführung einer Flüssigkeit in die poröse Struktur entsteht, meist nach der Aushärtung der Flüssigkeit, eine horizontal angeordnete Sperre, die den kapillaren Wassertransport in höher liegende Bereiche verhindern soll. Zum anderen versteht man unter Injektion das Verfüllen von durch Spannungen in der Struktur entstandenen Hohlräumen und das Anbinden der in diesen Prozessen entstandenen auseinanderklaffenden Flanken. Beide Verwendungsformen dienen zwar dem Schutz der betroffenen Substanz vor weiterem Verfall, allerdings in sehr unterschiedlicher Weise.

Hohlräume im Steingefüge, die durch Injektion behandelt werden sollen, weisen sehr differenzierte Formen auf. Diese unterschiedlichen Schadensphänomene lassen sich generell zwei Gruppen zuordnen. Die erste Gruppe, die Risse, beschreibt Öffnungen in der Steinstruktur in Form von Spalten oder Sprüngen unterschiedlicher Größe, wobei der Hohlraum hinter der Öffnung mehr oder weniger senkrecht zur Oberfläche verläuft. Die Breite dieser Öffnung kann weniger als 0,1 mm bei s. g. Haarris-

sen bis zu mehreren cm betragen. Auch der Verlauf dieser Spalten, ihre Richtung, Verzweigung und Länge können dabei sehr stark variieren. Die zweite Gruppe der hier infrage kommenden Schadensphänomene, die Schalen, kennzeichnet ebenso schmale, länglich verlaufende Öffnungen in der Struktur, wobei die Hohlräume dahinter jedoch einen parallelen Verlauf zur Oberfläche aufweisen. Auch in diesem Fall sind die Dimensionen und Formen der Hohlräume in der Tiefe sehr unterschiedlich.

Beide genannten Schadensphänomene entstehen durch unterschiedliche Ursachen und unterschiedlich verlaufende Schadensmechanismen. Abhängig von der Gesteinsart, der Art und dem Verlauf der Belastung und den klimatischen Bedingungen in der unmittelbaren Umgebung werden im Laufe der Verwitterungsprozesse stark differenzierte Strukturen gebildet, die eine individuell dem Fall angepasste Behandlung erfordern.

1 Anforderungen an die Injektionsmasse

Unabhängig von allen erwähnten Unterschieden müssen die bei der Injektion verwendeten Materialien bestimmte Kriterien erfüllen. In erster Linie

betreffen diese das noch flüssige Injektionsmaterial, das folgende Eigenschaften aufweisen soll:

- *Gutes Penetrationsverhalten in engen Hohlräumen*

Dies soll grundsätzlich das gesamte Verfüllen von Hohlräumen differenzierter Dimensionen mit unterschiedlichen Methoden ermöglichen. Die Injektionsmasse muss auch in sehr schmale Spalten leicht injizierbar sein und problemlos den Hohlraum ausfüllen.

- *Homogenität und Stabilität während der Applikation und in den verfüllten Hohlräumen*

Dadurch soll eine gleichmäßige Verteilung der Masse bewirkt werden, sodass einheitliche Eigenschaften in der gesamten Struktur des Injektionsstoffes entstehen und damit eventuelle zusätzliche Spannungen eingeschränkt werden.

- *Hohe Flüssigkeitsretention bei porösen Strukturen*

Das Binde-, Lösungs- oder Verdünnungsmittel darf nicht in großem Maße in die kapillaren Strukturen des Steins abwandern. Das kann sich nachteilig auf die angestrebten Endigenschaften des eingefügten Materials auswirken und den Charakter der Oberflächenpartien der Hohlraumflanken negativ beeinflussen.

Der Übergang von der flüssigen in die feste Form des Injektionsmittels verläuft je nach verwendeten Materialien durch verschiedene Reaktionen ab. Diese Abbindeprozesse müssen ebenfalls bestimmte Bedingungen erfüllen. Die Injektionsmasse sollte in diesem Stadium folgende Eigenschaften besitzen:

- *Ausreichende Verarbeitbarkeitszeit*

Es muss eine bedachte und ruhige Durchführung der Injektion möglich sein. Die frische Injektionsmasse muss eine angemessene lange Bindezeit besitzen, die eine genaue Vorbereitung und eine präzise Durchführung auch sehr komplexer Injektionen erlaubt.

- *Geringer Volumenschwund*

Die Verringerung des Volumens während der Abbindezeit kann zu einer unvollständigen Füllung der Hohlräume führen. Gleichzeitig kann die starke Schrumpfung die Rissbildung begünstigen und sich vor allem in einem starren System negativ auf die Haftung der Injektionsmasse an den Hohlraumflanken auswirken.

- *Gleichmäßiges Ausreagieren*

Die Homogenität des Reaktionsproduktes garantiert gleiche Eigenschaften in allen Bereichen.

Grundsätzlich sollen die Injektionsmassen nach der Abbindung ähnliche physiko-mechanische Eigenschaften wie der Naturstein aufweisen wie:

- *Ausreichende Haftzugfestigkeit (Adhäsion)*

Eines der Ziele ist das Zurückbringen der Stabilität des zerstörten Materials. Dieses erfordert eine entsprechend gute Anbindung der Hohlraumflanken durch die Injektionsmasse.

- *Ausreichende Festigkeit (Kohäsion)*

Alle mechanischen Eigenschaften der Masse sollen den Schutz des Originalmaterials garantieren. Daher sollten die Festigkeitswerte der Masse ähnlich oder niedriger sein als die des Substrats.

- *Möglichst hohe Elastizität*

Eventuelle Abweichungen bei den physiko-mechanischen Eigenschaften zwischen dem Injektionsmaterial und dem Substrat, die zur Bildung von zusätzlichen Spannungen führen können, werden durch geringe E-Moduli kompensiert.

- *Ähnliche kapillare Eigenschaften*

Die kapillaren Eigenschaften der Injektionsmasse sollen sowohl den Wasser- und Schadstofftransport ermöglichen als auch eine ungehinderte Diffusion der Gase und des Wasserdampfes zulassen. Die Entstehung von Barrieren auf großen Bereichen kann zur Ansammlung von Schadstoffen an den Grenzen zwischen den Materialien und in der Konsequenz zur Schwächung der Haftung der Masse an den Hohlraumflanken führen.

- *Ähnliche hygrische und thermische Längenänderung*

Obwohl sich die injizierten Bereiche in einer bestimmten Tiefe befinden, sind gerade Prozesse der hygrischen und thermischen Längenänderung oft für injektionsrelevante Schadensphänomene verantwortlich. Somit können auch Abweichungen in diesem Bereich leicht zu einer Schwächung der Haftung der Injektionsmasse in der Kontaktzone führen.

Anforderungen an die Injektionsmasse, die die Nachhaltigkeit der Maßnahme sichern sollen und

eine langfristige positive Wirkung der Injektion erreichen lassen sind:

- Verträglichkeit mit anderen Materialien
- frei von bauschädlichen Substanzen und keine Abgabe von bauschädlichen Neben- bzw. Reaktionsprodukten
- hohe Alterungsbeständigkeit
- hohe Beständigkeit gegenüber Verwitterung
- hohe Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen

Über numerische Grenzen, in denen sich eine angepasste Injektionsmasse bei den physiko-mechanischen Eigenschaften bewegen kann, besteht Konsens. Einige Unterschiede dieser Grenzbereiche zeigt Tabelle 1.

2 Applikationsmethoden

Je nach Hohlraumverlauf, Hohlraumlage und Hohlraumdimension werden sehr unterschiedliche Injektionsmethoden angewendet. Grundsätzlich gibt es drei Vorgehensweisen, die in vielen Modifikationen vorkommen: druckloses Einführen des Stoffes durch die Unterstützung der Schwerkraft, Einpressen der Injektionsmasse durch Druckaufbau und das Einbringen des Injektionsstoffes durch eine Kombination von Druck- und Unterdruckwirkung.

Die Möglichkeit, den Injektionsstoff drucklos durch Gravitation in den Hohlraum fließen zu lassen besteht leider nur in wenigen Fällen. Die Unterstützung der Erdanziehungskraft lässt sich bei einer solchen Injektion nur an senkrechten Flächen anwenden und bei Hohlräumen, die sowohl einen breiteren Eingang aufweisen als auch entsprechend groß dimensioniert sind, sodass die Injektionsmasse ungehindert lediglich infolge der relativ schwachen Kraft fließen kann.

Zum Einbringen der Injektionsmasse kommen unterschiedliche Gießgeräte zum Einsatz. In den meisten Fällen werden je nach Ausdehnung der Hohlräume unterschiedlich große Spritzen benutzt (je nach Breite der Öffnung, mit oder ohne zusätzliche Bestückung in Form von Schläuchen oder Kanülen). Bei kleiner dimensionierten Hohlräumen ist die Verwendung dieser Zusätze vorteilhaft. Die-

Tabelle 1

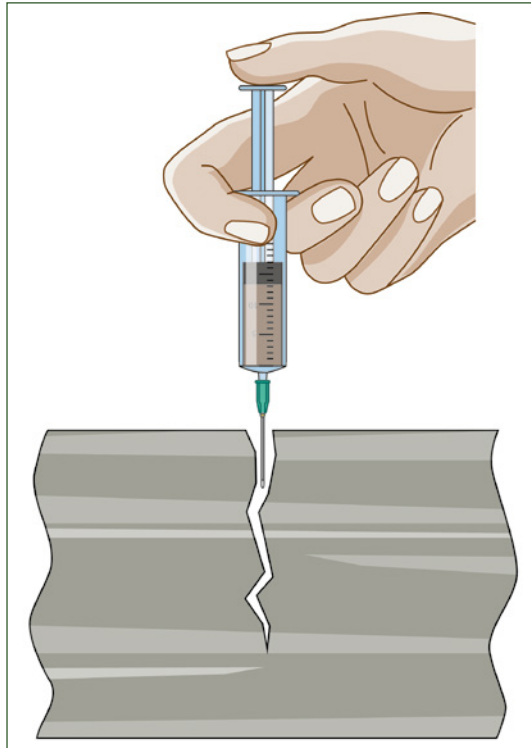
Grenzbereiche spezifischer Kenngrößen von Injektionsmassen

Parameter	nach [Mikos, Schubert, Knöfel, 1993]	nach [Ettl, Sattler, Schuh, 1995]	nach [Snethlage, Wendler, 1996]	nach [Snethlage, 2008]
dynamischer E-Modul	20–100 %		20–60 %	bis 80 %
Feuchtedehnkoeffizient		ca. 100 %		50–100 %
Wärmedehnkoeffizient			50–150 %	50–150 %
Wasseraufnahmekoeffizient	50–100 %		50–100 %	50–100 %
Wasseraufnahmegrad		größer als Substrat		
Wasserdampfdiffusion	50–100 %		50–100 %	50–100 %
Haftzugfestigkeit	0,5...1,0 β_{HZ} , Substrat		0,5...0,8 β_{HZ} , Substrat	0,5...0,8 β_{HZ} , Substrat
Druckfestigkeit	20–60 %		20–60 %	bis 60 %

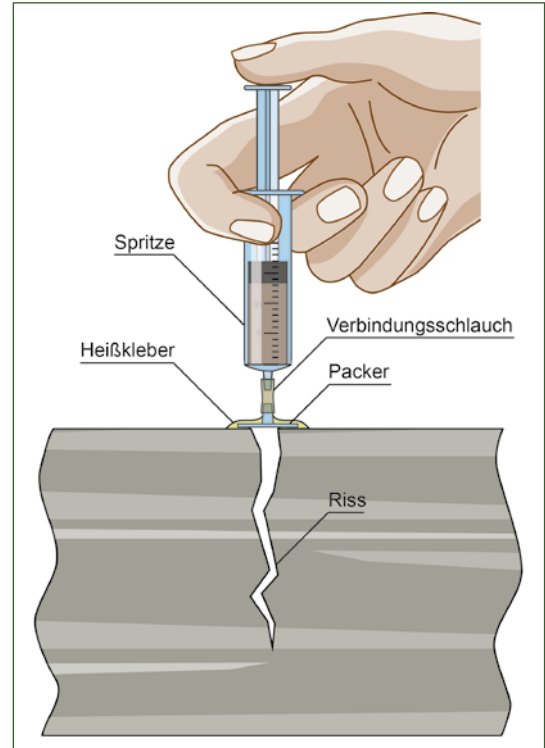
se werden in die Spalte hineingeschoben und ermöglichen dadurch eine tiefere Wirkung (Bild 1).

Eine Modifikation dieser Methode ist die Benutzung kleiner Trichter oder Trinkhalme, die man vor der Injektion an festgelegten Stellen befestigt. Diese Trichter bzw. Trinkhalme werden dann kontinuierlich nachgefüllt, bis die Injektion abgeschlossen ist. Bei sehr schmalen Hohlraumöffnungen, wo sich die Abstände zwischen den Flanken im kapillaren Bereich bewegen, kann ebenso drucklos vorgegangen und die kapillaren Kräfte für das Aufsaugen der Injektionsflüssigkeit genutzt werden. Für den Injektionsmittelantrag sind oft kleine Spritzen mit Kanülen oder kleine spitze Pinsel geeignet. Die Breite der Spalte im kapillaren Bereich bedingt auch die Materialauswahl. Zur Anwendung kommen lediglich relativ niedrigviskose und ungefüllte Injektionsstoffe infrage.

Um eine höhere Eindringtiefe und bessere Verteilung der Injektionsmasse zu erreichen und das Verfüllen nicht nur senkrechter Hohlräume zu ermöglichen, ist das Eindringen des flüssigen Stoffes durch Druckaufbau zu unterstützen. Die Injektionsmasse wird dabei dort, wo der durch den Daumen erzeugte Druck ausreichend ist, entweder einfach mit Spritzen oder bei schwieriger zu durchdringen-

**Bild 1**

Einbringen der Injektionsmasse
mittels Spritzen mit zusätzlicher
Kanüle

**Bild 2**

Einbringen des Injektionsstoffes
mittels Spritze mit zusätzlichen
Packern

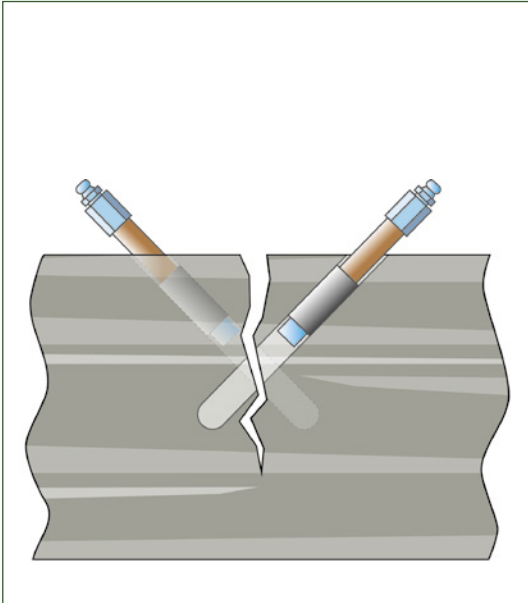
den und komplexeren Strukturen der Hohlräume mithilfe von Pumpen und anderen Injektionsgeräten und -anlagen, die einen höheren Druckaufbau ermöglichen, eingepresst. Da bei dieser Vorgehensweise die Injektionsmasse mit einer gewissen Kraft gepresst wird, erfordert diese Methode die dichte Schließung der Öffnungen in dem zu injizierenden Hohlraumssystem. Entlang der abgedichteten Spalte sind Einfüll- und Entlüftungspunkte zu platzieren. An diesen Punkten werden entweder einfache kleine Schläuche eingeklebt oder Einfüllstutzen, sogenannte Packer, aufgesetzt und abgedichtet. Durch diese Öffnungen wird der flüssige Injektionsstoff eingefügt (Bild 2).

Dabei wird zuerst in den unteren Bereich injiziert, bis die Injektionsmasse an einer anderen höher liegenden Öffnung austritt. Diese Öffnung ist in dem Moment entweder zu verschließen und dient der Kontrolle der erreichten Höhe der Hohlraumverfüllung oder es wird an dieser Stelle eine weitere Spritze angesetzt und weiter injiziert, bis die Injektionsmasse die nächste Öffnung erreicht. In den Fällen, wo der Zugang zu dem Hohlraum erschwert ist, werden meist einige Bohrungen vorgenommen, sodass die geschädigten Bereiche durch Kanäle erreicht und verfüllt werden können. Diese

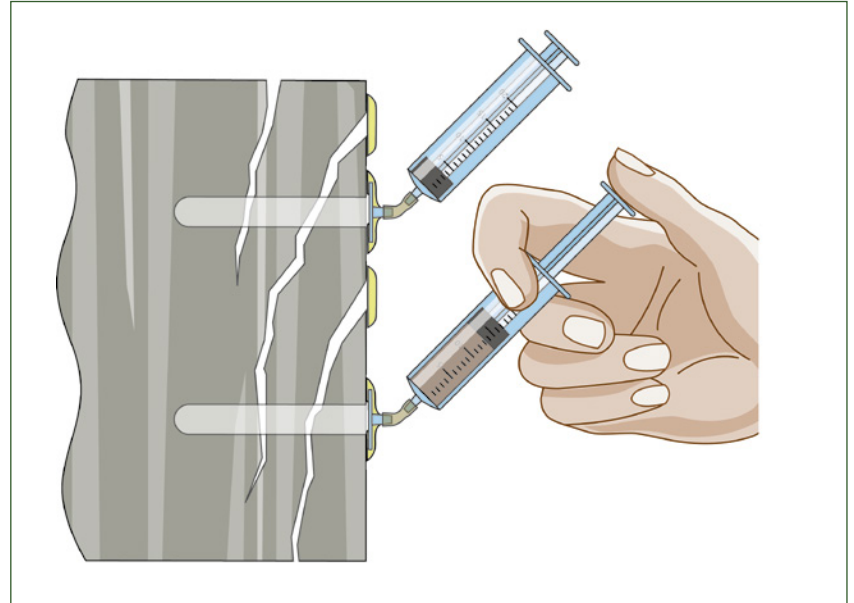
Kanäle werden bei den Rissen entweder direkt entlang der Öffnung gebohrt oder versetzt an den Seiten quer zum Riss (Bild 3).

Bei Schalen, insbesondere wo die Hohlstellen in mehreren übereinander liegenden Schichten vorkommen, erfolgen die Bohrungen senkrecht zur Schichtung (Bild 4). Der Riss wird ebenfalls an der Oberfläche abgedichtet und das Injektionsmaterial über die angebrachten Packer, die entweder direkt auf die Oberfläche geklebt oder in den Kanal eingeführt wurden, in die im Vorfeld entstaubten Injektionskanäle injiziert. Auch bei dieser Modifikation werden die noch nicht verfüllten Kanäle zur Entlüftung und dann entweder zur Kontrolle der Hohlraumverfüllung oder für weitere Injektionen genutzt. Diese Methode ist jedoch nicht zerstörungsfrei und erfordert nach der Injektion eine Schließung der Kanaleingänge. Allerdings sind durch einen verbesserten Zugang zu den Hohlräumen und deren Füllung quer über die Schichtung die Chancen auf eine gute Anbindung der Flanken und eine vollständige Schließung der Spalten verhältnismäßig gut.

Eine weitere Möglichkeit, den Injektionsstoff in die engen Hohlräume einzubringen, ist die Kombination der Druck- und Unterdruckwirkung. Der Aufbau



und die Vorgehensweise ähneln der beschriebenen Methode. Das Rissystem wird gleichermaßen auf der Gesamtlänge geschlossen. Da in diesem Fall auch die Unterstützung des Unterdruckes erwartet wird, ist die genaue Abdichtung von großer Bedeutung. Die entlang der Spalte angebrachten Öffnungen werden ebenfalls mit Packern bestückt. An einigen dieser Punkte sind Spritzen oder auch andere Einfüllvorrichtungen mit Injektionsstoff angebracht. An den anderen werden Vorrichtungen montiert, die einen Unterdruck in dem Hohlraumssystem erzeugen sollen. Meist sind dabei leere Spritzen mit eingedrückten Kolben im Einsatz, die während der Injektion kontinuierlich gezogen werden. Der Unterdruckeffekt ist aber dabei sehr gering. Bei komplizierten Injektionen sind Vakuumpumpen einzusetzen. Der Unterdruckeffekt mindert die Gefahr, dass die geschwächten Gesteinsteile bei der Injektion mit Druck abbrechen. Besonders schwierig erweist sich der Aufbau von Unterdruck in porösen Strukturen, da die durch die Poren strömende Luft den Anstieg des Unterdrucks in den Spalten verhindert. Um den Unterdruckeffekt zu verstärken, wurden Versuche unternommen. Durch das Auftragen von verschiedenen Schichten auf die Oberfläche, z. B. Folien oder Latexüberzüge, sollte zumindest die Außenseite luftdicht geschlossen werden. Auch verschiedene Druckkammern, die auf die zu injizierenden Bereiche angebracht wurden, sind getestet worden. Der nötige Aufwand ist aber dabei enorm groß. Auch



bei dieser Methode ist die Option, einen günstigeren Zugang zu den Hohlräumen durch Bohrungen zu schaffen, möglich.

Bild 3
Verfüllung der Injektionsmasse über Kanäle versetzt an den Seiten quer zum Riss

3 Vorbereitende Maßnahmen und Ablauf der Injektion

Bild 4
Verfüllung der Injektionsmasse über Bohrungen senkrecht zur Schichtung des Gesteins

Die entsprechende Injektionsmethode und die passenden Injektionsmaterialien sind immer in Abhängigkeit von der Gesteinsart, der Art und den Dimensionen der Schadensphänomene sowie dem Zustand des Objektes auszuwählen. Bei allen erwähnten Injektionsmethoden hingegen hat sich, unabhängig von dem zu behandelnden Schadensbild, eine bestimmte Vorgehensweise als sinnvoll erwiesen. Die einzelnen Schritte sind nicht bei jeder Injektionsmethode durchzuführen, allerdings müssen sie unbedingt gewisse Voraussetzung erfüllen:

1. Voruntersuchungen
Für eine exakte Vorbereitung und präzise Durchführung der Injektion ist unabhängig von der ausgewählten Methode eine genaue Untersuchung des Gesteinszustandes und die Feststellung von Größe und Ausbreitung der Hohlräume eine Voraussetzung.
2. Vorfestigung
Bedingt durch die Formveränderung während der Verwitterung sind die unmittelbaren Hohlraumbereiche, besonders bei Schalenbildung,

- meist vorgeschädigt. Auch zeigen einige Flankenbereiche im Hohlrauminneren eine geschwächte Zone. Um ein durchgängiges Festigkeitsprofil zu schaffen, müssen diese Bereiche vorgefestigt werden.
3. Räumung der Hohlräume
In den meisten Spalten befindet sich loses, zerrüttetes Material, das die Anbindung des Injektionsstoffes an die Hohlräume verhindern kann. Diese losen Partikel sollten möglichst vollständig aus dem Hohlraum durch Ausspülen oder Ausblasen entfernt werden.
 4. Isolierung der Öffnungsumgebung
Die Isolierung soll in erster Linie die Verschmutzung der Oberfläche durch Arbeitsmaterialien verhindern, falls der Injektionsstoff trotz sorgfältigen Arbeitens überläuft. Auch das Ablösen der Abdichtung soll dadurch erleichtert werden. Ebenfalls lässt sich so die Bildung von dunklen Höfen, die durch das Eindringen von Bindemittel in die poröse Steinstruktur der Flankenbereiche entstehen können, vermeiden.
 5. Abdichtung der Öffnung
Um das unkontrollierte Austreten der Injektionsmasse ganz besonders bei einem Druckaufbau zu verhindern und um den Unterdruckeffekt erst zu ermöglichen, müssen die Spalten abgedichtet werden. Das geschlossene System der Hohlräume lenkt auch die Injektionsmasse in schmalere Bereiche, ohne dass sie an der Oberfläche austritt. Außerdem ermöglicht die Abdichtung das sinnvolle und präzise Einbringen von Packern, Schläuchen und anderen Anfüllelementen.
 6. Vornässen der Hohlraumflanken
Im Vorfeld der Applikation wird eine Flüssigkeit in die Spalten eingeführt. Je nach verwendetem Injektionsstoff können dies Wasser, verschiedene Lösungsmittel oder auch pures Bindemittel der Injektionsmasse sein. Dadurch wird nicht nur die Wegsamkeit des Hohlraumsystems ermittelt und die Qualität der Abdichtung überprüft, sondern durch die Benetzung der Hohlraumflanken die Penetration der Injektionsmasse verbessert. Auch das übermäßige Abwandern des Binde-, Lösungs- oder Verdünnungsmittels des Injektionsstoffes in die Porenräume wird dadurch verhindert.
 7. Applikation des Injektionsstoffes
In einigen Fällen, bei denen keine eindeutig definierten Hohlräume gebildet worden sind und es lediglich durch eine Zerrüttung des Gesteinsmaterials zu einer Aufspaltung der Struktur gekommen ist, wird eine mehrstufige Vorgehensweise vorgeschlagen, da diese Mürbezonen mittels einer einmaligen Injektion mit herkömmlichen Injektionsmassen kaum verfüllt werden können. In der ersten Phase sind das Lockermaterial und die blätterartige Flanken mit füllstofffreier Masse oder mit einer Masse mit einem sehr feinen Füllstoff, z. B. einem Zusatz von pyrogener Kieselsäure, zu konsolidieren. In der zweiten Phase findet eine Hohlraumverfüllung mit systemgleicher füllstoffhaltiger Masse statt.
 8. Nachbereitung
Die Entfernung der Abdichtung und die Reinigung der Oberfläche sollten möglichst bald nach der Applikation vorgenommen werden. Danach folgt das Schließen der Öffnungen mit einer angepassten Anböschenmasse. Je nach verwendetem Material ist anschließend für ein entsprechendes Klima der Umgebung, das ein vollständiges und gleichmäßiges Ausreagieren sowohl der Injektions- als auch der Anböschenmasse garantiert, zu sorgen.
 9. Nachfestigung
In einigen Fällen wird eine zusätzliche Festigung der injizierten Bereiche empfohlen. Dies soll die Haftung der Injektionsmasse an den Hohlraumflanken verbessern und ein durchgängiges Festigkeitsprofil schaffen.
 10. Kontrolle des Erfolgs/Monitoring
Um eventuelle Nachbesserungen einleiten zu können, sollte unmittelbar nach der Maßnahme und in regelmäßigen Abständen eine möglichst zerstörungsfreie Überprüfung des Injektionserfolges stattfinden, z. B. durch die sogenannte Klangprobe.

4 Injektionsmaterialien

Bei den unterschiedlichen, hoch komplexen und differenzierten Schadensphänomenen muss die Auswahl der passenden Materialien für die durch-

zuführenden Maßnahmen, für die Applikation selbst und für die Nachbereitung möglichst groß sein. Einige dieser Materialien haben sich in der Praxis besonders bewährt. Andere werden immer noch verwendet, sind aber nur in seltenen Fällen zu empfehlen.

Isolierungsmaterialien

Obwohl die Sicherung der Oberfläche des Steines in unmittelbarer Umgebung der Spalte eine wichtige Funktion erfüllt, wird diese Maßnahme in der Praxis eher selten durchgeführt. Die Gründe für den Verzicht auf die Isolierung sind möglicherweise die vielschichtigen und schwer erfüllbaren Anforderungen, die das Material für den Schutz der Oberfläche erfüllen soll. Das Isolierungsmaterial soll einerseits eine weiträumige Isolierung der Umgebung ermöglichen, die in der Injektionsmasse enthaltenen Stoffe abweisen und sogar in die oberste Schicht eindringen. Andererseits muss das Material, da es nur temporär wirken soll, leicht und rückstandslos entfernbar sein. Je nach verwendetem Injektionsmaterial müssen diese Eigenschaften auch entsprechend eingestellt werden. Bei Injektionsmassen, die z. B. Wasser enthalten, darf das Isolierungsmaterial nicht wasserlöslich sein, bei Massen mit organischen Lösungsmitteln muss es ihnen gegenüber beständig sein. Gleichzeitig aber dürfen diese Materialien die Durchführung der Applikation selbst und die der folgenden Maßnahmen nicht behindern.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Materialien getestet und in der Praxis angewendet. Leider erfüllten nicht alle die Anforderungen, waren schwierig in der Anwendung oder hinterließen problematische Rückstände. In den meisten Fällen sind Polyvinylalkohol, Methylzellulose oder Hasenleim verwendet worden. Allerdings eignen sich diese Materialien für die wässrigen Injektionsstoffe nur bedingt, da sie selbst wasserlöslich sind. In der letzten Zeit wurden bei der Isolierung flüchtige Bindemittel eingesetzt. Diese lösen sich aber in den organischen Lösemitteln und sind daher doch nicht universal einsetzbar.

Abdichtungsmaterialien

Auch bei den Materialien, die die Spaltöffnungen verschließen sollen, sind die Ansprüche relativ hoch. Das zur Abdichtung verwendete Material soll sich der Steinoberfläche und den Schalenöffnungen leicht anpassen können sowie dicht und unlösbar gegenüber den Injektionsstoffen sein. Gleichzeitig aber soll es, ähnlich dem Isolierungsmaterial, sich leicht und rückstandslos entfernen lassen.

Zu den ältesten Abdichtungsmaterialien, die in einigen Fällen immer noch Verwendung finden, gehört der Ton. Die Vorteile dieses Materials sind seine sehr gute Plastizität und damit auch seine sehr gute Anpassung an die Unebenheiten der Oberfläche sowie seine niedrigen Kosten. Zu den Nachteilen gehört die schlechte Haftung an der Oberfläche, was die Anwendung bei den Methoden, die mit Druck und Unterdruck arbeiten, ausschließt. Nachteilig ist auch die problematische Entfernung der feinen Materialreste, besonders aus den porösen Oberflächen. Außerdem kommt die Abdichtung mit Ton bei der Verwendung von wässrigen Injektionsmassen nicht infrage. Auch die Schließung mit Japanpapier- oder Gazestreifen gehört zu den früheren Methoden. Die passend zugeschnittenen Streifen aus diesen oder ähnlichen Materialien wurden mit Polyvinylalkohol oder Methylzellulose angeklebt und abgedichtet. Dabei ergaben sich die gleichen Probleme wie bei der Isolierung der Spaltumgebung mit diesen synthetischen Stoffen. Zu den heute am häufigsten verwendeten Materialien gehören Naturkautschuk und verschiedene Silikonmassen. Es wurden auch Versuche unternommen, die flüchtigen Bindemittel als Abdichtungsmaterial einzusetzen. In der Praxis hat sich der Heißkleber (Heißleim, Schmelzkleber) durchgesetzt, der in Form von Klebstoffstangen, sogenannte »Kerzen« oder »Sticks«, als Schmelze mit einer Heißklebepistole aufgebracht wird. Als Schmelzkleber werden verschiedene Kunststoffe, sogenannte Hotmelts, benutzt. Bei den Sticks handelt es sich um Polyethylen (PE) oder Ethylvinylacetat (EVA). Nach Abkühlen der Schmelze erreicht dieser Klebstoff eine sehr gute Adhäsion zur Gesteinsoberfläche und durch sein schnelles Aushärten ist eine zügige Arbeit bei der Abdichtung möglich. Die gute Haftung dagegen erlaubt den Einsatz

auch bei höherem Druck. Die Applikation mit einer handlichen Pistole gestattet das präzise Aufbringen des Klebers auch an schwer zugänglichen Stellen. Ein großer Vorteil des Heißklebers ist, dass die Basisstoffe sowohl im Wasser als auch in organischen Lösungsmitteln unlöslich sind. Damit ist er universal einsetzbar. Gleichzeitig ist er durch Benetzen der unmittelbaren Spaltumgebung mit Wasser oder Ethylalkohol leicht und schonend entfernbar.

Alle erwähnten Materialien zur Abdichtung der Spalten müssen nach der Applikation des Injektionsmörtels entfernt werden. In einigen Fällen sind die Öffnungsbereiche der Hohlräume bereits vor der Injektion mit angepassten Anböschmassen geschlossen worden. Dabei wurden lediglich einige Stellen offen gelassen, in die dann die Injektionsmasse eingeführt wird. Diese Vorgehensweise erspart zwar einige Arbeitsschritte, ist aber nicht bei allen Injektionsmethoden anwendbar. Insbesondere bei porösen Materialien und den dabei angewendeten Anböschmassen mit entsprechenden Eigenschaften ist es problematisch, einen Druck bzw. Unterdruck aufzubauen, ohne dass die Abdichtung aus diesem Material darunter leidet.

Bindemittel der Injektionsmasse

Die Injektionsmassen sind in den meisten Fällen Kompositionen aus verschiedenen Materialien, die in der Masse eine besondere Aufgabe erfüllen sollen. Dazu gehören das Bindemittel, Zuschlagstoff und die rheologischen Additive. Die Hauptkomponente, das Bindemittel, unterliegt ganz besonderen Herausforderungen, da sie für die Eigenschaften der Injektionsmasse ausschlaggebend ist. Bei den Injektionsmassen werden prinzipiell drei Stoffgruppen als Bindemittel verwendet. Zu der Gruppe der mineralischen Bindemittel gehören sowohl hydraulische Bindemittel als auch Systeme, die auf Kalk basieren. Die auf Kieselsäure basierenden Produkte (siliziumorganische Bindemittel) stellen die zweite Gruppe dar. Dazu zählen kolloidale Kieselsäuredispersionen und Kieselsäureesterprodukte (KSE). Die dritte Gruppe bilden die Kunststoffe.

Vor allem in früheren Zeiten wurden verschiedene Zemente als Bindemittel der Injektionsmassen verwendet. Diese wurden oft auch ohne Zuschlagstoff

fe und andere Modifikationen injiziert. Leider gelang es auch bei den modifizierten Materialien selten, die gewünschten Eigenschaften zu erhalten, was in der Konsequenz zu noch größeren Schäden geführt hat. Die Korngrößen von Normzementen liegen bei etwa 100 µm. Damit sind sie nur für größere Abstände geeignet. Seit wenigen Jahren finden in der Steinrestaurierung auch spezielle Zementsuspensionen als Bindemittel der Injektionsmassen Anwendung. Die Zementsuspensionen basieren auf sogenannten Feinst- oder Mikrozementen. Diese sind durch eine spezielle Verfahrenstechnik feinst gemahlene Zemente aus den üblichen Zementrohstoffen mit einem Größtkorn zwischen 6 µm und 16 µm. Dieser Feinheitsgrad erlaubt die Anwendung auch bei sehr schmalen Hohlräumen. In der Praxis werden viele vorkonzipierte Produkte benutzt, wo sie als mineralische Bindemittel deklariert sind. Meistens handelt es sich dabei um hydraulische Kalke, also Kalke, die mit hydraulischen Komponenten gemischt sind, beispielsweise mit Zement, Ziegelmehl oder Puzzolanen.

Im Bereich der Steinrestaurierung, aber vor allem bei der Wandmalerei restaurierung werden häufig Injektionssysteme auf Kalkbasis angewendet. In früheren Zeiten verwendete man dabei Sumpfkalk. Diese sind jedoch aufgrund des unterschiedlichen Wassergehalts schwer zu dosieren, um eine gleichbleibende Qualität zu erhalten. Heute werden vorwiegend pulvrige, trocken gelöschte Kalke verwendet, die Kalkhydrate. Vor einigen Jahren sind neue Produkte auf Kalkbasis entwickelt worden. Um die physiko-mechanischen Eigenschaften von Kalken zu optimieren, wurde z. B. ein Weißkalkhydrat dispergiert. Durch die während des Dispergiervorgangs eingebrachte hohe Scherenergie werden die Kalkagglomerate stark zerkleinert. Die in diesem Vorgang gewonnenen Produkte zeigen sehr gute Eigenschaften, die einen Einsatz als Bindemittel für Injektionsmassen erlauben. Die Anwendung, vor allem bei stark porösen Materialien, wird oft als problematisch beurteilt.

Als Bindemittel der Injektionsmassen, speziell bei Sandsteinen, werden in der Steinrestaurierung gern wässrige Dispersionen hochmolekularer Kieselsäuren verwendet, in denen amorphes Siliziumdioxid kolloidal verteilt vorliegt, die sogenannten

Kieselsole. Die Kieselsäureteilchen besitzen meist eine kugelige Gestalt und ihre Größe schwankt zwischen 10 und 100 nm. Die Abbildung dieser Produkte geschieht durch das Abdampfen der wässrigen Phase. Seit mehreren Jahren werden in der restauratorischen Praxis auch Injektionssysteme angewendet, die auf Kieselsäureester basieren. Dabei handelt es sich um ein mehrkomponentiges System mit speziell eingestellten Kieselsäureesterprodukten und ausgewählten Zuschlagstoffen. Die Injektionen mit diesem System bewährten sich zwar bei vielen Anwendungen, die Zusammensetzung ist aber bereits vorkonfektioniert und somit kaum veränderbar. Auch die Handhabung dieser Injektionsmassen wird von den Restauratoren sehr unterschiedlich beurteilt.

In der Steinrestaurierung werden in der Gruppe der Kunststoffe vor allem Epoxidharze und Acrylharze verwendet. Eher untergeordnet und vor allem bei der Betonsanierung werden auch Polyurethane und ungesättigte Polyesterharze eingesetzt. Die Kunstharze besitzen einen entscheidenden Vorteil. Sie zeichnen sich durch eine sehr hohe Festigkeit aus. Das bedeutet, dass bereits mit kleinen Mengen dieser Bindemittel eine ausreichende Kohäsion der Masse und eine sehr gute Anbindung an die Spaltflanken zu erreichen ist. Zu den Nachteilen gehören die Sperrwirkung der Filme und die problematische thermische Dehnung. Oft werden allerdings die Kunstharze unverdünnt und ohne Zuschlagstoffe injiziert. Die Folgen sind erneute Rissbildungen in nah liegenden Bereichen. Eine der neusten Entwicklungen in dem Bereich sind wässrige Emulsionen und Dispersionen von Epoxidharzen, die viele positive Eigenschaften besitzen und die bereits als Bindemittel für Injektionsmassen verwendet wurden.

Oft wird durch Mischung der Komponenten versucht, die guten Eigenschaften von verschiedenen Bindemitteln miteinander zu verbinden. Zu den bekanntesten und bereits mehrmals angewendeten Hybridbindemitteln in der Steinrestaurierung gehören z. B. hydraulische Kalke, eine Mischung von Kalk und Zement, ein Bindemittelgemisch aus einer kolloidalen Kieselsäuredispersion und einer Acrylharzdispersion, ein Gemisch von wasseremulgierbarem Epoxidharz und kolloidalen Kieselsäuredispersionen sowie eine Verbindung von dispergier-

tem Weißkalkhydrat und einer Acrylharzdispersion. Dabei muss beachtet werden, dass durch das Mischen von mehreren Bindemitteln nicht immer und nicht nur die gewünschten Eigenschaften vereinigt werden. In der Regel entstehen bei den Hybridbindemitteln ganz eigene, sehr differenzierte Eigenschaften, die im Gegensatz zu den Eigenschaften der Ausgangsprodukte stehen können.

Zuschlagstoffe der Injektionsmassen (Füllstoffe)

Durch die Zugabe von Zuschlagstoffen wird versucht, die physiko-mechanischen Eigenschaften der Masse besser an die Eigenschaften des Gesteins anzupassen. Die richtige Wahl ist aber nicht unproblematisch. Grundsätzlich kommt bei den Injektionsmassen nur sehr feines Material als Füllstoff infrage. Dieser senkt zwar in der Regel z. B. die Festigkeit eines Mörtels durch die reduzierte Bindemittelmenge. Gleichzeitig wird jedoch der Wasser- bzw. Lösungsmittelbedarf erhöht, was in der Konsequenz zu einer verstärkten Schrumpfung der Masse führt. Einerseits wird durch Hinzufügen der Zuschlagstoffe eine stabilere Struktur erreicht, andererseits werden dadurch die Fließfähigkeit und die Penetration der Masse in engen Räumen verschlechtert.

Eine Möglichkeit zur Optimierung der Eigenschaften der Injektionsmassen ist eine gezielte Kornzusammensetzung. Oft wird sich dabei an sogenannten Idealsieblinien, z. B. der Fuller-Parabel orientiert. In den meisten Fällen kommt eine Ausfallkörnung-Sieblinie zum Einsatz, die ein höheres Porenvolumen in der Masse erzielen soll.

Traditionell werden als Zuschlagstoffe unterschiedlich konfektionierte Quarz- und Gesteinsmehle verwendet. Dabei sind als Ausgangsmaterialien solche zu wählen, die von der Beschaffenheit dem Gestein am ähnlichsten sind. Oft werden sogar Mehle aus den zu injizierenden Gesteinen hergestellt, um so den Eigenschaften des Gesteins besser zu entsprechen. Die Quarz- und Gesteinsmehle haben meist herstellungsbedingt gebrochene Körner, die zwar die Kohäsion und die Haftung der Masse an der Steinoberfläche verbessern, aber sie beeinträchtigen gleichzeitig das Penetrationsvermögen.

Eines der gern verwendeten Materialien für die Injektionsmassen ist hochdisperse Kieselsäure. Der Durchmesser der Primärteilchen liegt bei den auf diesem Material basierenden Produkten zwischen 7 und 20 nm. Dieser enorme Feinheitsgrad verleiht den flüssigen Systemen mit pyrogenen Kieselsäuren thixotropes Verhalten und gute Absatzstabilität. Allerdings verursacht die damit verbundene riesige spezifische Oberfläche eine starke Erhöhung der Viskosität solcher Systeme, sodass diese Stoffe eher als Verdickungsmittel eingesetzt werden. In der letzten Zeit kommen auch aus Laukophylliten hergestellte Produkte zum Einsatz. Der Zusatz der feinen Mehle aus diesem Gestein ($< 50 \mu\text{m}$), das eine natürliche Verwachsung der Mineralien Muskovit, Quarz und Chlorit ist, vermindert die Rissneigung der Massen und wirkt als Anti-Absetzmittel. Sehr große Vorteile bei der Verwendung als Zuschlagstoffe bieten feine Voll- und Hohlglaskugeln. Infolge der runden Form dieser Produkte mit einer Durchschnittsgröße von ca. $35 \mu\text{m}$ wird die Reibung von flüssigen Systemen während des Fließens stark reduziert. Dadurch werden das Fließverhalten und die Penetration dieser Massen bedeutend verbessert. Bedingt durch die im Verhältnis zum Volumen kleine Oberfläche wird der Bindemittelanteil reduziert, was wiederum das Schrumpfverhalten der Massen optimiert. Die geschlossene Form der Glaskugeln bedingt, dass diese weder das Bindemittel noch das Wasser bzw. Lösungsmittel absorbieren und in ihrer Zusammensetzung stabil bleiben. Die geringe Dichte der Hohlglaskugel hilft auch, das Gewicht der Masse zu verringern. Die runde hohle Form der Kugel verbessert stark die Elastizität der Injektionsmassen.

Additive der Injektionsmassen

Die Zugabe von Additiven dient generell der genauen Einstellung der Materialeigenschaften auf die Bedürfnisse der jeweiligen Anwendung und der Verbesserung der physiko-mechanischen Eigenschaften. Im Fall der Injektionsmassen geht es in erster Linie um Additive, die die Eigenschaften der Massen noch in flüssiger Form modifizieren sollen. Es gibt viele unterschiedlich wirkende Substanzen,

die Verwendung finden, um gezielt einzelne Eigenschaften zu beeinflussen.

Aufgrund dessen, dass ein gutes Penetrationsverhalten eine entscheidende und unverzichtbare Voraussetzung einer Injektionsmasse ist und bereits kleine Mengen von feinen Zuschlagstoffen diese stark beeinträchtigen, wird in erster Linie versucht, diese Eigenschaft zu verbessern. Da die Fließfähigkeit ein Faktor ist, der einen direkten Einfluss auf das Penetrationsverhalten einer Flüssigkeit in einen Hohlraum hat, wird die Viskosität der Injektionsmasse durch die Zugabe von sogenannten *Verflüssigern* herabgesetzt. Die durch diese Zusätze reduzierte innere Reibung der Flüssigkeitsteilchen führt allerdings dazu, dass auch die Zuschlagstoffe nicht mehr stabil in der dispersen Phase vorliegen und sich absetzen können. Durch den Einsatz von *Dispergiernmitteln*, die die Festteilchen in der flüssigen Phase in der Schwebe halten, steuert man dagegen. Um eine präzise Durchführung der Injektion zu ermöglichen, ist es bei einigen Produkten notwendig, die Verarbeitbarkeitszeit zu verlängern. Das erreicht man in den meisten Fällen durch die Anwendung von *Abbindeverzögerern*. Durch die Zugabe von *Luftporen- oder Schaumbildnern* entstehen kugelförmige Luftporen, die den Kapillarttransport von Wasser in flüssiger Form in den Injektionsmassen unterbrechen, ohne den Dampftransport zu beeinträchtigen. Die porenbildenden Zusätze erhöhen auch durch die Bildung größerer Räume in der Struktur der Massen die Beständigkeit gegenüber Frost-Tau und Salzwirkung. Um den erzeugten Schaum, aber auch andere gewünschte Eigenschaften der Masse beständig zu halten, werden *Stabilisatoren* eingesetzt. Die UV-Stabilisatoren schützen z. B. die Kunststoffe gegen die schädlichen Wirkungen von Licht. Um das Abwandern des Binde-, Lösungs- oder Verdünnungsmittels in die kapillaren Strukturen des Steines zu minimieren, kommen *Retentionsmittel* zum Einsatz.

Alle diese Substanzen wirken zwar gezielt in den gewünschten Bereichen, verbleiben aber in der Struktur und beeinflussen auch die anderen Eigenschaften der Injektionsmassen.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

- [Ettl, Sattler, Schuh, 1995] Ettl, H., Sattler, L., Schuh, H., (1995): Konservierung von Sandsteinen mit Kieselgelgebundenen Steinersatzstoffen. In: Snethlage, R. (Hrsg.) (1995): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I. Berlin, S. 105–126
- [Mikos, Schubert, Knöfel, 1993] Miklos, E., Schubert, P., Knöfel, D., (1993): Zur Beurteilung von Steiner-gänzungsstoffen für die Restaurierung von Natursteinoberflächen. In: Knöfel, D.; Schubert, P. (Hrsg.) (1993): Handbuch Mörtel und Steiner-gänzungsstoffe in der Denkmalpflege, Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Fulda, S. 123–146
- [Snethlage, Wendler, 1996] Snethlage, R., Wendler, E., (1996): Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien. In: Snethlage, Rolf (Hrsg.) (1996): Denkmalpflege und Naturwissenschaft – Natursteinkonservierung I, Berlin, S. 3–40
- [Snethlage, 2008] Snethlage, R., (2008): Leitfaden Steinkonservierung: Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmalen aus Naturstein. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart
- Boos, M., Grobe, J., Hilbert, G., Wendler, E., (1997): Steinfestigung. Möglichkeiten und Grenzen im KSE-System. In: Bautenschutz/Bausanierung, Zeitschrift für Bauinstandhaltung und Denkmalpflege, H. 8/97, S. 39–41
- Boué, A., (2002): Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Festigung von verwitterten Kalksteinen – Injektionstechnologie. In: Kalksteinkonservierung am Westportal des Halberstädter Domes St. Stephan und St. Sixtus. Domstiftung Sachsen-Anhalt, Schloss Leitzkau, S. 163–177
- Ettl, H., Schuh, H., (1991): Entwicklung und Erprobung einer Kieselsäureester-gebundenen Injektionsmasse zur Schließung von Rissen und Hinterspritzung von Schalen. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 1991/2, S. 236–245
- Hartleitner, W., (1990): Klebe-Injektionen an Steinskulpturen. In: Arbeitsblätter für Restauratoren, H. 1, S. 222–229
- Koblischek, P. J., (1993): Niedrigviskoses Injektionsharz für Natursteine und Beton. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.) (1993): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, T. 3, Kontakt & Studium, Bd. 420, Expert Verl., S. 1605–1618
- Kozub, P., (2006): Einsatz von wasseremulgierbaren Epoxidharzen für die Restaurierung des Rosengranits von Assuan am Beispiel der Säulenkolonnade von Tell Basta (Ägypten). Dissertation, Logos Verl., Berlin
- Maryniak-Piaszynski, E., (2000): Injektionsmassen auf der Basis von dispergiertem Weißkalkhydrat. Einfluss des Dispergierens auf die physiko-mechanischen Eigenschaften ausgewählter Massen. In: Jägers, E. (Hrsg.) (2000): Dispergiertes Weißkalkhydrat, Petersberg, S. 35–52
- Schuh, H., Ettl, H., Kaiser, E. et al., (1991): Konservierung von Kalksteinen eines Tempels auf Elephantine/Oberägypten. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 5/1991, H. 2, S. 289–297
- Steyer, M., (2007): Werkstattversuche zur Entwicklung einer Applikationstechnik zur Festigung des Schalsteins. In: Institut für Steinkonservierung e. V. (Hrsg.) (2007): Die Konservierung des Heidenportals am Wetzlarer Dom. Neuartige Ansätze zur Erhaltung eines Problemgesteins. Bericht Nr. 27, Selbstverl., Mainz, S. 61–67
- Stürmer, S., (1997): Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerkes unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze. Unveröff. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar
- Wendler, E., (1999): Kieselgelgebundene Steiner-gänzungsmörtel. In: Boué, A. (Hrsg.) (1999): Steiner-gänzung. Mörtel für die Steinrestaurierung. 1. Workshop des Institut für Bauchemie Leipzig e. V., Kloster Nimb-schen, 26. und 27. Juni 1998, Fraunhofer IRB Verl., S. 107–110
- Wendler, E., Hilbert, G., (2006): Schalenbildung bei Naturstein: Mechanismen ihrer Entstehung sowie Möglichkeiten und Grenzen der Konsolidierung. In: Praxisorientierte Forschung in der Denkmalpflege – 10 Jahre IDK. Beiträge der Fachtagung am 19. September 2006. Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V., Dresden, S. 75–82

Zeitmanagement bei der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen

Im Gegensatz zu Neubaumaßnahmen werden in den wenigsten Fällen der Denkmalpraxis zu Instandsetzungsmaßnahmen exakte Bauzeitenpläne erstellt. Meist werden diese nur für umfangreiche Maßnahmen bei größeren Denkmälern erarbeitet. Bei kleineren Maßnahmen oder Wartungs- und Pflegemaßnahmen wird oft darauf verzichtet. Häufig kommt es aber vor, dass schon vor Beginn der Termin der Eröffnung feststeht und gegenüber den Ausführenden als Druckmittel ins Feld geführt wird. Dabei kann es immer wieder zu Überraschungen und damit verbundenen Zeitverzögerungen kommen. Sind es im Frühjahr und Sommer die Populationen seltener Arten, die die Arbeitsweise beeinträchtigen, so kann es gegen Ende des Jahres die Abrechnungsfrist sein. Vielfach werden Zuschussmittel für einen bestimmten Zeitrahmen bewilligt, ohne dabei die Durchführbarkeit aufgrund von Witterung und anderen Umständen zu bedenken.

Otto Wölbert

Schlagwörter: Bauzeitenpläne, Steinkonservierung, Steinfestigung, Sanierung von Natursteinbauwerken, Hydrophobierung, Naturschutz, Herstellerrichtlinien von Konservierungsmitteln, Gesteinsverfügbarkeit, Zielkonflikte, technische Standzeiten, Bautagebuch, Vorbereitung der Maßnahme, Ausschreibung, Vorbereitungszeiten

1 Beauftragung eines Architekten

Von großer Bedeutung ist die Beauftragung eines versierten Architekten, der im Bereich der Instandsetzung bereits Erfahrung besitzt. Ist dies nicht der Fall, kann es unter Umständen zu Überraschungen im Bauablauf führen, die nicht allein Zeit, sondern auch unnötig mehr Geld kosten. Es gehört zur Ausbildung der Architekten, Bauzeitenpläne zu erarbeiten und es gibt von [Snethlage, 1997] einen Leitfa-den zur Steininstandsetzung und dieses Buch will die Zusammenhänge detailliert aufzeigen. Dennoch zeigt die Praxis, dass gerade in diesem Sektor noch Verbesserungen wünschenswert wären. Allzu verlockend sind dabei die im Internet von verschiedenen Herstellern angebotenen Leistungsbeschreibungen, die natürlich nicht allgemeingültig für alle Objekte gelten können, allenfalls als Beispiel. Die konkreten Bedürfnisse müssen am Objekt jeweils neu definiert werden.

Oft wäre es erforderlich, dass der beauftragte Architekt mit den Denkmalschutzbehörden im Vorfeld bespricht, welche Dinge gerade an diesem Objekt denkmalkonstituierend und welche Zeitschichten unabdingbar und unantastbar für den Denkmalwert des Objektes sind. Geschieht dies

erst nachdem aus rein ingenieurmäßiger Sicht die Planung erstellt ist, kann es durchaus zu zeitaufwändigen Diskussionen kommen, wenn z. B. die denkmalrechtliche Genehmigung der Planung ganz oder in Teilen widerspricht. Es besteht großer Bedarf, die Bearbeitungs- und auch technisch erforderlichen Stillstandzeiten für eine Natursteinkonservierung im Sinne von Bauzeitenplanungen an jedem Objekt spezifisch, nach Kenntnis aller Arbeitsschritte, zu planen. Einen der wenigen Überblick zum Umfang der diversen Maßnahmen und zu den Kostenvergleichen sowie zu Standzeiten hat Gräf [2009] mit Erfahrungen aus dem Bereich der evangelischen Kirche Baden-Württemberg verfasst.

2 Naturschutzrecht versus Denkmalpflegemaßnahme

Als besonders aktuell und unter Umständen auch unkalkulierbar in der Planung von Maßnahmen an Kulturdenkmälern stellt sich die Frage nach den naturschutzrechtlichen Aspekten. Wenn z. B. an dem zu bearbeitenden Kirchturm Dolen brüten oder die Schwalben im Maßwerk der Kirche sich eingenistet haben, ohne dass dies dem Planer bekannt war, führt dies in der Regel zu unabsehbaren

Bauunterbrechungen, die in keinem Bauzeitenplan erfasst werden können. Eine im Vorfeld nicht festgestellte Fledermauspopulation kann die Gesamtmaßnahme für eine geraume Zeit lahm legen. So kann es unter Umständen untersagt sein, während der Aufzucht der Fledermaus Gerüste an diesem Bauwerk zu erstellen. Brütende oder mit der Aufzucht beschäftigte Schwalben behindern notwendige Glasrestaurierungsmaßnahmen in einem Maßwerkfenster auf das Äußerste. Sind die Witterungsverhältnisse optimal, so kann die Unterbrechung der Maßnahme nicht nur eine Brut und eine Aufzucht dauern. Unter Umständen folgt dieser Periode auch eine zweite, so dass mit den geplanten Maßnahmen, die im April beginnen sollten, erst im September begonnen werden kann. Oder im Maßwerk oberhalb einer Kircheneingangstür haben sich mehrere Schwalben niedergelassen und ihre Behausungen gebaut. Dies ist im Prinzip für den Stein kein Problem. Es wird durchaus ein Problem, wenn die Treppe des Portals Zentimeter hoch mit Vogelkot beaufschlagt wird. Ein nachträglicher Versuch, am Objekt ein Brett zur Verhinderung der Verschmutzung einzubauen, ist fehlgeschlagen, da es zur Unterbrechung der Fütterung geführt hätte und damit ist diese Hilfsmaßnahme von den Naturschutzbehörden untersagt worden. Ca. 20 Jahre vorher allerdings wurden bei der letzten Generalinstandsetzung dieses Gebäudes sämtliche Nistplätze ohne Einspruch der Naturschutzbehörde entfernt, und dennoch hatten sich innerhalb von kürzester Zeit die Vögel danach wieder am Objekt eingefunden. Es ist wohl auch zu hinterfragen, ob eine Population von wenigen Schwalbenpärchen rechtfertigt, dass sämtliche Gewerke bei der Instandsetzung hinten anstehen müssen. Hier wären sicherlich pragmatische Lösungsansätze wie rechtzeitiges Einschalten der Naturschutzbehörde und rechtzeitige Schaffung von Ausweichmöglichkeiten für die Vögel zu empfehlen.

Es hat oft den Anschein, dass der Schutz seltener Arten sich fast ausschließlich auf Kulturdenkmale bezieht. So werden defekte Fugen, die der Statiker und der Steinmetz unbedingt geschlossen wissen möchten, zu wertvollen Brutareale für seltene Fledermäuse. Bei den Erhaltungsmaßnahmen ist daher diese Population natürlich zu berücksichtigen, jedoch drängt sie die Zeit für eine mögliche Maß-

nahme, die unter Umständen an optimale Witterungsbedingungen geknüpft ist, ins Unkalkulierbare. Ganze Bauabläufe kommen durch solche Unterbrechungen durcheinander und führen nach Ablauf der Schonfrist nicht selten zu übereilt durchgeführten Maßnahmen, die es unter Umständen auch an Qualität zu wünschen lassen. Alle Hersteller von Konservierungsprodukten haben in ihren Verarbeitungsrichtlinien u. a. Temperaturvorgaben verankert, damit ihr Produkt am besten funktioniert und sinnvoll eingesetzt werden kann. Verschiebt sich aber die Maßnahme durch den berechtigten Schutz von seltenen Populationen am Kulturdenkmal, so ist die verbleibende Zeit für die Durchführbarkeit einer Maßnahme ggf. komplett zu hinterfragen. Dabei ist nicht nur der Planer, sondern auch der Anwender, der auf die Einhaltung dieser Temperaturvorgaben der Hersteller achten muss, gefordert. Auch der Aspekt der Gewährleistung spielt bei zu übereilter Abwicklung der Maßnahme nach einer solchen Unterbrechung eine nicht unerhebliche Rolle.

3 Produktverarbeitung und Planungserfordernisse

Gern übersehen werden von unerfahrenen Planern die Angaben der Hersteller, was die notwendigen Zeiten für das Aushärten ihrer Produkte betrifft. Nicht selten sind an Objekten in der ersten Woche Reinigungsmaßnahmen mit dem Dampfstrahler, in der zweiten Woche Festigungsmaßnahmen an den Steinen und in der dritten Woche eine Hydrophobierung durchgeführt worden, ohne dass darüber nachgedacht wurde, dass die chemischen Behandlungen nur auf relativ trockenen Substraten ausgeführt werden dürfen. Entsprechende Mängel in der Ausführung und auch in der Dauerhaftigkeit sind hierbei nicht überraschend. Hier einige kritische Punkte:

- Meist werden sich z. B. bei der Hydrophobierung im Vorfeld weder Gedanken zur Sinnfälligkeit gemacht, noch wird diese durch exakte Untersuchungen untermauert. Der Gedanke der »Vorsorge« wird allzu gern aus den Werbeprospekten übernommen, ohne die Folgen zu bedenken. Eine übereifrig zu früh auf den

bruchfrischen, neu eingebauten Naturstein aufgetragene Hydrophobierung führt nachweislich auch an neuen, gesunden Steinen zu Schäden.

- Es gibt durchaus Fälle in der praktischen Denkmalpflege, bei denen bei Planung einer Konservierungsmaßnahme die Vorgaben der Hersteller für die Verarbeitung ihrer Produkte ignoriert werden. So wird beispielsweise vom Planer und Bauleiter häufig darauf gedrängt, sofort nach der Festigung Antragsmaßnahmen durchzuführen, ohne zuzulassen, dass der Festiger aushärten bzw. die anfängliche Hydrophobie sich wieder abbauen konnte.
- Sind bei den Herstellerangaben Vorgaben formuliert, wie z. B., dass der Untergrund für eine Festigung staubfrei und trocken sein soll, so ist dies sicher nicht erfüllt, wenn bereits acht Tage nach einer intensiven Dampfreinigung der Naturstein mit Kieselsäureester gefestigt wird. Es ist in den letzten Jahren durchaus häufig vorgekommen, dass sich die Hydrophobie durch die Festigungsmaßnahme nicht in dem vom Hersteller formulierten Zeitraum abbaut. Stattdessen waren die Flächen über viele Wochen noch hydrophob und konnten nicht weiter bearbeitet werden. Dieses Phänomen ist im Grund vorab nicht kalkulierbar. Viele Anwendungsfehler passieren durch Ignorieren oder in Unkenntnis dieser Vorgänge.
- Nicht selten werden kurz nach einer Festigung die Fugen erneuert und überraschenderweise lässt die Flankenhaftung dieser Mörtel zu wünschen übrig. Schnelligkeit der Maßnahme ist kein Kriterium der Qualität. Zur Qualität gehören Präzision und das Respektieren materialbedingter Vorgaben.
- Wenn kalkuliert ist, dass eine Reinigung z. B. an einem hoch empfindlichen Objekt mit einem Laser in 400 Stunden erfolgen kann, so bedeutet das nicht, dass diese 400 Stunden an einem Stück abgearbeitet werden können. Aufgrund der Schwierigkeit der Maßnahme ist von einer weitaus geringeren Tagesleistung auszugehen als die üblichen 8–10 Stunden. Kürzere Tagesarbeitszeiten müssen hier also berücksichtigt werden, da die Konzentration für solche Arbeiten kaum über 8–10 Stunden aufrechterhalten werden kann.

4 Natursteinersatz

Werden Erhaltungsmaßnahmen mit bestimmten Gesteinstypen geplant, so wird häufig die Verfügbarkeit dieser Natursteine unterschätzt. Kommt es bei einer Maßnahme zu größeren Auswechslungen und werden auch großformatige Natursteine benötigt, sind diese nicht selbstverständlich sofort und gleich verfügbar. Unter Umständen muss dieses Material an einer bestimmten Stelle im Steinbruch erst abgebaut und nach den Erfordernissen (vor-)formatiert werden, bevor die Lieferung erfüllt werden kann. Zum Qualitätsmanagement beispielsweise der in Baden-Württemberg ansässigen Bauhöfen gehört auch, dass Steinlieferungen im Vorfeld exakt definiert werden und ganz bestimmte Ansprüche an das ein oder andere Stück formuliert werden. Dabei ist es natürlich auch zu akzeptieren, dass man eine geraume Zeit einplant, bis das benötigte Material in der gewünschten Qualität zum Abbau ansteht und geliefert werden kann. In der Regel sind die geforderten Stücke keine Standardprodukte sondern »Einzelfertigungen«. So gibt es durchaus für bestimmte Arbeiten, z. B. für die Kopie einer überlebensgroßen Figur, Verzögerungen allein dadurch, dass das gewünschte Material nicht zur Verfügung steht. Unter Umständen müssen zuerst neue Areale im Steinbruch erschlossen werden, bis die Lieferung erfüllt werden kann.

5 Archäologie

Werden bei einer Instandsetzungsmaßnahme Erdarbeiten notwendig, so kann es in vielen Fällen notwendig sein, dass archäologische Belange berücksichtigt werden müssen. Wenn dies erst beim Aushub beachtet wird, ohne dass sich der Planer im Vorfeld mit dieser Notwendigkeit auseinandergesetzt hat, wird es zwangsweise Verzögerungen geben. Oft wird diese Unterbrechung dann gern der Denkmalpflege und ihrer Archäologie zugeschrieben.

6 Vorbereitung der Maßnahme

Zur ordentlichen Vorbereitung einer Maßnahme gehört ebenfalls, dass der Planer bzw. der Koordinator der notwendigen Voruntersuchungen alle Beteiligten über die Besonderheit des Kulturdenkmals und die denkmalkonstituierenden Merkmale des Objektes informiert, »Sanierungsziele sind oft bei Maßnahmenbeginn unbekannt« oder sie müssen durch parallel laufende Schadensanalysen erst erarbeitet werden. Außerdem müssen vorher die Zeiträume für Voruntersuchungen eingeplant werden. Realistische Zeiten für große Bauwerke sind hier 2–3 Monate nach der Beauftragung der Gutachter bis zum Ergebnis. Darüber hinaus sind die Rahmenbedingungen, welche die Denkmalpflege setzen muss, allen Beteiligten bekannt zu geben. Gut über das Denkmal informierte Spezialisten erarbeiten in der Regel auch denkmalgerechte Lösungen. Dies kann dann schon bei der Art der Untersuchung – zerstörungsfrei oder zerstörungsfähig – beginnen. In jedem Fall sollten alle Untersuchungen objektbezogen auf notwendige Maßnahmen hin abgestimmt sein.

Da jeder Eingriff in ein Kulturdenkmal genehmigungspflichtig ist, betrifft dies auch Probeentnahmen, seien sie auch noch so klein. Dabei ist es von großer Bedeutung, dass alle Beteiligten an der optimierten Fragestellung zu dem Objekt mitwirken und die erforderlichen technischen und naturwissenschaftlichen Untersuchungen gezielt eingesetzt werden. Auch diese Untersuchungen benötigen Zeit – auch für Genehmigungsanträge – und sind bereits im Vorfeld der Maßnahme durchzuführen und nicht erst, wenn mit der eigentlichen Maßnahme schon begonnen wurde.

7 Bautagebuch – Dokumentationsanforderungen

Vielfach sucht man in den Ausschreibungen für Natursteinrestaurierungen nach der Position Dokumentation oder Bautagebuch. Sie werden häufig als überflüssig und zu teuer angesehen. Es bleibt

jedoch festzuhalten, dass die Dokumentation Teil der Maßnahme selbst ist und daher von der Denkmalpflege eingefordert wird. Dies geschieht in der Regel in Form einer Auflage in der denkmalrechtlichen Genehmigung, die der Eigentümer bzw. dessen Architekt erhält. Natürlich sind diese und andere Auflagen dem Auftragnehmer und allen beteiligten Personen zur Kenntnis zu geben bzw. schon in die Leistungsbeschreibung aufzunehmen und zu honorieren. Nur mit einer exakt erstellten Dokumentation sind die Leistungen nachprüfbar und nachvollziehbar. Dies ist nicht nur für den Bauleiter gedacht, sondern muss als Nachweis für die Eigentümer und Geldgeber angesehen werden. Darüber hinaus heißt es in den Erläuterungen zum Denkmalschutzgesetz, dass »die Dokumentation eine fachlich anerkannte Form der Erhaltung des Denkmalwertes (Zeugniswertes) des Kulturdenkmals ist« [Strobl, Sieche, 2010].

8 Ausschreibung und Vergabe

Es ist schon sehr verwunderlich, wenn jüngst in einem Staatsanzeiger eine Konservierungsmaßnahme an Naturstein ausgeschrieben wird, die an 2000 qm Fläche in der Zeit von Mitte Oktober 2014 bis Ende Februar 2015 durchgeführt werden soll. Sicherlich wäre die Anzahl der Arbeitstage für die Durchführung der Maßnahmen ausreichend. Aber ob im Winter die richtigen Temperaturen dafür bestehen, ist mehr als fraglich. Sicherlich wird das Interesse an dieser Winterarbeit groß sein und Firmen, die auf dieses Problem hinweisen, werden wohl kaum berücksichtigt. Eine weitere Ausschreibungsproblematik besteht im angeblichen Zwang der öffentlichen Ausschreibung, ohne die tatsächlichen Möglichkeiten der Vergabe auszunutzen, sei es aus Unkenntnis, sei es aus Bequemlichkeit. Vielfach sind die Anbieter gezwungen, ohne Gerüst oder exakte Bauunterlagen wie beispielsweise eine Schadenskartierung zu kalkulieren. Dies führt in der Regel zu Zeitverlusten, wenn Arbeiten nicht erfasst, nicht finanziert und nicht genehmigt sind. In diesem Fall wird jeder Bauzeitenplan schnell und unweigerlich zu Makulatur!

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

- [Gräf, 2009] Gräf, U., (2009): Renovierungen an Steinkirchen: langfristige Aussichten von Konservierung und Erneuerung an Sandsteinfassaden. In: Natursteinsanierung Stuttgart, 2009 – Neue Natursteinrestaurationsergebnisse und messtechnische Erfassungen. Hrsg.: Patitz, G., Grassegger, G., Wölbert, O., Fraunhofer IRB-Verlag
- [Snethlage, 1997] Snethlage, R., (1997): Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB-Verlag
- [Strobl, Sieche, 2010] Strobl, H., Sieche, H., (2010): Denkmalschutzgesetz für Baden-Württemberg, Kommentar und Vorschriftensammlung, Kohlhammer Verlag Stuttgart.
- Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften, 2005, Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 156, 2005, Heft 1, Geowissenschaften und Denkmalpflege – Bauwerkskartierung, Natursteinverwitterung, Konservierungsstrategien, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2005
- Auras, M., Meinhardt, J., Snethlage, R. (Hrsg.): Leitfaden Naturstein – Monitoring, Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien, Fraunhofer IRB-Verlag, 2011
- Wölbert, O.: Baudenkmäler aus Naturstein in Baden-Württemberg. Ein Überblick über die Probleme und die Möglichkeiten in der Natursteinrestauration, S. 11–18. In: Grassegger, G., Werner, W. und Wölbert, O., 2009 (Hrsg.): Die Naturwerksteinvorkommen in Baden-Württemberg und ihr Einsatz für Denkmalpflege, Technik und Architektur, Arkus 2009, ARKUS-Tagung in Baden-Württemberg, Tagungsband zur ARKUS-Tagung 2009 am 29.10.2009 in Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag
- Gossow, V.: Baubetriebspraxis, Leitfaden für die Bauausführung. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1998
- Proporowitz, A. (Hrsg.): Baubetrieb – Bauverfahren, Carl Hanser Verlag München, 2008
- ICOMOS: Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Imhof Verlag, Petersberg, 2010
- Thüringisches Landesamt für Denkmalpflege, 2001 (Hrsg.): Qualitätssicherung in der Steinkonservierung. E. Reinhold Verlag Altenburg, 2001

Steinergänzungsmörtel

Schäden an Natursteinoberflächen können mit unterschiedlichsten Steinergänzungsmörteln überarbeitet werden. In diesen Mörtelsystemen kommen mineralische Bindemittel, Kunststoffe oder Kieselsäureester (KSE) als Bindemittel zum Einsatz. Für die genannten Bindemittelarten sind vor der Mörtelrezeptierung jeweils spezifische Abstimmungen der Anteile an Gesteinskörnungen und spezieller Feinstoffe erforderlich. Für die Einstellung relevanter Mörtel Eigenschaften müssen Zusammenhänge zwischen Mörtelbestandteilen und erreichbaren Kennwerten genutzt werden. Außerdem sind die Eigenschaften der Natursteinuntergründe und Auswirkungen besonderer Belastungen und Beanspruchungen auf die Ergänzungsmörtel im Einbauzustand zu berücksichtigen. Die Anwendung der Mörtel erfordert immer spezielle Vorbehandlungen der Natursteinuntergründe. Einige dieser Kenntnisse und orientierende Hinweise für Rezeptierungen werden zusammengestellt.

Hans-Werner Zier

Schlagwörter: Natursteinrestaurierung, Steinergänzungsmörtel, Steinergänzung, Bindemittel, Mörtel, Zement, Kalk, Acrylatdispersion, Reaktionsharz, Kieselsäureester, Herstellung von Steinergänzungsmörteln

1 Allgemeine Anforderungen an Steinergänzungsmörtel

Natursteinschäden an Bauwerken (Werkstein oder Bauzier) und an Kunstgut können bereits während der Bearbeitung, bei der Verarbeitung, während der Nutzung und/oder durch die Verwitterung entstehen. Ausbesserungen dieser Schäden sind dann durch Steinaustausch mit den gleichen bzw. sehr ähnlichen Natursteinen und/oder mit geeigneten Mörteln möglich.

Bei Ausbesserungen mit Mörteln sind an den Objekten sehr unterschiedliche Qualitäten der Ausführung anzutreffen. Es reicht vom groben Verschluss der Fehlstellen zur ausschließlichen Wiederherstellung der Steinoberflächen bis hin zu filigranen Anpassungen der Oberflächenstrukturen einschließlich der farblichen Retusche mit dem Ziel der weitestgehenden Herstellung der ursprünglichen optischen Erscheinung.

Für Steinergänzungsmörtel sind auch Bezeichnungen wie Steinersatzstoffe, Steinersatzmassen oder Restauriermörtel [Snethlage, 2003] gebräuchlich.

Neben den Mörteln für die Wiederherstellung der Natursteinoberflächen können vorbereitende Behandlungen der Steinoberflächen wie Vorfestigun-

gen, Grundierungen, Aufträge von Haftvermittlern o. ä. und Nachbehandlungen der bereits strukturell angepassten Mörteloberflächen wie Retuschen, Nachfestigungen o. ä. erforderlich werden. In derartigen Fällen ist die Bezeichnung Steinergänzungsmörtelsystem zutreffender. Die Anwendung reicht von kleinflächigen Ausbesserungen von wenigen mm² bis hin zu mehreren m² großen Flächen [Seifert, Zier, 1999].

Die Erfahrungen im Umgang mit den genannten Mörtelsystemen der vergangenen Jahrzehnte flossen in das WTA-Merkblatt 3-11-97: Steinergänzung mit Restauriermörteln/Steinersatzstoffen – ein. Neben einer allgemeinen Übersicht zur Materialauswahl und zu den Mörtelsystemen werden in diesem auch Hinweise zu vorbereitenden Maßnahmen und zur Antragung der Mörtel gegeben. Als relevante Eigenschaften, die Mörtelsysteme für die Steinrestaurierung erfüllen müssen, sind E-Modul, Druckfestigkeit, kapillare Wasseraufnahme, Wasserdampfdurchlässigkeit, thermische und hygrische Dehnung genannt.

Orientierende Angaben für anzustrebende Eigenschaften von Restauriermörteln bezogen auf die der Natursteinuntergründe sind in [Snethlage, 2003] enthalten. Für den Verbund zwischen Natursteinoberfläche und Mörtel sollen z. B. Haft-

zugfestigkeiten zwischen 0,2 und 1,0 N/mm² ausreichen. Unter Umständen sollen auch Haftzugfestigkeiten von 0,1 N/mm² genügen.

Vor der Applikation von Restauriermörteln müssen Informationen zu den Ursachen der Schadstellen, Natursteineigenschaften und Belastungssituationen vorliegen. Daraus abzuleiten sind notwendige vorbereitende Maßnahmen der Mörtelapplikation wie Salzreduktion, Festigung der Oberflächen, ggf. Zurückarbeiten stark geschädigter Teilbereiche, ggf. Vorbereitung von Armierungen oder Ankern sowie Festlegungen zu möglichen und notwendigen Schichtdicken der Antragsungen. Die Auswahl des konkreten Mörtels ist vom Vorliegen dieser Informationen abhängig. Sollten keine oder nur geringe Retuschen erfolgen, muss zusätzlich ein hohes Maß der Anpassung des Mörtels an die Struktur und Farbigkeit der angrenzenden Steinoberflächen möglich sein. Neben den Mörteln zur Steinrestaurierung müssen ggf. gleichzeitig Grundierungen, Haftmittler oder Lasuren für Retuschen ausgewählt werden. Diese müssen untereinander verträglich und erprobt sein.

Nach Zusammenstellungen von [Snethlage, 2003] und [WTA-Merkblatt 3-11-97] können als Bindemittel in Steinrestauriermörteln gemeinsam mit oder anstelle von mineralischen Bindemitteln (Kalke, Zemente, Calciumsulfatbinder) auch Reaktionsharze (Polyurethanharz, Epoxidharz, Polyesterharz, Acrylharz), Kunststoffdispersionen (Acrylatdispersionen), in organischen Lösungsmitteln gelöste Kunststoffe, Kieselsäureester und Kiesole eingesetzt werden.

Für die strukturelle und farbige Grundeinstellung der Mörtel muss neben der Bindemittelauswahl eine Auswahl von Gesteinskörnungen und -mehlen nach Sieblinienanforderungen, Farbigkeiten und Kornformen und ggf. Pigmenten erfolgen.

2 Bindemittel in Steiner-gänzungsmörteln

2.1 Mineralisch gebundene Mörtel

Beginnend in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden auch die damals neuen Bindemittel

(Romanzemente, Portlandzemente) für Steinreparaturen im Sinne von Ergänzungen verwendet [Weise, Zier, 2012]. Die Anwendung von Portlandzementen als alleiniges Bindemittel in Mörteln für die Steiner-gänzung reicht bis in die Gegenwart [Hopp, Zier, 2007].

Schadensursächlich bei der Verwendung ausschließlich hydraulisch gebundener Mörtel sind häufig sehr hohe Festigkeiten der Ergänzungsmörtel, eine sehr dichte Mörtelmatrix, starkes Schwinden durch hohe Bindemittelgehalte oder unzureichende bzw. ohne zusätzliche Modifizierungen nur schwer realisierbare Abstimmungen der Rezepturen auf die Steineigenschaften [Nimmrichter, 1997].

Eine bessere Aussteuerung der Mörtel-eigenschaften wird durch den Einsatz von Mischungen unterschiedlicher Bindemittel oder einer Modifizierung [Zier, Weise, 1989], [Zier, 2013], [Mikos, 1999] möglich. Häufig werden Mischungen aus Zementen und Kalkhydraten als Bindemittel eingesetzt.

Für die Rezeptierung von mineralisch gebundenen Steiner-gänzungsmörteln können Zusammenhänge zwischen Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen und den Bindemittelanteilen in Kalk-Zement-Mörteln und erreichbaren mechanischen Eigenschaften, die ursprünglich für Putze ermittelt wurden [Zier, Weise, 1989], verwendet werden. Die angegebenen und zuvor experimentell ermittelten Berechnungsansätze sind auch für eine orientierende Bewertung von Werkstattansätzen oder empirisch hergestellten Mustern von Steiner-gänzungsmörteln geeignet. Für eine weitere Optimierung und die Einstellung zusätzlicher Eigenschaften (Verbesserung des Haftverbundes, Eintrag von Luftporen oder Einstellung des Wasseraufnahmevermögens) sind Modifizierungen über weitere Zusätze möglich [Zier, 2013].

Ein spezielles Entwurfsverfahren für Steiner-gänzungsmörtel [Mikos, 1999] geht von Stoffraumrechnungen über die Volumenanteile von Bindemitteln, Wasser, Luft sowie natürlichen und künstlichen Gesteinskörnungen aus. Experimentell ermittelte Zusammenhänge zwischen Mischungszusammensetzungen und verschiedenen Mörtel-eigenschaften dienen zur Berechnung der Mörtelrezepturen.

Nach eigenen Erkenntnissen kann der Mindestbindemittelleimbedarf für mineralische Mörtel und auch für Mörtel mit anderen Bindemitteln über das Lückenvolumen von Gesteinskörnungsgemischen, die zum Einsatz kommen sollen, orientierend bestimmt werden. Dazu wird ein Messbecher mit definiertem Volumen bis zum Rand mit der Gesteinskörnung gefüllt (in Anlehnung an Bestimmungen der Schüttdichte) und anschließend vorsichtig mit Wasser aufgefüllt. Durch Wägung der einzelnen Füllungen, abzüglich der Masse des Behältnisses, können unter Berücksichtigung der Volumina orientierend die Mindestbindemittelleimmengen abgeschätzt werden. Für Steinergänzungsmörtel ist dann eine Erhöhung der Mindestbindemittelleimmengen bis zum Erreichen einer verarbeitbaren Konsistenz erforderlich. Unter Anwendung der in [Zier, Weise, 1989], [Zier, 2013] und [Mikos, 1999] erwähnten Zusammenhänge können erreichbare Mörtелеigenschaften bereits während der Abstimmung der Frischmörtel abgeschätzt werden.

Vor oder zeitgleich mit den Optimierungen muss die Bindemittelauswahl erfolgen. Die mechanischen Eigenschaften von dichten zementhaltigen Mörteln und Mörteln, die Zement und Kalkhydrat (Qualität CL 90) als Bindemittel enthalten, werden durch die Zementart, die Festigkeitsklasse des Zementes, den Zementgehalt im Mörtel und den Wasser/Zement-Wert im verarbeitungsgerechten Frischmörtel beeinflusst. Gleichzeitig bestimmt die Eigenfarbe des Zementes die spätere Farbigkeit bzw. den Farbton des Ergänzungsmörtels mit.

Bei der Auswahl des Kalkes sind zusätzliche Randbedingungen zu berücksichtigen. Wenn höhere Sulfatbelastungen in den Untergründen, auf die der Mörtel aufgetragen werden soll, vorliegen, darf kein Dolomitskalk als Bindemittel verwendet werden [Zier, Seifert, 2003]. Bei der Verwendung von natürlich hydraulischen Kalken ist zu berücksichtigen, dass beträchtliche Nachverfestigungen [Zier et al., 2007] auftreten und langzeitige Nachbehandlungen für eine gleichmäßige Festigkeitsausbildung notwendig werden können. Letzteres gilt besonders beim Einsatz in Mörteln für dünnsschichtige Anstrichen.

Bei der Auswahl geeigneter Gesteinskörnungen sind ebenfalls verschiedene Faktoren zu berücksichtigen.

Häufig wird davon ausgegangen, dass durch das Brechen und ggf. auch Mahlen eines Natursteins, der mit dem zu ergänzenden Stein identisch oder ähnlich ist, die beste Anpassung an den Bestand möglich wird. Zu bedenken ist dabei, dass die Natursteine beim Zerkleinern nicht an den Korngrenzen brechen und immer Körner mit sehr großer Oberfläche und z. B. bei vielen Sandsteinen auch teils mit hoher Saugfähigkeit entstehen. Mit der Feinheit der Körnungen und der Vergrößerung der Kornoberflächen bei Brechprodukten vergrößern sich die spezifischen Oberflächen stark und damit erhöht sich der Bindemittelleimbedarf beim Einsatz in Mörteln. Daraus ergeben sich wiederum Veränderungen bei den erreichbaren Mörtелеigenschaften. Für mineralisch gebundene Mörtel sind aus den genannten Gründen gerundete Gesteinskörner mit geringer Wasseraufnahme besser geeignet als Brechsande.

Bei Mörtelanpassungen wird häufig von Kornverteilungen ausgegangen, die dichte Strukturen im Mörtel ergeben. Erfahrungen zeigen, dass auch Abweichungen von stetigen Sieblinien bei Gesteinskörnungen für spezielle Mörtelanpassungen gut oder sogar besser geeignet sein können.

Bei der Grundabstimmung des Mörtels müssen die Anteile der Mörtelausgangsstoffe so abgestimmt werden, dass sowohl eine hinreichende strukturelle Anpassung des Festmörtels an die Bestands-oberfläche des Natursteines möglich wird als auch die wesentlichen Eigenschaften des Mörtels auf den Bestand abgestimmt werden. Zu berücksichtigen ist, dass durch Anwitterung eine Oberflächenveränderung des Mörtels erfolgen kann und daraus sich eine Veränderung der optischen Erscheinung ergibt.

Für Pigmentierungen von Ergänzungsmörteln sind reine Oxidpigmente von Vorteil. Erdfarben und gebrannte Erdfarben können den Wasseranspruch im Frischmörtel erhöhen und mit Mörtelbestandteilen reagieren. Beides wirkt sich auf die Mörtелеigenschaften stärker aus als reine Oxidpigmente, wenn untereinander vergleichbare Mörtelfarbigkeiten angenommen werden.

Mineralisch gebundene Mörtel für die Steinergänzung werden auch industriell hergestellt und kon-

fektioniert angeboten. Neben den genannten Bindemitteln werden modifizierende Zusätze (Wasserrückhaltemittel, Mittel zur Einstellung der Wasseraufnahme, Haftverbesserer u. ä.), die auch bei der Trockenmörtelherstellung für Putze üblich sind, eingesetzt. Die industriell hergestellten Produkte werden in unterschiedlichen Eigenschaften (Festigkeiten, Größtkorn der Gesteinskörnungen, Modifizierungen, Farbigkeiten) angeboten. Die Eignung für die Anwendung an konkreten Natursteinoberflächen ist in jedem Fall vor dem Einsatz zu prüfen und ggf. zu erproben.

2.2 Kunststoffgebundene Mörtel

Kunststoffdispersionen und Reaktionsharze werden seit längerer Zeit in der Natursteinrestaurierung eingesetzt. Beispielsweise beginnt in Thüringen ihre Anwendung für die Festigung von Natursteinen und in Ergänzungsmörteln in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts [Staemmler, 1999].

Systematische Entwicklungen von Rezepturen für kunststoffgebundene Ergänzungsmörtel auf der Basis von Acrylatdispersionen als alleiniges Bindemittel beginnen etwa ab 1994 [Zier, 1999] auf der Grundlage bereits vorliegender Erfahrungen von Restauratoren mit empirisch angesetzten Mörteln. Es folgten Weiterentwicklungen des genannten Systems mit umfangreichen Untersuchungen zur Auswahl von Dispersionen, Gesteinskörnungen, Gesteinsmehlen und Kornzusammensetzungen. Dabei wurde festgestellt [Hopp, Zier, 2007], [Zier et al., 1999] und [Seifert, Zier, 2001], dass mit Acrylatdispersionen als alleinigem Bindemittel die Mörtel Eigenschaften in einem breiten Spektrum – z. B. Druckfestigkeiten bis etwa 8 N/mm² – einstellbar sind. Auch bei diesem System ist zu berücksichtigen, dass vor dem Einsatz Rezepturoptimierungen vorgenommen werden müssen oder geeignete Varianten aus erprobten Mörteln auszuwählen sind.

Acrylatgebundene Mörtel enthalten spezielle Dispersionen, gezielt abgestufte Gesteinskörnungen (bevorzugt naturgerundete Körnungen, dichte feine Brechsande und ggf. Gesteinsmehle) und Kaolin. Das Kaolin in dem System bildet gemeinsam mit

der Dispersion einen im Frischmörtel filmartig verteilten Bindemittelleim. Der Gehalt an Kaolin bestimmt im Festmörtel die Haftzugfestigkeit an Natursteinuntergründen und den Diffusionswiderstand.

In der Vergangenheit wurden Dispersionen als Bindemittel im Mörtel immer abdichtende Wirkungen nachgesagt und angenommen, dass diffusionsdichte Mörtel entstehen. Diese Meinung war prinzipiell richtig. Durch die Auswahl geeigneter Dispersionen und Optimierungen von Rezepturen sind heute auch sehr diffusionsoffene Mörtel herstellbar. Z. B. sind mit Kalkmörteln vergleichbare Wasserdampfdiffusionswiderstandswerte von $\mu < 10$ erreichbar [Zier, 2013].

Für die Auswahl von Pigmenten gelten die gleichen Randbedingungen wie bei den mineralischen Mörteln. Bei dunklen Farben mit hohen Pigmentzugaben muss ein Abgleich mit den Anteilen anderer Rezepturbestandteile (Kaolin, Gesteinsmehle) erfolgen.

Durch die Abstimmung verschiedener acrylatgebundener Mörtel, die an konkrete Steinmaterialien und Schadsituationen angepasst sind, können bei guter handwerklicher Ausführung sehr hohe Restaurierungsqualitäten erreicht werden [Groll, 2001]. Da die Rezepturen sehr fein abgestimmt sind, werden sehr hohe Anforderungen an die Einhaltung der Vorgaben gestellt. Diese können unter Baustellenbedingungen nur schwer realisiert werden. Inzwischen werden deshalb auch diese Mörtel konfektioniert angeboten.

Reaktionsharze (EP-, PU- und Polyesterharze) als Bindemittel in Ergänzungsmörteln müssen vor der Anwendung in Bezug der Erreichbarkeit klebfreier Oberflächen und einer ausreichenden UV-Beständigkeit ausgewählt werden. Bei massigeren Anstrichen sind die Glasübergangstemperaturen, bei deren Erreichen Entfestigungen unter Nutzungsbedingungen an Fassaden (außen z. B. zwischen –20 und +80 °C bei dunklen Gesteinen) auftreten können, zu berücksichtigen. Eine Abstimmung auf Steineigenschaften und -oberflächen erfordert ebenso wie bei den anderen Systemen die Optimierung der Zusammensetzung der Gesteinskörnung

gen (Sieblinie, Gesteinsarten, Kornformen) sowie der Bindemittelmengen. Die reaktionsharzgebundenen Systeme bieten bei Erfüllung der genannten Randbedingungen Vorteile bei der Herstellung von Ergänzungsmörteln für sehr dichte und feste Gesteine.

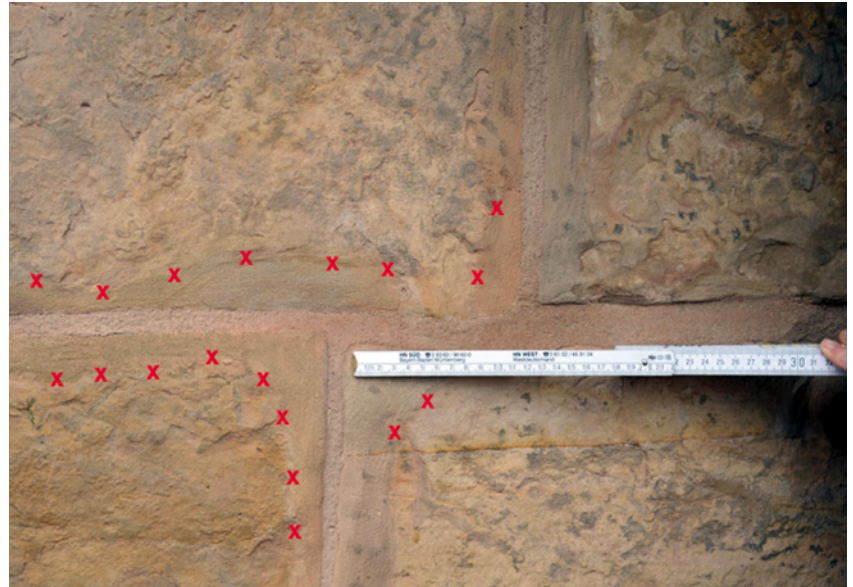
2.3 Mörtel mit anderen Bindemitteln und Kombinationen

In der Restaurierung werden seit vielen Jahren Kiesel säureester als Steinfestiger eingesetzt. Basierend auf diesen Erfahrungen erfolgten auch Entwicklungen zum Einsatz dieser Bindemittel in Ergänzungsmörteln. Bei den KSE-gebundenen Systemen [Ettl et al., 1995] und [Nimmrichter, 1997] müssen ebenfalls die Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen (natürliche und künstliche) auf den jeweiligen Anwendungsfall genau abgestimmt sein und erprobt werden. Verschiedene Varianten werden auch industriell angeboten.

Mit gelösten Kunststoffen (z. B. in geeigneten Lösungsmitteln gelöstes Polymethylmetacrylat) können Ergänzungsmörtel in ähnlicher Weise und unter vergleichbaren Randbedingungen wie mit KSE hergestellt werden. Es besteht aber die Gefahr der Ausbildung sehr dichter Mörtelstrukturen. Deshalb sollte die Anwendung nur auf Oberflächen dichter Gesteine erfolgen.

Bei Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften und ausreichender Standzeiten können Steinergänzungsmörtel unterschiedlicher Bindemittelsysteme kombiniert (in verschiedenen Schichten bei mehrlagigem Antrag) eingesetzt werden. Möglich sind beispielsweise der Ausgleich von großen Tiefenunterschieden oder die Auffüllung von tiefen Ausbrüchen mit mineralisch gebundenen Mörteln und die Gestaltung der Oberflächen mit acrylatgebundenen Mörteln.

Durch Zusätze von Acrylatdispersionen können Eigenschaften von mineralischen Mörteln modifiziert werden. Unter bestimmten Randbedingungen können Lösungsmittel im KSE zur Erweichung des Bindemittels im Acrylatmörtel führen



3 Objektbezogene Mörtelanpassungen

Die Auswahl des richtigen Ergänzungsmörtels bzw. eines Ergänzungsmörtelsystemes, egal mit welchem Bindemittel, muss basierend auf den Istzustand und den angestrebten Zustand nach der Restaurierung immer eine Einzelfallentscheidung sein.

Die Bilder 1 und 2 zeigen Mörtelergänzungen mit acrylatgebundenen Mörteln. In beiden Fällen sind

Bild 1

Steinergänzungen an Fugenflanken von Rätssandsteinen mit acrylatgebundenem Mörtel nach etwa 18 Jahren Standzeit (Übergänge sind markiert)

Bild 2

Probeachse mit acrylatgebundenen Ergänzungen und Retuschen auf Teilflächen von Muschelkalkquadern (rechts – streifenförmig neben den Markierungen)

die Mörtel gegen »null« ausgearbeitet worden. Die farbliche Anpassung an die Gesteine erfolgte in

beiden Fällen über angepasste acrylatgebundene Lasuren.

Literatur und Quellen

- [Snethlage, 2003] Snethlage, R., (2003): Außenputz – Untersuchungen, Erfahrungen, Überlegungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [Seifert, Zier, 1999] Seifert, F., Zier, H.-W., (1999): Erfolgreiche Premiere – Restaurierung von Naturstein mit acrylatdispersionsgebundenem Steinerfüllmörtel am Deutschen Nationaltheater, Weimar. Bautenschutz + Bausanierung, 22, Nr. 7, S. 23–27
- [Weise, Zier, 2012] Weise, G., Zier, H.-W., (2012): Produktion von Romanzementen in Thüringen und Beispiele für deren Anwendung. In: Bindemittel im 19. Jahrhundert auf dem Gebiet der heutigen Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen, Fünf Beiträge, IFS-Bericht Nr. 43, S. 31–38
- [Hopp, Zier, 2007] Hopp, H., Zier, H.-W., (2007): Erfahrungen bei der Konservierung von Lettenkeupersandstein am Schloss Friedenstein in Gotha. In: Natursteinsanierung Stuttgart 2007, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, S. 39–47
- [Nimmrichter, 1997] Nimmrichter, J., (1997): Ergänzungsmassen in der Steinkonservierung. In: Restauratorenblätter Band 17, 20 Jahre Steinkonservierung 1976–1996 Bilanz und Perspektiven, Verlag Mayer & Comp., Klosterneuburg, Wien, S. 135–141
- [Zier, Weise, 1989] Zier, H.-W., Weise, G., (1989): Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagstoffparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln. Betontechnik, 10, Nr. 1, S. 27–30
- [Zier, 2013] Zier, H.-W., (2013): Anforderungen an die Materialentwicklung für Mörtel und Ergänzungssysteme. In: Kunststoffe als Konservierungs- bzw. Restaurierungsmaterial? Potsdamer Beiträge zur Konservierung und Restaurierung Bd. 3, FH Potsdam, S. 106–119
- [Mikos, 1999] Mikos, E., (1999): Ein neues Entwurfverfahren für Steinerfüllmörtel (SEM). In: Steinerfüllung – Mörtel für die Steinrestaurierung, Fraunhofer IRB Verlag, S. 30–40
- [Zier, Seifert, 2003] Zier, H.-W., Seifert, F., (2003): Schäden an Dolomitmalkputzen bei Einwirkung von Luftschadstoffen. In: Umweltbedingte Gebäudeschäden an Denkmälern durch die Verwendung von Dolomitmalkmörteln, IFS-Bericht Nr. 16-2003, Mainz, S. 39–46
- [Zier et al., 2007] Zier, H.-W., Seifert, F., Kraus, K., (2007): Kalkmörtel mit natürlichen hydraulischen Anteilen: Festmörteleigenschaften und Reaktionswärme während der frühen Verfestigung. In: Neue Erkenntnisse zu den Eigenschaften von NHL-gebundenen Mörteln, IFS-Bericht Nr. 26-2007, Mainz, S. 81–98
- [Staemmler, 1999] Staemmler, T., (1999): Zur Entwicklung der Steinkonservierung in Thüringen. In: Jahrbuch der Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten 1997/98, Kunstverlag Josef Fink, Lindenberg, S. 96–102
- [Zier, 1999] Zier, H.-W., (1999): Steinerfüllmörtel auf Acrylatdispersionsbasis am Sandstein. In: Jahrbuch der Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten 1997/98, Kunstverlag Josef Fink, Lindenberg, S. 89–95
- [Zier, Seifert, 1999] Zier, H.-W., Seifert, F., (1999): Steinerfüllmörtel mit Acrylatdispersion als Bindemittel. In: Steinerfüllung – Mörtel für die Steinrestaurierung, Fraunhofer IRB Verlag, S. 64–81
- [Seifert, Zier, 2001] Seifert, F., Zier, H.-W., (2001): Zusammenfassende Darstellung zum Stand der Entwicklung des acrylatdispersions-gebundenen Steinerfüllungssystems. In: Arbeitsheft des Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege, Neue Folge 1, S. 29–59
- [Groll, 2001] Groll, T., (2001): Die Restaurierung des Hochaltars im Magdeburger Dom. In: Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt, Verlag für Bauwesen, S. 35–42
- [Ettl et al., 1995] Ettl, H., Sattler, L., Schuh, H., (1995): Konservierung von Sandsteinen mit kieselgelgebundenen Steinersatzstoffen. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 105–126

Hydrophobierung – Schaden oder Nutzen

Von unkritischem Einsatz zu qualifizierter Anwendung

Noch immer werden hydrophobierende Imprägnierungen bzw. Flutungen von Natursteinen oder Ziegeln ohne Kenntnis des Baumaterials und seines Verwitterungszustandes unbedacht eingesetzt. Folgeschäden von wasserabweisenden Behandlungen zeigen die potentielle Gefährdung der Bausubstanz durch Hydrophobierungen. Vorbereitende Untersuchungen lassen die Notwendigkeit, die Möglichkeiten und das Gefährdungspotential der Behandlung besser einschätzen. Durch eine differenzierte Anwendung wird das Schadensrisiko minimiert und die Effizienz gesteigert. Das 2010 veröffentlichte WTA Merkblatt 3-17-10: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen – gibt ausführliche Hilfestellung zu der Vorbereitung und Ausführung von hydrophobierenden Behandlungen mineralischer Baustoffe ausgenommen Beton.

*Esther v. Plehwe-Leisen
Eberhard Wendler
Lothar Goretzki*

Schlagwörter: Hydrophobierung, Folgeschäden, Entscheidungshilfe, Wasseraufnahme, Dauerhaftigkeit, Nachbehandlung, Anwendungstechnik, Materialauswahl

Hydrophobierende Imprägnierungen von Baustoffen gelten seit über 40 Jahren oft als selbstverständlicher Teil einer Erhaltungsmaßnahme. Meist sind vor der Behandlung keine Untersuchungen durchgeführt worden. Notwendigkeit, Nutzen oder Schaden der Maßnahme wurden nicht hinterfragt. Überlegungen zum Einfluss der Materialeigenschaften der Baustoffe und ihres Zustandes auf das Resultat der Imprägnierung spielten ebenso wenig eine Rolle. Erst die Zuordnung vieler Folgeschäden zu vorausgegangenen wasserabweisenden Behandlungen ließ den Ruf nach einem bewussteren Umgang mit hydrophobierenden Imprägnierungen laut werden. Um eine qualifiziertere Anwendung zu ermöglichen und dem Praktiker Hilfestellung zu geben, wurde 2010 das neue WTA-Merkblatt 3-17-10: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen – herausgegeben. Darin werden die Entscheidungsgrundlagen für die Anwendung einer hydrophobierenden Imprägnierung aufgezeigt und ein Fragenkatalog zur Abwägung der Möglichkeiten einer solchen Behandlung für den speziellen Fall zur Verfügung gestellt. Die Entscheidung über eine hydrophobierende Behandlung muss gut vorbereitet und geplant werden, um unnötige Kosten oder gar teilweise gravierende Folgeschäden an Baustoffen durch Falschbehandlungen zu vermeiden.

1 Hydrophobierung von porösen Baustoffen

Schäden an Baustoffen entstehen ganz maßgeblich durch den Einfluss von Wasser. Somit liegt der Gedanke nahe, dass der Schutz vor Wasser zu einer größeren Haltbarkeit der Materialien führen sollte. Hierzu stehen neben konstruktiven Lösungen, Abdichtungen und gewissenhafter Pflege der Bauwerke auch wasserabweisende Anstriche und hydrophobierende Tränkungen zur Verfügung.

»Unter hydrophobierender Imprägnierung eines porösen Baustoffs versteht man die intensive Benetzung der Baustoffoberfläche mit einem Tränkungsstoff, welcher durch Kapillarkräfte aufgenommen wird und nach Reaktion die Wandungen der Kapillarporen mit einem wasserabweisenden (hydrophoben) Film auskleidet« [WTA-Merkblatt 3-17-10]. Eine hydrophobierende Tränkung kann ihre prophylaktische Wirkung nur bei Regen- oder Spritzwasser entfalten, aufsteigende Feuchte oder Feuchteabsorption infolge hoher Luftfeuchtigkeit werden nicht reduziert.

Seit fast 60 Jahren werden Imprägniermittel auf Silikonbasis zur wasserabweisenden Imprägnierung von mineralischen Baustoffen eingesetzt. Heute kommen bevorzugt Silan/Siloxan-Gemische

**Bild 1**

Ausbildung von dünnen Gesteinsschalen nach einer hydrophobierenden Tränkung am Reichard Haus (WDR) in Köln [Foto Plehwe-Leisen]

**Bild 2**

Zerstörung der wertvollen Bas-Reliefs am Angkor Wat Tempel/Kambodscha durch die Ausbildung von dünnen Gesteinsschalen nach Hydrophobierung [Foto Leisen]

als Flüssigkeiten zur Tränkung oder als Fassaden-cremes zum Einsatz. Fluoropolymere mit einer zusätzlichen oleophoben Wirkung werden auch als Graffiti-Schutz-Produkte eingesetzt.

Schalenbildung auf, gefolgt von dem Verlust großer Teile der originalen Oberfläche. Dieser Schaden wurde untersucht und konnte eindeutig der geringen Eindringtiefe der hydrophobierenden Tränkung zugeordnet werden. Trotz der Imprägnierung der Oberflächen kam es zu unkontrolliertem Eindringen von Regenwasser über undichte Fugen. Die hydrophobierte Zone konnte hinterwandert werden. Heute sind viele derartige Fälle bekannt (Bild 1). Es treten nahe der Oberfläche aufgrund der unterschiedlichen Materialfeuchten Scherspannungen auf und es kommt zu der beschriebenen Schalenbildung.

2 Unkritischer Einsatz

Das Bekanntwerden von Folgeschäden wasserabweisender Imprägnierungen lehrt, dass die »automatische« Einbeziehung einer wasserabweisenden Tränkung in jedes konventionelle Erhaltungskonzept nicht mehr Stand der Technik sein kann, der Automatismus muss überdacht werden. Fehlentscheidungen aufgrund ungenügender Vorbereitung der Maßnahme führen im besten Fall zu unnötigen Mehrausgaben, im schlechtesten Fall zu irreversiblen Schäden an der Substanz.

Häufig werden die Scherspannungen an der Grenzfläche des hydrophobierten und ungetränkten Baustoffes durch die Anwesenheit bauschädlicher Salze verstärkt. Am Tempel Angkor Wat in Kambodscha wurde während einer Erhaltungsmaßnahme in den 1990er Jahren ein toniger Sandstein mit einem Acrylharzprodukt wasserabweisend ausgerüstet. Wenige Jahre danach machte sich die Ausbildung dünner Schalen an den Reliefs bemerkbar. Diese für den Stein ganz untypische Verwitterungsform zeichnete die Eindringtiefe der Imprägnierung nach. Das Gestein zeigt eine deutliche Belastung mit bauschädlichen Salzen. Diese Salze werden durch unkontrolliert eindringendes Regenwasser in den Bausteinen mobilisiert und kristallisieren an

2.1 Ausbildung von Schalen als Folgereaktion

Als erstes Beispiel für Folgeschäden wurde eine Schalenbildung am Erbdrostenhof in Münster publiziert [Wendler, Sattler, 1989]. Hier trat einige Jahre nach der wasserabweisenden Tränkung an Bauteilen aus Baumberger Sandstein in ca. 7 mm Tiefe

der Grenzfläche zur trockenen hydrophobierten Außenzone aus. So kommt es zu einer erheblichen Verstärkung der Spannungen in der Oberflächenzone des Gesteins und zu einer schnellen Schadensentwicklung mit unwiederbringlichem Verlust der hochwertigen Steinreliefs (Bild 2). Der Prozess wird zusätzlich durch starke hygrische Quellung des Gesteins bei Befeuchtung verstärkt [Leisen et al., 2004].

Nicht nur Sandsteine, sondern auch vulkanische Tuffe wie z. B. Weiberner oder Ettringer Tuffstein neigen zur Ausbildung von Schalen bei ungenügender Eindringtiefe des Hydrophobierungsproduktes. Aber auch künstliche Baustoffe wie Ziegel können dieses Schadensbild nach Hydrophobierungsbehandlungen ausbilden. Wie tonige Sandsteine zeigen auch niedrig gebrannte Ziegel häufig hohe hygrische Quellraten. Die Quellung setzt bereits bei größeren Luftfeuchten ein. Eine hydrophobierende Imprägnierung behindert lediglich die kapillare Wasseraufnahme, nicht aber die Absorption von Feuchte in den Porenräumen des Baustoffes.

2.2 Unterschiedliche Imprägnierungswirkung

Nicht immer führt eine hydrophobierende Tränkung zu einer einheitlichen Wasserabweisung der behandelten Fassade. Das kann einerseits an den Baustoffen selbst oder aber an deren Belastung mit bauschädlichen Salzen, an einer unterschiedlichen Verschmutzung oder variierenden Feuchtezuständen des Baustoffes liegen. Nicht zuletzt spielt die Sorgfalt der Applikation eine maßgebliche Rolle.

So wurden 16 Jahre nach einer Imprägnierung deutliche Schäden an der Frauenkirche in Nürnberg bekannt. Es zeigte sich, dass bei diesem Baustoffmaterial, einem grobkörnigen Bursandstein, nach der Imprägnierung keine einheitliche Ausbildung der wasserabweisenden Eigenschaften der Oberfläche möglich war (Bild 3). Neben der kapillaren Wasseraufnahme zeigt dieses Gestein aufgrund seiner großen Gesteinsporen auch deutlichen Sickertransport von Regenwasser, der durch eine hydrophobierende Tränkung prinzipiell nicht unterbunden werden kann. So kam es auch hier zu einer Hinterwanderung der hydrophobierten Zone und

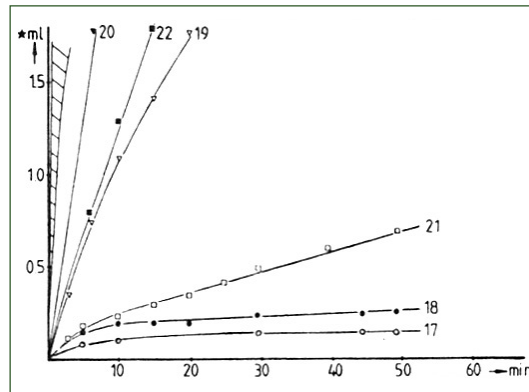


Bild 3

Die Saugfähigkeit des Bursandsteins an der Frauenkirche in Nürnberg variiert nach der hydrophobierenden Tränkung sehr stark; schraffierter Bereich: unbehandeltes Gestein [Wendler, Snethlage, 1988]

den daraus resultierenden Schäden [Wendler, 2013].

Ähnliche Probleme sind von Kalktuffen mit großen Poren und Löchern oder aber vulkanischen Tuffsteinen und generell von Rissen bekannt. Auch hier gibt es Beispiele von Folgeschäden an der Substanz, die durch sorgfältige Voruntersuchungen und angepasste Planung vermeidbar gewesen wären.

2.3 Verschmutzungsneigung und mikrobieller Bewuchs

Ein häufig angeführter Grund für eine abschließende hydrophobierende Tränkung an Fassaden ist der Wunsch, eine Neuverschmutzung zu verhindern. Es zeigte sich aber, dass hydrophobierte Baustoffoberflächen oft kurz nach der Tränkung durch das Nachlassen des Abperleffektes erneut verschmutzen (Bild 4). Hinzu kommt nicht selten die Ausbildung unschöner Schmutztrien. Die Geschwindigkeit der Neuverschmutzung regengeschützter Bereiche wird von einer wasserabweisenden Tränkung nicht verringert.

Auch die mikrobiologische Besiedlung der Materialoberflächen wird durch eine hydrophobierende Flutung nur temporär reduziert. Ist die oberflächliche Hydrophobie abgebaut, kann die Oberflächenfeuchtigkeit, wegen der Tiefenhydrophobie, nicht nach innen transportiert werden. Dadurch verstärkt sich das Risiko des mikrobiellen Bewuchses. Teilweise kommt es durch die Hydrophobierung zu Veränderungen der Besiedlung. So findet sich oft die stark rot färbende Grünalge *Trentepohlia* auf trockenen, neu hydrophobierten Flächen [Warscheid, Leisen, 2011] (Bild 5).



Bild 4
Der frisch gereinigte und hydrophobierte Justizpalast in München im Jahre 1987 (links) und mit deutlicher Wiederverschmutzung im Jahre 1995 (rechts) [Foto Wendler]



Bild 5
Nach einer hydrophobierenden Tränkung am Tempel Ta Nei in Kambodscha tritt vermehrt die stark rot gefärbte Grünalge *Trentepohlia* auf [Foto Leisen]

Hydrophobierende Tränkungen von Baustoffoberflächen sind oft routinemäßig der letzte Schritt einer Maßnahme. Spätere Umlanungen wie eine nachträgliche Entscheidung für weitere oder ergänzende Anwendungen sind dadurch oft eingeschränkt. Die Haftung von mineralischen Mörteln, wässrigen Anstrichen und bestimmten Graffiti-schutzsystemen kann auf hydrophobierten Flächen stark beeinträchtigt sein. Hierdurch wird die Wirksamkeit von Graffiti-schutzsystemen und Anstrichsystemen stark eingeschränkt.

3 Differenzierte Anwendung

Die Darstellung der Schäden, hervorgerufen durch unüberlegte Verfolgung eines ungeeigneten Maßnahmenkonzeptes, verdeutlicht die Notwendigkeit eines differenzierten Umgangs mit hydrophobierenden Tränkungen. Zu Beginn der Konzepterstellung steht zuerst die Frage, ob eine wasserabweisende Tränkung notwendig und möglich oder vielleicht sogar potentiell schädlich ist. Hier geben das WTA-Merkblatt 3-17-10 und weiterführende Literatur wie [Snethlage, 2005] oder [Snethlage, Pfanner, 2013] Hilfestellung.

3.1 Entscheidungsfindung Hydrophobierung

Eine hydrophobierende Tränkung mit siliziumorganischen Wirkstoffen ist irreversibel. Eine Entfernung ist praktisch unmöglich. Deshalb stellt die Entscheidung für eine hydrophobierende Tränkung einen endgültigen Eingriff dar und muss bestens überlegt sein [Wendler, Plehwe-Leisen, 2008].

Zu Beginn der Entscheidungsfindung stehen Materialuntersuchungen an den Baustoffen [Snethlage, 2005], [WTA Merkblatt 3-17-10].

Die wichtigsten Kriterien bei einer Entscheidung für oder gegen eine hydrophobierende Behandlung sind die Materialeigenschaften des Baustoffes und sein Verwitterungszustand. Fehlen diese Informationen, kann keine fundierte Entscheidung über eine hydrophobierende Tränkung gefällt werden.

Ist die Aufnahme von Wasser in dem konkreten Fall wirklich schädlich? Ist der Baustoff frostgefährdet, hat er reaktive Bestandteile, ist er mit bauschädlichen Salzen belastet? Diese Punkte müssen im Vorfeld geklärt werden.

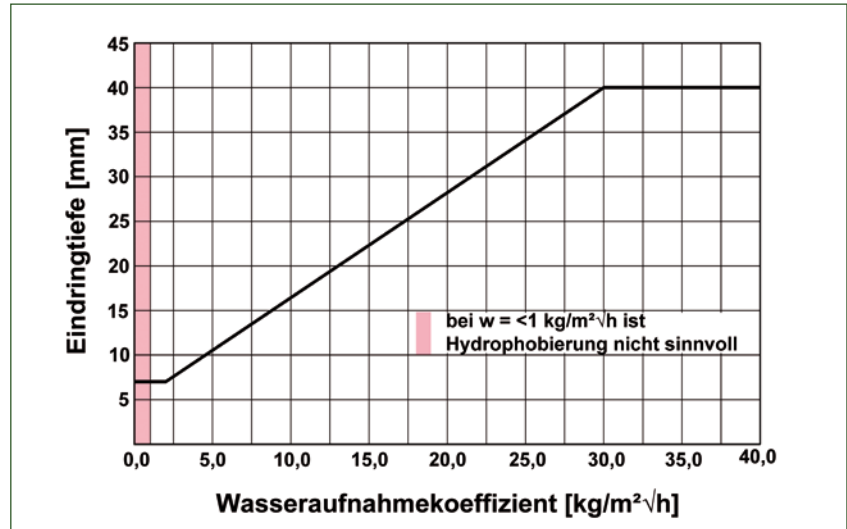
Das Ziel einer hydrophobierenden Tränkung ist die Reduktion der Aufnahme von Wasser. Das zeigt, dass eine Behandlung nur sinnvoll sein kann, wenn das Baumaterial über ein ausreichendes Saugvermögen verfügt. Der Baustoff sollte ein Mindestsaugvermögen von $w > 1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ($= 16,6 \text{ g/m}^2\sqrt{\text{s}}$) haben (Bild 6), um eine ausreichende Saugfähigkeit zu gewährleisten.

Neben der Wasseraufnahme des Baustoffes spielt bei der Entscheidung die erreichbare Eindringtiefe des Wirkstoffs eine gewichtige Rolle. Jedes Baumaterial reagiert individuell auf klimatische Veränderungen und eine Befeuchtung. Nach einer hydrophobierenden Tränkung unterscheidet sich die behandelte Zone von angrenzenden Bereichen. Die Trennfläche der beiden Zonen muss möglichst tief liegen, um große Eigenschaftssprünge nahe der Oberfläche zu vermeiden. Es ist also auch auf eine ausreichende Wirtktiefe der Behandlung zu achten.

Daneben spielen bei der Entscheidungsfindung weitere Materialeigenschaften und verwitterungsbedingte Veränderungen der Baustoffe eine große Rolle. Hilfestellung gibt ein Fragenkatalog, der zu den verschiedenen Folgerungen führt [WTA-Merkblatt 3-17-10]:

- Eine hydrophobierende Behandlung kann vorteilhaft sein.
- Eine hydrophobierende Behandlung ist nicht erforderlich.
- Eine hydrophobierende Behandlung darf auf keinen Fall durchgeführt werden.
- Eine hydrophobierende Behandlung bietet keinen dauerhaften Schutz vor mikrobieller Neubesiedlung.
- Weitergehende detaillierte Untersuchungen sind notwendig.

Viele der Fragen erfordern zur Beantwortung Fachwissen und einen Fachgutachter. Die fachlich fundierte Planung erspart dem Bauherren Kosten und Folgekosten.



3.2 Anforderungen an eine hydrophobierende Tränkung – Begleitarbeiten

Wenn die bewusste Entscheidung gefällt wurde, dass eine hydrophobierende Tränkung vorgenommen werden soll, sind vorbereitende Arbeiten nötig, z. B. eine Sanierung des Fugennetzes, eine Reduktion bauschädlicher Salze, die Überprüfung der Wasserführung und Reparatur von Leckagen, ggf. Sperre von aufsteigender Feuchte. Es darf im Mauerwerk keine Risse oder Hohlräume mehr geben, aufsteigende Feuchte muss ausgeschlossen sein. Eine mögliche konstruktive Lösung zur Regenwasser-Ableitung sollte unbedingt in die Überlegung einbezogen werden.

Bei der Entscheidung für eine Hydrophobierung sind weitere Anforderungen zu berücksichtigen [Snethlage, 2005], [WTA Merkblatt 3-17-10].

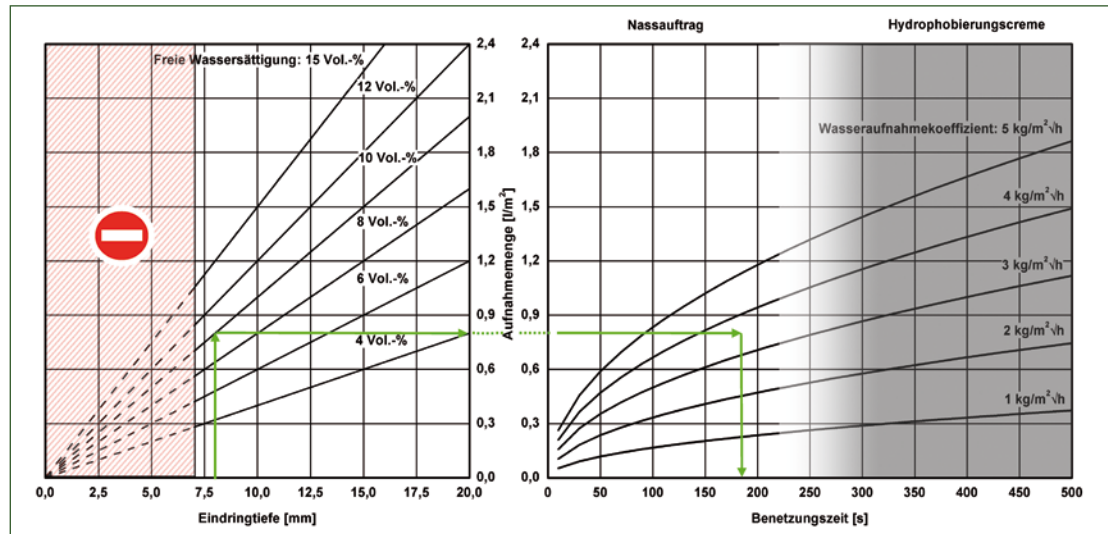
Eine hydrophobierende Tränkung muss zu einer deutlichen Reduzierung der kapillaren Wasseraufnahme des Baustoffs führen. Es sollte ein w -Wert von $< 0,1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ erzielt werden. Folgeschäden zeigen anschaulich die wichtige Rolle ausreichender Wirtktiefen des Hydrophobierungsmittels. Die nötige Eindringtiefe ist von der Saugfähigkeit des Baustoffes abhängig (Bild 7). Eine Abschätzung der wichtigen Parameter ist aus den Bildern 6 und 7 möglich. Aus Bild 6 wird für einen Sandstein mit $w = 3,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ (Worzeldorfer Sandstein) eine erforderliche Eindringtiefe von 8 mm ermittelt. Die

Bild 6

Diagramm zur Abschätzung der erforderlichen Eindringtiefe aus Wasseraufnahmekoeffizient w des Baustoffes; verändert nach [WTA Merkblatt 3-17-10]

Bild 7

Diagramme zur Abschätzung der notwendigen Auftragsmenge und Benetzungszeit aus der geforderten Eindringtiefe in Abhängigkeit von der freien Wassersättigung und dem Wasseraufnahmekoeffizienten des Baustoffes [WTA Merkblatt 3-17-10]



Messung der freien Wassersättigung dieses Gesteins ergab einen Wert von 10 Vol.-%. Mit diesen beiden Informationen lässt sich aus Bild 7 links eine Aufnahmemenge von $0,8 \text{ l/m}^2$ ablesen. In Bild 7 rechts ergibt sich aus der Aufnahmemenge und dem Wasseraufnahmekoeffizient w des Materials (hier $3,5 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$) die benötigte Benetzungsdauer von ca. 180 Sekunden.

Eine Austrocknung der hydrophobierten Baustoffe muss weiterhin gegeben sein. Die Wasserdampfdiffusionsfähigkeit darf nicht eingeschränkt werden. Dies ist besonders wichtig, da es auch nach sorgfältig durchgeführter Restaurierung zu Wasserhinterwanderung kommen kann, z. B. über Flankenabrisse an den Fugen oder durch Rissbildung im Baumaterial.

Weiterhin spielen visuelle Kriterien für die Entscheidung eine Rolle. Treten an der Oberfläche Farbänderungen, Dunkelung oder Glanz auf? Sind diese Veränderungen tolerierbar?

Die vorbereitenden Arbeiten müssen vor der Applikation gewissenhaft abgeschlossen und kontrolliert sein. Musterflächen am Objekt sollten angelegt, überprüft und bewertet sein. Das Tränkungsprodukt ist zu wählen und das Anwendungsverfahren ist zu bestimmen. Die Frage ist zu klären, ob im konkreten Fall eine Tränkung oder die Anwendung einer Creme mit langer Einwirkzeit die geeignetere Applikation ist. Es muss entschieden werden, ob ein wässriges oder ein lösemittelhaltiges Produkt besser geeignet und zu bevorzugen ist.

3.3 Anlage von Musterflächen

Musterflächen sind ein unverzichtbarer Schritt im Planungsprozess einer hydrophobierenden Imprägnierung. Eine vergleichbare, unbehandelte Fläche muss Bestandteil der Musterflächen sein. Auch muss die Musterfläche dieselbe Vorbehandlung wie die Fassadenfläche erhalten und zugänglich sein.

Die Anlage einer Musterfläche beginnt mit der Untersuchung des Vorzustandes. Nach der Auswahl von geeigneten Tränkungsprodukten und Anwendungsverfahren wird nach den Herstellerangaben behandelt. Aus den Voruntersuchungen lassen sich die benötigten Mittelmengen und auch die Einwirkzeiten abschätzen. Die Auswirkung der hydrophobierenden Tränkung ist an allen Baumaterialien des Objekts zu überprüfen, z. B. auch an Fugenmörteln.

Um eine Vergleichbarkeit mit der Maßnahme an der Fassade zu garantieren, müssen Produktapplikation und Nachsorge wie Schutz vor Regen, Sonne etc. mit den Gegebenheiten an der Fassade übereinstimmen. Die Musterfläche muss überprüfbar sein, d. h. es muss möglich sein, hier Proben wie z. B. Bohrkerne zu nehmen. Alle Maßnahmen und Untersuchungen an der Musterfläche müssen sorgfältig dokumentiert werden [WTA Merkblatt 3-17-10].

Wenn die Musterfläche anschließend nicht mit behandelt wird, steht sie weiterhin als Vergleichsfläche für eventuelle spätere Untersuchungen zur Verfügung.

3.4 Anwendung und Nachkontrolle

Nach den Erfahrungen an der Musterfläche werden das Hydrophobierungsprodukt und die Applikationsmethode festgelegt und mit der Behandlung begonnen. Neben den Ausführungen des WTA Merkblatts 3-17-10 sollte auch das WTA Merkblatt 3-14-04: Anwendungstechnik – Natursteinrestauration – Konservierung – und die Technischen Informationen der Hersteller beachtet werden.

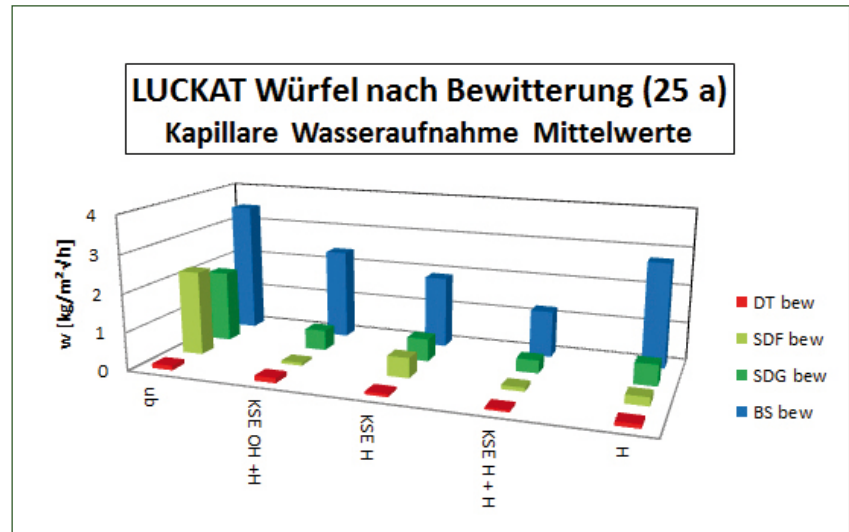
In Abhängigkeit von der Produktwahl wird das Applikationsverfahren gewählt. Es sind oft mehrere Trängungsgänge notwendig. Der Baustoff muss bis zur Sättigung getränkt werden. Bei flüssigen Trängungsmitteln ist oberflächlicher Materialüberschuss zu entfernen, um die Gefahr von Farbänderungen und Glanzbildung zu reduzieren. Behandelte Flächen sind während der Reaktion vor Witterungseinflüssen zu schützen.

Zum Schutz von Verarbeitern und der Umwelt sind die Anweisungen des Sicherheitsdatenblattes der verwendeten Produkte zu berücksichtigen.

Nach der erforderlichen Mindestwartezeit für die aufgetragenen Produkte ist eine Qualitätsprüfung der Maßnahme notwendig. Das Abperlverhalten kann einfach durch den Wassertropfentest, die kapillare Wasseraufnahme zerstörungsfrei mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen überprüft werden. Es muss ein w -Wert $\leq 0,1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ erreicht werden [Snethlage, 2005]. Die Überprüfung der Eindringtiefe ist nicht zerstörungsfrei messbar.

Wie bereits bei den Voruntersuchungen, der Anlage und Untersuchung der Musterfläche ist auch bei Anwendung und Nachkontrolle die Mitwirkung einer Fachbauleitung bzw. eines Fachgutachters dringend angeraten.

Bei Beton gilt das Mindestsaugvermögen nicht. Hier spielen andere Kriterien, wie z. B. die Karbonatisierungssperre und der Schutz der Bewehrung eine wichtige Rolle.



4 Dauerhaftigkeit und Wiederbehandlung

Die Wirkung einer hydrophobierenden Behandlung wird nach einigen Jahren partiell wieder abgebaut. Je nach Baumaterial und Qualität der Behandlung ist von einem deutlichen Nachlassen nach 20 bis 30, häufig schon nach 10 bis 15 Jahren auszugehen [Meinhardt-Degen, 2004], [Wendler, Snethlage, 1988], [Wendler, 2013]. Meist ist noch eine Tiefenwirkung nachzuweisen, während die Materialoberfläche bereits eine deutliche Benetzung zeigt. Auftreffendes Regenwasser benetzt die Oberfläche, wird aber nicht ins Materialinnere abgesaugt und somit bleibt die Oberfläche länger feucht. Das kann zu vermehrter mikro-biologischer Besiedlung und stärkerem Eintrag hydrophiler Aerosolpartikel führen.

Neben Baudenkmalen mit vollständiger Dokumentation der Maßnahme sind auch Expositionsversuche eine gute Quelle für Informationen zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen. 1979 wurden Probewürfel von acht Bausteinen des Kölner Doms nach verschiedenen hydrophilen und hydrophobierenden Behandlungen auf dem Dach des Doms exponiert (Luckat Würfel). Es zeigte

Bild 8

Nach 25 Jahren Bewitterung ist bei den vier Gesteinen noch eine reduzierte Wasseraufnahme der behandelten Steinproben deutlich;
DT: Drachenfels-Trachyt, SDF und SDG: Schlaitdorfer Sandstein fein und grob, BS: Baumberger Sandstein, ub: unbehandelt, KSE OH und KSE H: Kieselsäureester hydrophil und hydrophob, H: Hydrophobierung

sich, dass auch nach über 20 Jahren der Exposition hydrophobierte Würfel noch merklich reduzierte Wasseraufnahmewerte aufwiesen. Eine Benetzung der Oberflächen hat sich aber wieder deutlich eingestellt [Plehwe-Leisen, 2005].

Eine erneute Behandlung kann prinzipiell durchgeführt werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass durch jede neue Imprägnierung Material in den Porenraum des Baustoffes eingebracht wird. Je nach der Porenraumgeometrie des Baumaterials kann dies zu einer Behinderung der Wasserdampfdiffusion und somit der Trocknung nach dem un-

kontrollierten Eindringen von Wasser hinter die hydrophobierte Außenzone führen. Bei deutlicher Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes (20% und höher) ist höchste Vorsicht geboten. Eine Anlage und Überprüfung einer Musterfläche ist daher für eine Entscheidung zwingend notwendig.

Neuere Untersuchungen zeigen aber auch, dass bei Flächen mit erhaltener Tiefenhydrophobie die Benetzbarkeit der Oberfläche wieder reduziert und der Abperleffekt durch eine Reinigungsmaßnahme wieder funktionsfähig werden kann [Sosnowski, 2006].

Literatur und Quellen

- [Leisen et al., 2004] Leisen, H., Plehwe-Leisen, E. von, Long, N., Warrack, S., Krause, D., Kroner, J., Schmaltz, Ch., (2004): The South-West Pavilion of Angkor Wat Temple. Damages encountered and conservation efforts. Udaya. Journal of Khmer Studies, Nr. 5, S. 193–203
- [Meinhardt-Degen, 2004] Meinhardt-Degen, J., (2004): Durability of Hydrophobic Treatment of Sandstone Facades – Investigations of the Necessity and Effects of Re-Treatment. Proc. 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Stockholm June 27 – July 2, 2004, ICOMOS Sweden, S. 283–289
- [Plehwe-Leisen, 2005] Plehwe-Leisen, E. von, (2005): Bewitterungsexperimente am Kölner Dom und ihre Bedeutung für die praktische Denkmalpflege. ZDGG, Nr. 156–1, S. 159–166
- [Sosnowski, 2006] Sosnowski, M., (2006): Restauratorischer Umgang mit »Althydrophobierungen« – Kritische Betrachtung siliziumorganischer Hydrophobierungen und Reinigungsversuche zur Reaktivierung. Seminararbeit HBK Dresden
- [Snethlage, 2005] Snethlage, R., (2005): Leitfaden Steinkonservierung. 2. Aufl., Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [Snethlage, Pfanner, 2013] Snethlage, R., Pfanner, M., (2013): Leitfaden Steinkonservierung. 4. Aufl., Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [Warscheid, Leisen, 2011] Warscheid, T., Leisen, H., (2011): Microbiological studies on stone deterioration and development of conservation measures at Angkor Wat. Washington, Smithsonian Institution Scholarly Press, S. 1–18
- [Wendler, Snethlage, 1988] Wendler, E., Snethlage, R., (1988): Durability of Hydrophobing Treatments of Natural Stone Buildings, Proc. The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. 10.–12. Oct.1988, Balkema, S. 945–951
- [Wendler, Sattler, 1989] Wendler, E., Sattler, L., (1989): Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Steinkonservierungen mit siliziumorganischen Stoffen. Bautenschutz Bausanierung, Sonderheft 2. Statusseminar des BMFT, S. 70–75
- [Wendler, 2013] Wendler, E., (2013): Pro und Contra hydrophobierende Tiefenimprägnierung – Erfahrungen aus 35 Jahren Anwendung. WTA Schriftenreihe, Nr. 38, S. 83–103
- [Wendler, Plehwe-Leisen, 2008] Wendler, E., Plehwe-Leisen, E. von, (2008): Water Repellent Treatment of Porous Materials. A New Edition of the WTA Leaflet. Proc. Hydrophobe V Brüssel April 15–6, Aedificatio Publishers, 2008, S. 155–167

Materialoptimierung und Materialentwicklung – Voraussetzungen und beispielhafte Projektabläufe

Im Gedenken an Stephan Busch († 16.10.2011), dem im besonderen Maße die Steinsilikatkleber-Entwicklung zu verdanken ist.

Die Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaftlern, Planern, Restauratoren sowie den Besitzern von denkmalgeschützten Bauwerken und den Denkmalbehörden muss bei der Qualitätssicherung und besonders bei der Optimierung oder Entwicklung von Verfahren und Materialien für die Restaurierung sehr eng sein. Eine erfolgreiche Arbeit kann nur durch eine frühzeitige Sicherung zeitlicher und monetärer Ressourcen sowie durch die frühe Definition von Zielen und Prüfmethoden sichergestellt werden.

**Albert Kieferle
Georg Schmid
Peter Reiner**

Schlagwörter: Restaurierung, Entwicklung angepasster Materialien, Planung, Naturwissenschaft, neue Restaurierungsmaterialien, Hatzfeldgrabmal, Alabaster, Acrylharzvolltränkung, Wilhelma Stuttgart, Terracotta, Kilianskirche Heilbronn, Basilika Weingarten, Steinsilikatkleber, Sandstein

Restaurierungen müssen sich an ganz unterschiedlichen Materialien des Bestands orientieren. Die Breite historischer Materialien ist immens. Dazu kommen Materialien, die im Zuge vorangegangener Restaurierungen in das ursprüngliche Material eingebracht wurden und sich dort zu einem hoch komplexen Gemenge verbunden haben. Standardlösungen kann es in diesem Umfeld in vielen Fällen nicht geben und es wird immer wieder notwendig, die spezielle Lösung für die ganz besondere Fragestellung zu finden.

Es muss aber nicht immer um neue Lösungen gehen. In dem komplexen Gemenge des historischen Bestands ist durch die Bewertung von Mustern und Proben immer sicher zu stellen, dass die gewählte Arbeitsweise zum Erfolg führt.

1 Qualitätssicherung von Restaurierungsmaßnahmen

Das am historischen Bestand anzutreffende Materialgemenge, das durch die Materialien des Objekts selbst, durch dessen Nutzung, durch vorangegangene Veränderungen und Restaurierungen entstanden ist, sorgt dafür, dass sich ein Erfolg eines Restaurierungskonzepts, so bewährt es auch sein

mag, nicht automatisch einstellt. Zur Überprüfung stehen eine Reihe von Untersuchungsmethoden, z. B. Bohrwiderstandsmessungen, Ultraschallmessungen, Haftzugmessungen (Bild 1) und zur Schadensanalyse auch Salzanalysen und Feuchtebestimmungen zur Verfügung. Gemeinsam ist einem Großteil dieser Methoden, dass sie auf die Entnahme von Proben oder sonstigen Eingriffen beruhen, also nicht zerstörungsfrei sind. Durch die Entwicklungen in den vergangenen Jahren konnte die Größe und Menge dieser Proben zwar reduziert werden, der Eingriff in den Bestand bleibt grundsätzlich bestehen. Zuletzt wurden im Rahmen des DBU-Monitoringprojekts [Auras et al., 2010] Möglichkeiten zur Langzeitüberwachung des Zustands von restaurierten Steinobjekten gesucht, die interessante Ansätze bieten, jedoch für die Fragestellung der Qualitätssicherung und Abstimmung im Zuge einer Restaurierung nicht geeignet sind oder nicht die erforderliche Genauigkeit liefern.

Eine Bewertung des Festigungserfolgs durch eine Überprüfung an der Steinoberfläche erlaubt keinen Rückschluss auf den Festigungserfolg insgesamt, insbesondere in die Tiefe hinein nicht.

Im baulichen Kontext können sich für mehr oder weniger zerstörende Untersuchungen zumeist Werkstücke finden lassen, wo ein Ersatz vorgese-



Bild 1
Haftzugsmessung an
Schlämmen

hen ist und an denen das Konservierungsverfahren oder zumindest die kritischen Einzelschritte erprobt und wissenschaftlich wie ästhetisch bewertet werden können. Die messtechnische Überprüfung des Restaurierungskonzepts endet aber spätestens an Skulpturen oder wertvollen Einzelteilen in einem Dilemma zwischen den Anforderungen der Schonung des Originals und der Qualitätssicherung. Verständlicherweise führt dies häufig dazu, dass lediglich die ästhetischen Anteile der Konservierung betrachtet, jedoch Aspekte, die mit einer Veränderung im Korngefüge eines Sandsteins durch eine Festigung zusammenhängen, hingegen nicht bewertet werden können und damit eine Qualitätssicherung gerade an den höchstwertigen Stücken nur unzureichend stattfindet.

Reversible Konservierungsschritte sind unter diesem Gesichtspunkt wenig problematisch. Kritisch sind hingegen Arbeitsschritte zu betrachten, die unter der Oberfläche oder in das Materialgefüge eingreifen. In der Steinkonservierung sind hauptsächlich die Verfüllungen von Rissen und Schalen (Hohlstellen) und die Festigung des Korngefüges irreversibel, die bei der Konservierung von Sandsteinen der zentrale Punkt jeden Konzepts sind.

Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen haben über den direkten Zweck für das Objekt selbst auch den Vorteil, die Erfahrungen der am Projekt Beteiligten mit den einzelnen Konservie-

rungsverfahren immer wieder zu überprüfen und zu verorten.

Die naturwissenschaftliche Qualitätssicherung greift so lange, wie weitgehend fertig entwickelte Verfahren zur Anwendung kommen können und sie auf einigermaßen berechenbare Untergründe appliziert werden. Ist dies nicht der Fall, sind neue Wege zu suchen, vorhandene Materialien und Verfahren zu modifizieren oder gar neue Materialien und Verfahren zu entwickeln. Dabei wäre dann eine andere Herangehensweise mit umfangreichen Vorarbeiten notwendig, die zunächst weniger mit der eigentlichen restauratorischen Fragestellung zu tun haben.

2 Das Umfeld der Restaurierung

Die Herausforderung für alle an einem Restaurierungsprojekt beteiligten Personen besteht darin, rechtzeitig zu erkennen, dass eventuell gewählte Arbeitsweisen nicht zum gewünschten Ziel führen können. Die Eigentümer der Objekte haben zumeist jedoch nicht das erforderliche fachliche Wissen dazu, das Projekt in geeigneter Weise zu bearbeiten. Fachleute der Denkmalbehörden, die über einen umfangreichen Überblick und gleichzeitig über ein großes Fachwissen verfügen, können dies durch ihre Beratung frühzeitig kompensieren. Häufig treten die Besitzer direkt an die Planer heran. Diese müssen die Projektsteuerung übernehmen und ziehen Fachleute, d. h. Restauratoren und Naturwissenschaftler hinzu. Der Anstoß zu Neuentwicklungen kann von jedem Partner kommen, wobei jede Seite ihre eigene Motivation hat. Seitens der Naturwissenschaftler und der Denkmalpflege können grundlegendere Fragestellungen eine zusätzliche Rolle spielen. Bei den Planern werden eher der Projektverlauf und der Projekterfolg vorrangig sein. Die Restauratoren bringen auch Erfahrungen und Problempunkte mit den gängigen Restaurierungstechniken ein. Welche Motivation im Einzelnen jeweils ausschlaggebend ist, ist unerheblich, da sie in ihrer Summe auf jeden Fall hilfreich sind, eine Restaurierungsaufgabe sicher und zielstrebig zum Erfolg zu führen.

In der Anfangsphase der Planung werden die Anforderungen definiert, die ein Material oder ein Verfahren erfüllen muss. Alle Projektbeteiligten müssen zu diesem Zeitpunkt die Kriterien für das, was als Erfolg bewertet werden soll, die Art der Bewertung bzw. die Prüfmethode verantwortungsvoll festlegen. Dabei sind auch die erforderliche Zeit und die erforderlichen Mittel bereit zu stellen. Eine exakte Festlegung der Untersuchungen, Entwicklungen, Prüfungen und Bemusterungen muss auch im Hinblick auf die zu benennenden Kosten frühzeitig erfolgen. Es hat sich dabei bewährt, bei komplexeren Fragestellungen gleich von Anfang an den Abstimmungsgrund zur Herstellung der Proben, der Messtechnik, der Bewertung und der Musterapplikation vorzusehen.

Die Beteiligung von Restauratoren, die gleichermaßen Fachleute im Rahmen der Planung und der Ausführung sind, birgt Interessenskonflikte. Aus vergaberechtlichen Gründen ist die direkte Beauftragung der an der Entwicklung beteiligten Restauratoren mit der Ausführung der eigentlichen Maßnahme nicht zwingend gegeben. Auf ihre Erfahrungen und auf Musterapplikationen wird aber kaum zu verzichten sein. Gut bewährt hat sich eine Konstellation, bei der Planer und Restauratoren eng zusammen arbeiten.

In Fällen, in denen nach guten Erfahrungen und nach entsprechender Absicherung an mehreren Projekten ein breiter anwendbares Material oder Verfahren zur Verfügung steht, kann dies größeren Kreisen zugänglich gemacht werden. Bei einer Vermarktung des entstehenden Materials oder Verfahrens sind gesetzliche Vorgaben (Datenblätter, Sicherheitsdatenblatt, Umweltbestimmungen) zu erfüllen.

3 Beispiele für Material- und Verfahrensentwicklungen

Anhand von drei sehr unterschiedlich gelagerten Restaurierungen sollen Material- und Verfahrensentwicklungen in ihrem Projektumfeld dargestellt werden.



Bild 2
Sarkophag im Hatzfeldgrabmal
(Zustand nach der Sanierung,
Wiederaufbau)

3.1 Konservierung einer Acrylharz-volltränkung – Hatzfeldgrabmal

Die sehr fein gearbeitete Tumba aus Alabaster in der Bergkirche in Laudenbach zeigte bald, nachdem sie 1986 mittels Acrylvollharztränkung konserviert und wieder aufgebaut worden war, Schäden in Form von Rissbildungen, die sich zu massiven Verformungen und Schieferungen auswuchsen. Schon 1987 wurde das gerade restaurierte Objekt nochmals abgebaut und trocken eingelagert, da der Schaden schnell mit der vorangegangenen Restaurierung und der starken Durchfeuchtung des Aufstellungsortes in Verbindung gebracht wurde (Bilder 2, 3 und 5). Der Schadensfortschritt klang nach der Einlagerung im Schloss Weikersheim in den späten 80er Jahren ab.

Nach Bekanntwerden des Schadens wurden von der Denkmalpflege Sachverständige zur Klärung der Schadensursache und zur Entwicklung eines neuen Restaurierungskonzepts hinzugezogen. Das von ihnen entwickelte Restaurierungskonzept sah die Reduktion der Feuchtigkeit vor, die am Aufstellungsort in den Sarkophag eingebracht wurde so-



Bild 3

Putto Zustand vor 2000,
zerrissen von Treibreaktionen



Bild 4

Putto im Nachzustand
nach der erneuten
Restaurierung 2002



Bild 5

Stark verformte Reliefplatte des
Hatzfeldgrabmals nach der
vorangegangenen Restaurie-
rung Zustand vor 2000

wie eine kraftschlüssige Verfüllung der Risse mit einem PMMA-Material, das auf die Acrylharzvolltränkung anbinden würde [Grassegger, 2002]. Bereits in dieser Phase war das Projekt interdisziplinär angelegt, da schwerpunktmäßig Mineralogen und Organiker, aber auch andere Spezialisten zusammenarbeiten mussten.

Etwas später wurden auch Steinrestauratoren hinzu gezogen, um das erarbeitete Konzept an Versuchsstücken aus Alabaster umzusetzen. Zunächst

beruhte das Konzept für die Verfüllung und Kittungen z. T. auf sehr problematisch zu handhabenden reaktiven PMMA-Acrylaten. Sie reagierten auf einzelne Pigmentzugaben mit starker Blasenbildung und Verfärbungen. Die Materialien waren hoch giftig und in den erforderlichen Kleinmengen schwer ausreichend präzise zu dosieren. Das ursprünglich vorgesehene Material konnte aber zu Beginn der eigentlichen Restaurierungsarbeiten durch ein lösungsmittelbasiertes Acrylat ersetzt werden. Das gegenüber den ursprünglichen Rezep-

turen veränderte Konzept musste nochmals durch Untersuchungen abgesichert werden, die dann positiv verliefen. Die zur Anwendung kommenden Materialien waren in dieser Form noch nicht verarbeitet worden und forderten von den ausführenden Restauratoren eine sorgfältige Feinabstimmung.

Für die Wiederaufstellung in der Seitenkapelle der Bergkirche in Laudenbach mussten zukünftig die Klimabedingungen mit engen Korridoren für Temperatur und Luftfeuchtigkeit gewährleistet werden [LDA, 2002].

Das Grabmal ist trotz der ursprünglich schnellen Schadensentwicklung seit 12 Jahren wieder an seinem Ort und zeigt sich bis heute stabil (Bild 4).

3.2 Terracottamörtel

Die Entwicklung ging von einem Unbehagen gegenüber den bestehenden Ergänzungsmörteln für Terracotta aus, die etwa bis 1996 ausschließlich mehr oder weniger stark kunststoffgebunden waren. Angewendet werden sollte das entwickelte Material im Zuge einer umfangreichen Instandsetzung der Terracottabekleidung an einer Mauer der Wilhelma, dem Stuttgarter Zoo. Nachdem in den Vorjahren die Sandsteinteile weitgehend erneuert worden waren, sollten die sehr aufwändigen Terracottabeläge, die noch schwere, nur notdürftig mit Zementergänzungen geschlossene Kriegsschäden aufwiesen, restauriert werden (Bild 6).

Von der Denkmalbehörde und dem Hochbauamt wurden folgende Zielvorgaben für die Restaurierung festgeschrieben:

- möglichst weitgehende Materialidentität mit den Terracottastücken,
- möglichst weitgehend mineralische Bindemittel,
- kein Ausbluten,
- keine oder möglichst geringe längerfristige Entfärbung.

Ziegelsplitt, der in seiner Farbigkeit bereits an das bestehende Terracottamaterial angepasst sein sollte, war als materialprägende Zutat vorgesehen. Durch die Verwendung von hydraulischem Ziegelsplitt konnte der Zuschlag eine Teilfunktion als Bindemittel übernehmen. Als Bindemittel sind zu-



nächst kieselige Stoffe erprobt worden, indem Prismen und Keile auf die Terracottaplatten aufgebracht wurden. Damit konnte das Schwindverhalten und das Verhalten beim »Verbrennen« des Materials bewertet werden.

Die Proben auf der Basis unterschiedlicher kieseliger Bindemittel (Kieselsäureester, vorhydrolysierte Kieselsäureester, Kieselsol) zeigten ein typisches Erscheinungsbild für eine fehlende feine Matrix. Dies ließ sich durch eine Veränderung der Sieblinie der Zuschläge nicht beheben. Im Folgenden wurden unterschiedliche mineralische Bindemittel in unterschiedlichen Zusammensetzungen erprobt. Rezepturen mit einem sehr geringen Anteil an Weißzement als Bindemittel waren zunächst am erfolgversprechendsten und wurden für einen Winter der freien Bewitterung ausgesetzt. Es zeigte sich bald deren Neigung zum Ausbluten, d. h. weißlicher Ablagerungen auf der Oberfläche, was bei dem roten Grundmaterial eine starke ästhetische

Bild 6
Terracottabelag, Umgebungsmauer an der Wilhelma, Stuttgart



Bild 7
Bemusterung einer Steinsilikatklebung an der Oberhofenkirche Göppingen

Beeinträchtigung darstellte. Dieser Befund stellte das gesamte Projekt zunächst in Frage. Weitere Versuche konnten nur sehr zeitintensiv vorgenommen werden, da sich der Erfolg oder Misserfolg erst nach einer längeren Periode freier Bewitterung zeigen würde. Der Versuch, das Ausbluten durch eine geringe Zugabe von Acryldispersion zum Anmachwasser zu binden, war nur zum Teil erfolgreich. Bei weiteren Versuchen wurden Zink- und Calciumstearat dem Mörtel beigemischt, wodurch dieser leicht hydrophob wurde. Dies hatte schließlich den gewünschten Effekt. Am Ende des Projekts waren 178 Rezepturen erprobt worden.

Es zeigte sich in parallel verlaufenden praktischen Versuchen, dass sich die Rezeptur lediglich durch Veränderungen der Sieblinie der Zuschläge für die unterschiedlichsten Konservierungsaufgaben einsetzen ließ. Durch Entfernen der gröberen Fraktionen konnte das Material als Schlämme aufgetragen werden. Eine Beschränkung auf Zuschläge kleiner 100 µm ergab ein Material, mit dem sich auch Risse sehr gut verfüllen ließen.

Bei der Bearbeitung eines Musterfeldes sind zerstörte Terracottaformteile ersetzt worden und die Rückverankerung der sich lösenden Stücke erfolgte durch den Einbau von Edelstahlnadeln. Abschließend wurden die neu entwickelten Materialien für die kleinteiligen Konservierungsarbeiten eingesetzt. Im realen Baustellenbetrieb der Bemusterung zeigte sich allerdings eine starke Schwankungsbreite der Ziegelsplittqualität. Nach jeder Lieferung waren zunächst Proben zu fertigen und eine Fein-

abstimmung vorzunehmen, bevor der Ziegelsplitt verarbeitet werden konnte.

3.3 Steinsilikatkleber

Der Stand der Technik in den späten 1990er Jahren sah für den Einbau von Vierungen drei Möglichkeiten vor:

- Verklebung mit Epoxidharz,
- Versetzung mit Mörtel,
- Versetzung mit kunststoffvergütetem Mörtel.

Im ersten Fall, und bei nicht ganz optimaler Verarbeitung auch im letzten, entsteht eine feuchtesperrende Schicht, die zumindest bei größeren Vierungen zu Schäden in den Grenzbereichen der Klebung führen kann. Mörtelfugen führen grundsätzlich zu breiteren Fugen und haben eine sehr geringe Haftzugsfestigkeit.

In dieser Situation wurde begonnen, mit Verfüllungs- und Kittmaterial aus Kieselsäureester-Kalziumhydroxid-Rezepturen zu experimentieren. Die ursprünglich beabsichtigte Verwendung des Materials an der Steinoberfläche für Kittungen und Schlämme erwies sich wegen der sehr langen Reaktionsdauer als problematisch. Der Erfolg der Farbabstimmung konnte erst nach mehreren Wochen beurteilt werden. Das Material zeigte über einen sehr langen Zeitraum Farbveränderungen in Folge von Niederschlägen und Batauung.

Am Turm der Kilianskirche in Heilbronn sind zahlreiche Sandsteinvarietäten und Muschelkalke vorhanden. Der Bedarf für zahlreiche kleinere Reparaturen, die mit Vierungen geschlossen werden sollten, ist groß. An der Basilika in Weingarten stehen ebenfalls unterschiedliche Materialien, insbesondere problematische Molassesandsteine an. An der Oberhofenkirche in Göppingen sind grobkörnige, sehr stark saugende Stubensandsteine zu bearbeiten. Dies erforderte es, die Verwendung des Steinsilikatklebers an einem sehr breiten Spektrum von Steinmaterialien zu erproben und die Rezepturen jeweils auf die einzelnen Steinmaterialien abzustimmen (Bild 7).

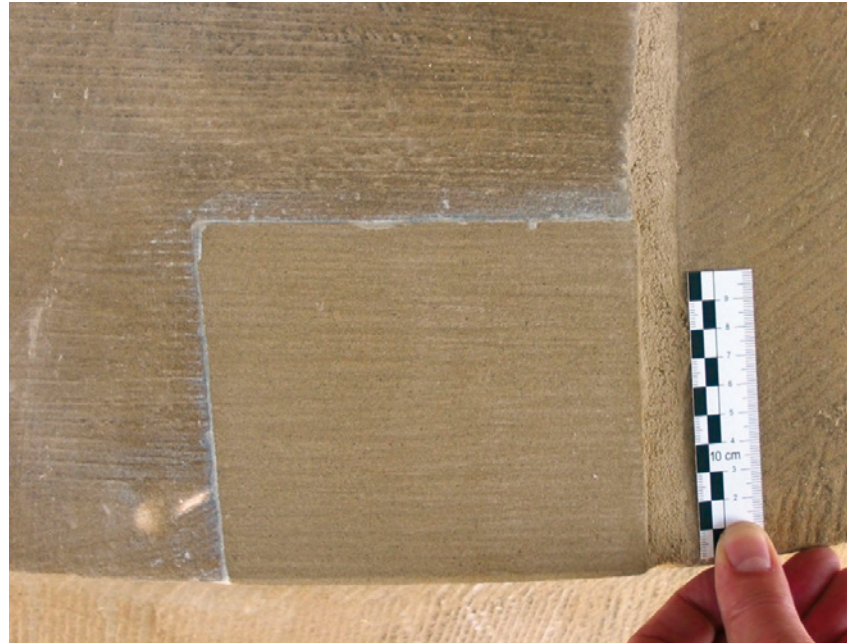
Nach einer Reihe von Versuchskörpern wurden von den Entwicklern, den Planern, den Bauherrn und dem Denkmalamt die Anforderungen an Steinsilikatkleber definiert und die Untersuchungsstrategie

und die Prüfverfahren festgelegt. Das Material sollte ein gutes Verhalten gegenüber Feuchtigkeit (Feuchtedehnung, Wasseraufnahme, Wasserdampfdiffusionswiderstand) und gegenüber dem Steinmaterial verträgliche mechanische Eigenschaften aufweisen (dyn. E-Modul, Druckfestigkeit, Wärmedehnungskoeffizient, Haftzugsfestigkeit). Eine Einstufung wurde an Hand des Eigenschaftsprofils bei der Qualitätsprüfung von Fugmörtel vorgenommen [Snethlage, Pfanner, 1997].

Versuche der Umsetzung erfolgten in Zusammenarbeit mit den am jeweiligen Objekt beauftragten Steinmetzen (Bild 8). Das Material wurde recht schnell akzeptiert, bald sogar wegen der frühen Überarbeitbarkeit geschätzt [Ettl et al., 2010]. Während einer weiteren Anpassung und Weiterentwicklungsphase wurde der Steinsilikatkleber von Stephan Busch hergestellt und vertrieben. Nachdem breite Erfahrungen in der Herstellung und im Umgang mit dem Steinsilikatkleber gemacht worden waren, ist die Herstellung des Produkts an eine Firma in Kirchheim/Thüringen übergeben worden.

4 Anforderung an Projektabläufe

Für die Qualitätssicherung ist eine Zusammenarbeit von Spezialisten aus der Planung, der Restaurierung und den Naturwissenschaften selbst-



verständlich notwendig. Am Beispiel des Steinsilikatklebers wird verdeutlicht, welche Kompetenzen für die erfolgreiche Entwicklung eines Restaurierungsmaterials erforderlich sind. Nicht nur die Materialkenntnisse, sondern auch organisatorische Fähigkeiten führen zum Erfolg eines Projektes. Zeitlich muss die Entwicklungsarbeit für geeignete Baustoffe so eingetaktet werden, dass die Ergebnisse bei allen Unwägbarkeiten rechtzeitig zur Verfügung stehen. Diese können dann in die Leistungsbeschreibungen für die Restaurierungsmaßnahme einfließen.

Bild 8
Einkleben einer schwalbenschwanzförmigen Vierung

Literatur und Quellen

- [LDA, 2002] LDA Heft 4/2002: Nachrichtenblatt des Landesdenkmalamtes Baden Württemberg, S. 207 ff, mehrere Artikel zum Hatzfeldgrabmal: Otto Wölbert, Die Leidens- und Restaurierungsgeschichte des Grabmals, S. 221 ff
- [Grassegger, 2002] Grassegger, G., (2002): Naturwissenschaftliche und technische Untersuchungen zu den Ursachen der Zerstörung und zur Entwicklung eines Restaurierungsverfahrens. Nachrichtenblatt des Landesdenkmalamtes Baden Württemberg, Heft 4/2002, S. 227 ff
- [Ettl et al., 2010] Ettl, H., Busch, St., Reiner, P., (2010): Neues zur Anwendung des Stein-Silikat-Klebers – Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften und Auszugsversuche an Gewindestäben. In: Patitz, G., Grassegger, G., Wölbert, O., (Hrsg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2010, Stuttgart, S. 33 ff
- [Auras et al., 2010] Auras, M., Meinhardt, J., Snethlage, R., (2010): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart
- [Snethlage, Pfanner, 1997] Snethlage, R., Pfanner, M., (1997): Leitfaden Steinkonservierung – Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart (1. Auflage)

Die Rolle des Architekten bei der Planung und Durchführung steinrestauratorischer Arbeiten

Welche Aufgaben der gestaltende Architekt im Spektrum denkmalpflegerischer Arbeit bei der Restaurierung hat, ist immer wieder Gegenstand von Diskussionen um Planungsinhalte und -anteile. Nur bei sehr oberflächlicher Betrachtung reduziert sich die Sanierungstätigkeit auf pure Schadensermittlung, Ausschreibung und Bauleitung. Auch wenn bei Farbfassungen u. ä. dem Restaurator und dem Bauforscher mit dem zuständigen Denkmalamt eine wichtige Rolle zukommt, ist die Komplexität des Untersuchungs-, Planungs-, Instandsetzungs- und nicht zuletzt des Pflegeprozesses nur durch einen Fachmann zu leisten, der alle Teile kennt und koordiniert. Selbst bei vermeintlich »reinen« Sicherungsarbeiten sind Konzepte für spätere Nutzungen an zu denken und Koordinierungen aller Spezialisten durchzuführen. Bei der Modernisierung eines Baudenkmals muss nicht in jedem Fall nach modernen Gestaltungsforderungen beim notwendigen Ersatz von Bauteilen, Ausstattungen oder bei funktionalen Erweiterungen gearbeitet werden. Jedoch ist das dem Denkmal innewohnende Potential an Planungskonflikten sehr komplex und stellt sich in vielen Fällen aufwändiger dar, als bei vergleichbaren Neubauten. Dies kann der Architekt durch die Komplexität seines Berufsbildes effektiv leisten.

Schlagwörter: Baudenkmal, Geschichtszeugnis, bauliche Hülle, werkgetreue Wiederholung/Bewahrung, Planungsprozess, Planungsvorbereitung, Begleitung von Restaurierungen

1 Ambivalenz eines Baudenkmals als Geschichtszeugnis und benutzte Hülle

Die scheinbare Trennung in Architektur und Denkmalpflege soll im Blickwinkel der grundsätzlichen Zielsetzung der Architektenarbeit betrachtet werden. Bauwerke, die der Mensch benutzt – egal wie alt –, sind stets Werke der Architektur, sind also Teil des Prozesses und das Ergebnis der künstlichen und künstlerischen Gestaltung der gebauten Umwelt für die Lebenstätigkeiten des Menschen.

Veränderungen, Reparaturen und Erneuerungen sind permanent. Also ist Baudenkmalpflege stets ein Teil des Architekturschaffens.

Im wissenschaftlichen Diskurs der divergierenden Standpunkte wird nicht selten auf »Vermittlungsdefizite als Ursache für Akzeptanzprobleme der Denkmalpflege« [Meier, 2012] verwiesen. Das Dilemma liegt jedoch im unterschiedlichen Grundverständnis. Hier haben verschiedene Akteure auch eigene Paradigmen im Umgang mit Denkmalsubstanz. Baudenkmale sind heute gesetzlich geschützte bauliche Zeugnisse, an deren Erhaltung

Ambivalenz des Denkmalbegriffs Baudenkmale sind	
Gesetzlich geschützte Zeugnisse	Werke der Architektur
Sachen, Sachgesamtheiten und Teile von Sachen, an deren Erhaltung aus wissenschaftlichen, künstlerischen oder heimatgeschichtlichen Gründen ein öffentliches Interesse besteht	Werke im Prozess und als Ergebnis der künstlichen und künstlerischen Gestaltung der baulichen Umwelt für die Lebenstätigkeiten des Menschen, an den utilitären Gebrauch, die ästhetische Kontemplation und den damit verbundenen Symbolgehalt gebunden.
Träger historischer Informationen und sozialer Kulturwerte	Baulicher Rahmen für das menschliche Leben

als Träger historischer Informationen und sozialer Kulturwerte ein öffentliches Interesse besteht. Sie sind aber auch Architekturwerke. Alle gebaute Umwelt ist an den utilitären Gebrauch und die ästhetische Kontemplation sowie an den damit verbundenen Symbolgehalt gebunden. Im Sinne Walter Benjamins gilt dies für Baudenkmale wie für alle Werke der Baukunst, die »auf doppelte Art rezipiert (werden): durch Gebrauch und deren Wahrnehmung« [Benjamin, 1936]. Die funktionalen und ideellen Werte eines Bauwerks werden über deren unmittelbaren Gebrauch vermittelt – und erst dann in deren Wahrnehmung im öffentlichen Raum. Ein Baudenkmal wird daher immer noch primär in seiner Benutzung wahrgenommen und muss sich in seiner Benutzung beweisen. Anders sieht dies bei Objekten mit abgeschlossener Nutzungsgeschichte aus (Freilichtmuseen, NS-Einrichtungen, archäologische Relikte oder Ruinen). Sind auch die Schwerpunkte andere, da die funktionalen Prämissen durch die Benutzung fehlen, die Komplexität der Planung für Sicherung und Präsentation des Werkes ist immer ähnlich hoch. Auch hier kommen innerhalb kurzer Zeit neue nutzungsintendierte Probleme der musealen Benutzung hinzu, die mit der Substanz als Informationsträger abgewogen werden müssen. Selbst bei archäologischen Relikten ist die technische Umsetzung der Bewahrung des historischen Zeugnisses nicht weniger problematisch, z. B. notwendiger Schutz vor Witterung, Verfall, Zerstörungen.

Ein »benutztes« Baudenkmal ist der bauliche Rahmen für das menschliche Leben. Daher muss es sich ständig weiter entwickeln. Fußböden, Fenster, Anstriche, Dachdeckungen, Haustechnik und vieles andere werden ständig erneuert. Vieles Alte verschwindet automatisch und damit auch dessen Zeugniswert. Nach empirischer Einschätzung gehen selbst bei äußerst behutsamer Modernisierung eines Wohnhauses bis zu 50 % der historischen Informationen verloren [Petzet, Mader, 1993]. Auch diese Veränderungen sind Teil des Denkmals. Sie sind jedoch viel schwerer zu diskutieren als Paradigmen von Erinnerungsorten ohne diesen Veränderungsdruck, also Objekte mit abgeschlossener Nutzungsgeschichte.

2 Aufgabe des Architekten – Werkgetreue Wiederholung oder Bewahrung der erlebten Geschichte

Im breiten Spektrum des denkmalpflegerischen Bauens ist die Frage der Wiederbringung verlorener oder gestörter Bauteile und der dabei anzusetzende schöpferische Anteil der Architektenleistung ein häufig diskutierter Aspekt. Um die Begriffe Rekonstruktion – Retusche – Reparatur – Nachempfindung kreisen divergierende Auslegungen. Die denkmalpflegerische Wahrheit liegt dabei, wie so oft, im Auge des Betrachters. Eine Prämisse dieser Debatte ist scheinbar die stetige Wiederholbarkeit der ursprünglichen Gestaltqualität eines Steinbauwerks. Die vielen, mehrfach kopierten Bildhauerwerke der Kunstgeschichte beweisen das wohl. Hat nicht auch ein »durchsaniertes Gebäude« Anspruch auf äußerliche Unversehrtheit, wo doch die technischen und kulturellen Potentiale dafür gegeben sind? Wäre es da nicht einfacher, preiswerter und langlebiger gewesen, die gestörte Sandsteinfassade des Waldschlößchens in Dresden zu kopieren?

Seit etwa 20 Jahren wird verstärkt versucht, das große Spektrum der Nachahmung von verlorenen Bauwerken oder seinen Teilen in die denkmalpflegerische Debatte zu implementieren. Der allseits prononcierte Begriff »Rekonstruktion« soll vermieden werden, da er unterstellt, eine vollständige formgetreue Wiedergabe eines verlorenen Architekturwerkes sei möglich, was in der Baupraxis so gut wie niemals der Fall ist. Moderne Gründungen, statische Konstruktionen und technische Ausrüstungen werden fast immer realisiert. Es geht bei alledem nur um die Herstellung eines idealisierten Abbildes der Oberflächengestalt. Selbst diese ist fraglich. Wiederaufbauten, wie die Frauenkirche in Dresden sind aber durchaus gesellschaftlich legitim, sollten jedoch nicht dem denkmalpflegerischen Œuvre zugeordnet werden. Intendiert durch die Sehnsucht, verlorene Stadtbilder, Bauwerke, Ensemble oder auch einzelne Teile davon zurück zu erhalten, wird auf der Grundlage von vermeintlich originalen Befunden, Plänen und Photographien

die Wiederherstellung verlorener Bauten oder ihrer Teile betrieben. Der öffentliche Publikumserfolg hat die Machbarkeit der Wiederauferstehung: eines verlorenen Bauwerks unter Beweis gestellt. Bei unkritischer Betrachtung kommt sogar die »Aura« des Kunstwerks im Sinne Walter Benjamins [Benjamin, 1936] in der »Einzigkeit des Kunstwerkes ... mit seinem Eingebettetsein in den Zusammenhang der Tradition« zurück.

Um einer generellen Unangemessenheit für derartige Wiederaufbauten vorzubauen, sei auf das Mittel der Denkmalpflege mit ihrer Arbeit mit Bildern, Stadtbildern hingewiesen, die in Ausnahmefällen instand gesetzt werden müssen. Es ist eindeutig, dass ein Baudenkmal niemals als »bauzeitliches Originalwerk« definiert werden kann, da es dem Prozess der Geschichte unterlag. Nur in Ausnahmefällen ist ein Bauwerk ohne planmäßig vorgenommene Änderungen auf den Ort überkommen. Es ist vielmehr das überlieferte Werk mitsamt seinen Umbauten und Überformungen, mit seinem Verfall und seiner Alterung (Bild 1).

Die Sandsteinfassade des Waldschlößchens in Dresden wurde in ihrer gesamten Geschichte nicht umgebaut. Sie ist vielmehr wegen des Bedeutungsverlusts der Neugotik und des Fehlens von Mitteln »nur« wegen mangelnder Pflege hinfällig geworden. Hierin liegt eine aber ganz entscheidende Zeugniskfunktion des Bauteils seiner Zeit.

Bei allen Baudenkmalen, bei denen die Erstfassungen nicht bekannt sind und viele Bauphasen nebeneinander stehen, wird deutlich, dass allgemein

- ein Baudenkmal in seiner Zeit das Ergebnis des ursprünglich geschaffenen Werkes und der durchlaufenen Geschichte ist, die planmäßige Umbauten, Reparaturen und Restaurierungen sowie Alterungs- und Verfallserscheinungen einschließt.
- jedem Denkmal »einerseits eine ideale künstlerische (oder technische) Urfassung (oder eine Sequenz aufeinander folgender), die uns ... oft nur in Resten erhalten bzw. erkennbar, nur (in Spuren) ... zugänglich und daher ebenfalls historischem Wandel unterworfen ist und andererseits eine reale, historisch gewordene Fassung« [Will, 2010] entspricht (Bild 2).



Bild 1

Dresden, Historisches Waldschlößchen, Zwischenzustand 2012 nach Abschluss der steinrestauratorischen Arbeiten vor späteren farblichen Anpassungen und der Putzretuschierung [Foto: Holger Schütze, 2012]

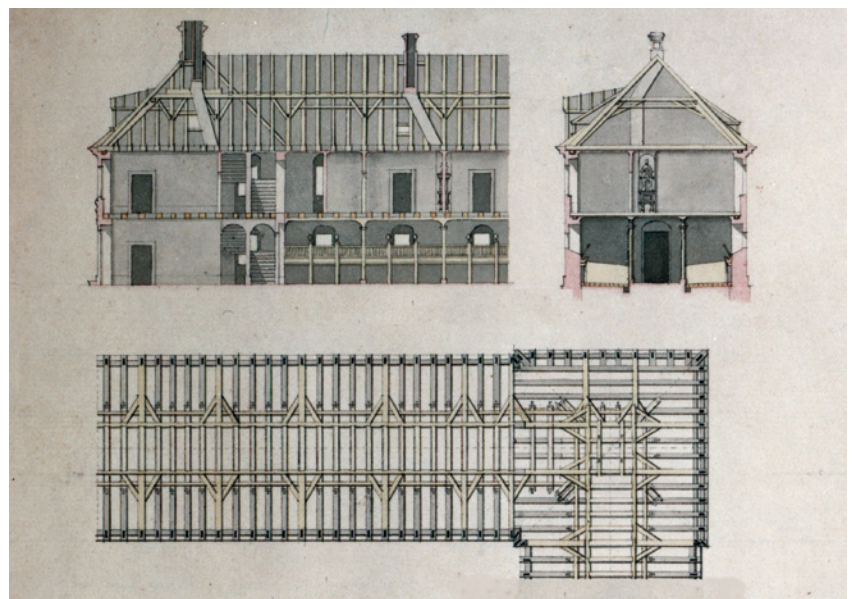


Bild 2

Moritzburg, b. Dresden, Landgestüt, Detailplan zur Errichtung eines Stallgebäudes für das Jagdschloss Moritzburg (später Landgestüt), Oberlandbauamt des Kurfürsten unter Matthäus Daniel Pöppelmann, 1733 (Planarchiv des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen).

- das überlieferte Werk mitsamt seinen Überformungen und Fehlstellen als Denkmal entweder als solches vorhanden ist oder, wenn entscheidende Teile fehlen, gar nicht. Es kann dann als Denkmal auch nicht durch noch so gut gemeinte Abbilder zurückgeholt werden.

3 Konflikte im modernen Planungsprozess

Gesetzlicher Grundsatz der Arbeiten an allen Baudenkmalen ist es, diese als Zeugnisse vergangener Zeiten und Kulturen zu erhalten. Die Aufgabe der Denkmalpflege besteht darin, sie möglichst unverfälscht in ihrer vorhandenen Substanz zu sichern

und an nachfolgende Generationen als »echtes« Kulturerbe weiterzugeben.

So, wie es in den Statuten vieler Landesämter für Denkmalpflege verankert ist, gerät dieser Anspruch bei vielen Beteiligten am Baugeschehen zum schwer lösbaren Widerspruch mit den notwendigen technischen Maßnahmen zur Nutzbarmachung eines Baudenkmals. Das sehr komplexe Gemenge an Widersprüchen zwischen den Eigenschaften eines historischen Bauwerks und modernen Vorschriften ist unübersehbar und nur noch schwer beherrschbar.

Wenn »sich Denkmalpflege als anwendungsorientierte Geschichtswissenschaft ..., sich als objektbezogene Erinnerungspraxis ... (versteht)« [Fliegler, 2001], hilft das weder den Ingenieuren noch den Denkmalpflegern in den zuständigen Ämtern. In vielen Fällen hält sich die wissenschaftliche Denkmalpflege aus den Fragen der praktischen, handwerklichen Tätigkeit heraus.

Auf der einen Seite werden in der heutigen Baukultur historische verlorene Bauwerke und Gebäude ohne Reflexion der erlebten Geschichte nach Gusto unter dem Vorwand einer denkmalpflegerischen Reparatur nachgebaut, wenn eine vermeintlich hinreichende Befundlage und eine genügend große öffentliche Meinungsbildung als Begründung verfügbar ist.

Auf der anderen Seite wird der Druck auf die bautechnische Hochrüstung aller Bauwerke, so sie der Benutzung durch den Menschen dienen, infolge von Bestimmungen und Verordnungen u. a. in Bezug auf Brandschutz, Schallschutz und nicht zuletzt Energieeinsparung stetig größer. Die Anforderungen, beispielsweise an Außenwandkonstruktionen durch die Energieeinsparverordnung (EnEV), sind durch historische Bautechniken nicht mehr erfüllbar. Gerade durch die gegenwärtige Politik, mit staatlichen Zuschüssen und strengeren Verordnungen die Energiekosten zu senken, werden viele Bauteile eines Denkmals durch die Diskrepanz ihrer Eigenschaften mit den neuen, technisch intendierten Ansprüchen an ihre Existenzgrenze gedrückt. Eine historische Sandsteinmauer mit beidseitigem Verputz ist für ein beheiztes Gebäude weder bauphysikalisch noch energetisch durch ihren indiskutablen U-Wert geeignet. Zur Wahl

steht hier, entweder die innere oder äußere Wandbekleidung und damit deren Zeugniswert aufzugeben.

Dies wirft neben ganz konkreten Fragen der Planung und Genehmigungsfähigkeit [Grunewald et al., 2010] auch ganz praktische Probleme der individuellen und gesellschaftlichen Bewertung (Erhalt oder Austausch) eines Bauwerks auf. Dies trifft insbesondere zu, wenn sich eine Modernisierung zudem im wirtschaftlichen Rahmen für den Eigentümer bewegen muss.

Ein historisch noch so wertvolles Kastenfenster hält in Bezug auf Luftdichtheit (Blower-Door-Test) und Wärmedurchgangskoeffizient der EnEV nicht stand. Das alte Diktum »Erhalten durch Nutzung« wird nicht nur in der Energiespardiskussion öfters in die Phrase »Erhalten trotz (moderner) Nutzung« gewandelt.

Der Widerspruch zwischen der technischen Aufrüstung eines Baudenkmals zur Erfüllung aller behördlichen Bestimmungen einerseits und der angestrebten Bewahrung der Substanz als Zeugnis überlieferter Kulturen andererseits mit all seinen Spuren wird immer eklatanter.

Mehr denn je, ist die verantwortungsbewusste Arbeit des qualifizierten Architekten gefragt und von ihm die jeweilige Sinnfälligkeit/Anwendbarkeit/Notwendigkeit jeder Vorschrift zu prüfen und mit Bauherrn und Behörden abzugleichen.

4 Grundsätze des Planungsprozesses

Bei jeder Planung ist es die Aufgabe des Architekten, im Prozess alle wirtschaftlichen, bautechnischen, juristischen, ästhetischen, stadtplanerischen Aspekte u. v. m. abzuwägen und zu harmonisieren. Im Denkmalsbereich kommen zahlreiche Anforderungen hinzu. Die Unterbewertung von einzelnen Teilen birgt stets die Gefahr, den Erfolg der Gesamtmaßnahme zu gefährden. Die aufgezeigte Komplexität und Widersprüchlichkeit macht die Notwendigkeit einer fundierten und qualifizierten Steuerung des Planungsprozesses durch den Architekten deutlich. Die Einflussnahme sollte dabei weit vor der Planung in der investiven Vorberei-

tung beginnen und lange nach Fertigstellung in der laufenden Pflege und Wartung andauern.

Die Grundlagen des architektonischen und denkmalpflegerischen Erfolges und der Nachhaltigkeit werden in der Rezeption der architektonischen und räumlichen Qualität und der Funktionalität, in dem Erkennen und Interpretieren des baulichen Wesens, seiner Struktur und Materialität, der Systematik und auch der Grenzen des Bauwerks gelegt. Bei vielen Baudenkmalen mit unterschiedlicher Nutzungsgeschichte werden die Grundlagen ihrer Um- bzw. Neunutzung in einer Revitalisierung aus dem gewachsenen Baubestand heraus definiert. Diese orientieren sich an Bauweise und Gefüge, dem räumlichen, geistigen und materiellen Angebot. Die Grenzen, die das Gebäude vorgibt, werden so zum verwendbaren Potential.

Der Architekt hat dabei die Rolle des Gesamtkoordinators zu erfüllen. Auch wenn die Schwerpunkte in jedem Projekt differieren, sind allgemeine Aufgabenstellungen und Arbeitsinhalte gleich. Es sind fast immer Fachleute unterschiedlicher Disziplinen erforderlich.

Keine der Fachdisziplinen darf und muss der Architekt allein ausfüllen. Ein Dilettieren in anderen Disziplinen ist weder effektiv noch sachdienlich. Wichtig ist es, abzuwägen, welche Fachleute man braucht, wo man diese findet und sie im Planungsprozess zu führen. Auch wenn bei renommierten Bauwerken der Restaurator eine primäre Rolle spielt, so darf die Abstimmung mit anderen technischen Forderungen nicht zu kurz kommen.

5 Methodik der Planungsvorbereitung an Natursteinbauwerken

Anhand der vorgestellten Arbeitsmethodik wird exemplarisch auf ausgewählte Schritte der Kooperation mit dem Steinrestaurator eingegangen, die teilweise dem Planungsprozess vorangehen oder in ihm eingebettet sind. Untersetzt werden diese mit Beispielen zweier Baudenkmäler, dem Schloss Altenstein in Bad Liebenstein, Thüringen (Bild 3) und dem Historischen Waldschlößchen Dresden (Bild 1).

Aufgaben in der Projektsteuerung der Spezialdisziplinen	
Restaurierung	Notwendige Leistungen: 1. Vorschläge für geeignete Fachleute 2. Erarbeitung Aufgabenstellung, Zieldefinition, Nomenklatur des Objektes 3. Honorarvorschläge, Angebotsbewertung 4. Koordination/Kontrolle von: <ul style="list-style-type: none"> ■ Terminen (Projektablaufplan) ■ Inhalten (Abgleich mit Fachbehörden) ■ fachlicher Qualität ■ Einhaltung des Finanzrahmens (Zahlplan, Controlling) 5. Erreichen definierter Untersuchungsziele 6. Nutzbarkeit der Ergebnisse für Beteiligte 7. Kommunikation aller Beteiligter 8. Einarbeitung in andere Fachprojekte
Bauforschung	
Steinrestaurierung	
Statiker	
Brandschutz	
Bauphysik	
Energieberatung	
Holzschutz	
Gebäudetechnik	
Rechtsberatung	
Baugrund	



Das Schloss Altenstein (Bild 3) ist geprägt durch eine fast vollständige Natursteinfassade. Ursprünglich wies die Fassade eine vollflächige Putzschlämme auf, von der nur Spuren nachgewiesen werden konnten. In die Natursteinfassade integriert sind Baureste des Vorgängerbaus, die so egalisiert worden waren. Markant sind die Architektur-Gliederungselemente aus sehr fein gearbeiteten Sandstein- und Kalkstein-Elementen und die Bruchstein-mauerwerksflächen des Fassadenfonds.

Das 1982 ausgebrannte Schloss Altenstein erhält seinen Wert und architektonischen Rahmen durch die exzellente große Parkanlage nach englischem

Bild 3
Bad Liebenstein, Park und
Schloss Altenstein, Zustand
2009 [Foto: Möser].

Vorbild des späten 18. Jahrhunderts, die in einer Reihe mit Wörlitz, Branitz oder Muskau genannt werden muss. Das Schloss ist repräsentativer Kulminationspunkt des Architekturlebens, aber auch zugleich integrierter Bestandteil der Parkarchitektur. Der anstelle einer mittelalterlichen Burganlage befindliche Schlossbau von 1799 wurde in den Jahren 1888–1889 durch den Hofbaumeister Albert Neumeister für Georg II. von Sachsen-Meiningen in den Formen der Neorenaissance nach englischen Vorbildern grundhaft umgestaltet. Es gelang eine harmonische Integration des Schlosses in den sich ständig verändernden Park, der in den Jahren 1890–1900 vor allem im schlossnahen Bereich umgestaltet wurde.

Das Historische Waldschlößchen Dresden (Bild 1) ist durch seine Einzigartigkeit als frühes neugotisches Bauwerk und seine imposante Schauwand mit Verblendungen und neugotischer Ornamentik aus Sandstein in der Art der Staffagearchitektur des späten 18. Jahrhunderts besonders hervorzuheben. Die Sandsteinfassade war ursprünglich geschlämmt, was im Zuge der Restaurierung nicht wieder aufgegriffen wurde, da es zu wenig eindeutige Befunde gab und zudem der Wartungsaufwand sehr hoch eingeschätzt wurde. Das zunächst als »Land«- oder »Jagdhaus« bezeichnete Gebäude, das seit 1836 den Namen »Waldschlößchen« trägt, wurde im Auftrag von Camillo Graf Marcolini nach neueren Bauforschungsergebnissen in den Jahren 1799 bis 1804 in mehreren Etappen errichtet [Sturm, 2010]. Es ist nach dem »Plauenschen Tor« in Potsdam (1755) und dem »Gotischen Haus« im Park von Wörlitz (1786/87) eines der ältesten neugotischen Bauwerke in Deutschland. Englische Vorbilder wie Strawberry Hill (ab 1749) inspirierten den Bauherren und den Architekten Gottlob-Friedrich Thormeyer (1775–1842) [Grohmann, 1804]. Die imposante, reich gegliederte neugotische Sandsteinfassade ist erst das Ergebnis der letzten Phase der äußerst kurzen Baugeschichte. Es wurde bis 1992 als Wohnhaus genutzt, genoss aber selten den nötigen Unterhaltungsaufwand.

Folgenden Planungsschritten wird in der Planungsarbeit des Architekten besondere Aufmerksamkeit zuteil:

1. Grundsätzliche Zielstellungen, Aufstellen eines Anforderungskonzeptes, Investitionsplan

Meist ist eine differenzierte Vorbereitungsphase mit Gebäudebewertung, Kaufberatung, Investitionsplanung, Klärung von generellen Nutzungsmöglichkeiten, übergeordneten Planungsprämissen, Recherche nach vorhandenen Unterlagen und nicht zuletzt einem robusten Gerüst für die Planung, Bauumsetzung und Wartung des Bauwerks zu leisten. In dieser Phase ist häufig die Konsultation von Fachleuten und der Denkmalbehörde ratsam. Wichtig an dieser Stelle ist das Herausarbeiten der Nutzungsbedürfnisse des Bauherrn und der Haupteigenschaften des Bauwerks, um Konflikte frühzeitig zu vermeiden.

2. Bauaufnahme als Dokumentation und Planungsinstrument

Die Definition von Anforderungen und Ansprüchen an eine qualifizierte Bauaufnahme und die wirtschaftliche und fachliche Vergleichbarkeit von Bauaufnahmen ist ein allgemeines Desiderat. Hierfür fehlen trotz einschlägiger Empfehlungen häufig genaue Arbeitsgrundlagen und die nötige Erfahrung beim Bauherren. Effektiv ist eine vorbereitende Aufgabenstellung und Ausschreibung unter qualifizierten Vermessern mit allen benötigten Inhalten, Genauigkeitsgraden, Aufnahmebestandteilen, Fixierung der aufzunehmenden Bauteile, Ausstattungen, Befunde, Schäden und Konstruktionen. Maßstäbe, Aufnahmetechniken, Arbeitsbereich und Darstellungskriterien (Layerstrukturen u. ä.) sollten vom Architekten vorgegeben werden. Dabei muss geprüft sein, welche Bauwerksteile aufgenommen werden sollen, welche Inhaltstiefe (nicht immer ist eine Genauigkeit von ± 1 cm notwendig), welche Details und Oberflächen erreicht werden müssen. Die Terminabfolge und Wirtschaftlichkeit muss beachtet werden. Gerade aus Kostengründen sollte überlegt werden, ob entzerrte Messbilder, stein- und fugengerechte Aufnahmen o. a. erforderlich sind.

3. Erstellung eines Raumbuchs und Detaildokumentationen

Die umfassende Aufnahme der Ausstattungen und Oberflächen in einem Raumbuch ist gerade bei größeren Bauten ein Gebot der Gründlichkeit und

Baudenkmal	
Wissenschaftliche Bauforschung	Erfassung im Architekturprozess
<ul style="list-style-type: none"> ■ Dokumentation aller historischen Befunde, Materialien und Gefüge ■ Entziffern historischer Quellen ■ Herausarbeiten der Genese mit allen Veränderungsspuren, Kunstwissenschaftliche Bewertung ■ Baualtersbestimmung als wissenschaftliche Erkenntnis ■ Kenntnis der historischen Bauformen und Bautechniken als vergleichende Information 	<p>Erfassung des Bauwerks in seinen Maßen, Bautechniken, Materialien und seinem technischen Bauzustand</p> <p>Dokumentation historischer Befunde als denkmalpflegerische Planungsgrundlage</p> <p>Grundlagen für architektonische Bewertung und die ästhetische und technische Integration in den Bauprozess</p>
<p>Ziel:</p> <p>Bewahrung des Denkmals als Träger kultureller und historischer Informationen nach wissenschaftlichen Prämissen</p>	<p>Ziel:</p> <p>Bewahrung – Wiederherstellung – Schaffung von Architektur in ästhetischer, funktional-technischer und kultureller Einheit</p>

ein effektives Werkzeug für die gesamte Voruntersuchung, die Planung und Bauüberwachung. Die fotografische und beschreibende Aufnahme nach einer festzulegenden, verbindlichen Nomenklatur (Bauwerksteil, Geschoss, Raum, Wandbereich, Türen/Fenster usw.) ist mittels Datenbanken und digitaler Verarbeitung wirtschaftlich immer vertretbar und für spätere Fragestellungen oft ein unersetzbares Hilfsmittel.

4. Historische Bauforschung, Erfassung von Schäden und baulichen Befunden

Nachdem die vorangegangenen Schritte meist vom Vermessungsingenieur und vom Architekten geleistet werden können, sind nachfolgend Spezialisten gefragt, deren Einbeziehung in puncto Notwendigkeit, Wirtschaftlichkeit, Terminabfolge, Abstimmung und Ergebnisverwertung für den Bauherrn frühzeitig in der Phase der Investitionsvorbereitung geplant und empfohlen werden muss. Die Grundlagen, Inhalte, Finanzrahmen dieser Voruntersuchungen müssen vom Architekten ebenfalls geplant und überwacht werden. Im Ergebnis der Spezialuntersuchungen sind wichtige Ergebnisse zum Baualter und zur Bauabfolge, Konstruktionsdetails, Bauschäden, Umbauspuren, Verformungen u. v. m. als wichtige Planungsgrundlagen verfügbar, die untereinander abgestimmt und gegenseitig verfügbar sein müssen.

5. Restauratorische Farb- und Putzuntersuchungen
 Restauratorische Grundlagenermittlungen mit Farb- und Fassungsuntersuchungen sind häufig parallel zu den detaillierten Erfassungen zu leisten und stellen einen unabdingbaren Bestandteil für die Bewertung der Denkmalwürdigkeit und der daraus folgenden Planungsgrundlagen dar. Farbbefunde und Aussagen über bauliche Veränderungen, Baufugen sind für alle Planungsfragen wie Baualtersbestimmungen, Oberflächenbehandlung, Installationen, Bauöffnungen von großer Bedeutung. Auch hier muss eine klare Zieldefinition, Nomenklatur sowie ein Finanz- und Zeitrahmen gesetzt werden.

6. Statische Begutachtung, Steinzustandserfassung, Holzzustand, Spezialgutachten

Der bauhistorischen Erfassung und Auswertung folgt eine, auf die Planungsanforderungen abgestimmte Detailrecherche, eine spezialisierte Schadensaufnahme und -bewertung durch verschiedene Fachingenieure für Restauration, Holzschadensgutachten, Schadstoffuntersuchungen, bauphysikalische Untersuchungen, Baugrunderkundung u. v. a.

Am Schloss Altenstein wurde nach Vorlage der Bauaufnahme und restauratorischen Dokumentation eine umfassende und dezidierte Steinzustandserfassung durchgeführt. Nach der Festlegung der konservatorischen und architektonischen Ziele

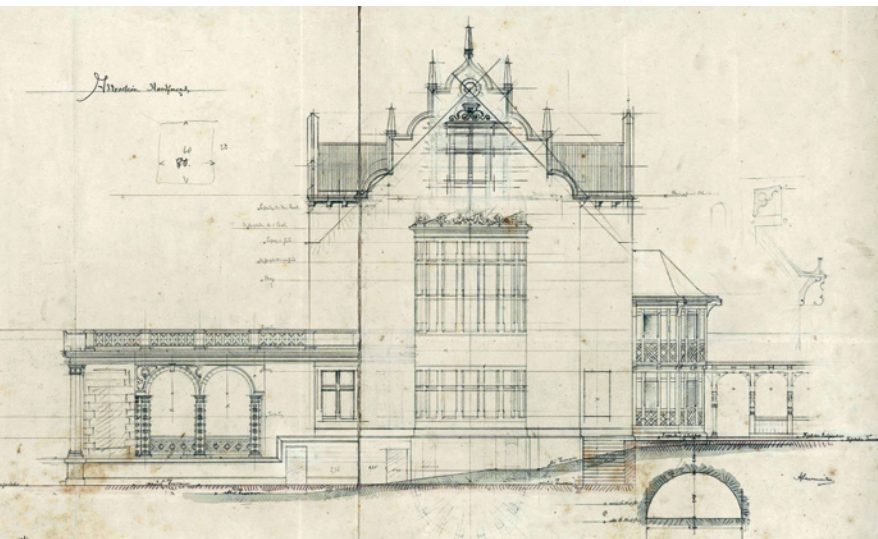


Bild 4
Bad Liebenstein, Schloss Altenstein, Ansicht von Norden, Planung für den Umbau des Schlosses 1888, Arch.: Alfred Neumeister, Ansicht von Norden (ThStA Meiningen, Hofbauamt, Mappe 1, Bl. 14b).

konnte auf der Basis der Musterflächen eine detaillierte Zielplanung für die steinkonservatorischen Arbeiten für Fachfirmen erstellt werden. Die Zielstellung aller Erkundungen und Dokumentationen war hier klar auf einen fundierten Erkenntnisgewinn zur praxisorientierten Restaurierung des Schlosses ausgerichtet. Wissenschaftliche Erkenntnisse darüber hinaus sind häufig ein Mehrwert, hier jedoch nicht im Untersuchungsumfang enthalten, da bei kunsthistorisch intendierten Forschungen meist größere Aufwendungen mit anderen Fragestellungen behandelt werden.

In dieser Phase werden alle benötigten Spezialgutachten mit Aussagen zum Baugrund, zu bauphysikalischen Fragen, zu Kontaminationen, Fledermauspopulationen u. a. gewonnen.

Gerade bei einer größeren Anzahl von Spezialuntersuchungen ist vor Projektbeginn das Ziel, der Umfang, der Zeit- und Finanzrahmen, eine eindeutige Nomenklatur und dezidierte Aufgabenstellungen, die Fragen benachbarter Fachgebiete enthalten, aufzustellen. Ein klar definierter Arbeitsrahmen schützt vor unnützen Untersuchungen oder nachträglichen Honorarkosten. Kompetenzen in der Vorbereitung, der Kommunikation und im Controlling sind in der planungsvorbereitenden Phase sehr häufig nicht klar geregelt. Hier liegt eine Kernaufgabe des Architekten.

7. Archivarische Recherchen

Die möglichst umfassende Recherche nach älteren oder unbekannten Unterlagen, Plänen und Schrift-

gut ist in der Denkmalpflege eine notwendige und nützliche Leistung, die nicht selten wertvolle Aussagen zu verlorenen oder verdeckten Bauteilen liefert. Die Bewertung der Denkmalwürdigkeit wird durch eine umfassende historische Kenntnis des Bauwerks unterstützt. In der Praxis ist hier häufig der finanzielle Rahmen zu gering geplant, was der Qualität schadet (Bild 4).

8. Archäologische Grabungen

Die Notwendigkeit von archäologischen Sondierungen und Dokumentationen ergibt sich aus erforderlichen Eingriffen in den Baugrund. Sie können und müssen rechtzeitig geplant und mit den Denkmalbehörden abgestimmt werden.

9. Baugeschichtliche Auswertung und Fixierung der denkmalpflegerischen Zielstellung

Der fachliche und administrative Kontakt zu den zuständigen Denkmalbehörden ist bereits in der Frühphase jedes Projektes zu suchen. In aller Regel zahlt sich eine enge Abstimmung bei der Erarbeitung der Aufgabenstellungen, der Auswahl von Spezialisten und der Planungsziele durch eine hohe Effizienz bei der Planung und Umsetzung aus. Die Auswertung und Zusammenfassung aller Recherchen mündet in die Erarbeitung der denkmalpflegerischen Zielstellung, die unbedingt in die Hand des erfahrenen Architekten gehört, da nur die Symbiose aller Aspekte des Bauwerks und der Planungsziele eine Basis für den Erfolg sein kann. Sie werden so ebenfalls essentieller Bestandteil erster Planungen zur Klärung funktionaler und technischer Fragestellungen. Oft führt die Geringerschätzung bestimmter technischer Planungsanforderungen und Vorschriften zugunsten einer weitgehenden Befundkonservierung zu einem Ungleichgewicht im Gesamtprojekt. Der Architekt muss nach der umfassenden Befunddokumentation federführend an der architektonischen Zielstellung mitwirken, wo neben Fragen der Befundkonservierung und -präsentation auch ästhetische und funktionale Aspekte erfüllt sein müssen. Eine intensive Abstimmung mit Bestätigung der Zielstellung durch das Denkmalamt ist unabdingbar. Man darf nicht außer Acht lassen, dass neben allen konservatorischen Anstrengungen immer ein überzeugendes architektonisches Ergebnis – in

ästhetischer, technischer und wirtschaftlicher Hinsicht – geliefert werden muss.

10. Weiterführung der Bauaufnahme und vertiefende Dokumentationen zu Schäden und Befunden während der Planung und Bauphase gebietet die denkmalpflegerische Sorgfalt.

11. Aufstellen von Pflege- und Bauunterhaltsplänen für eine laufende Wartung aller Bauteile mit Fristen, Inhalten, Verantwortlichkeiten, Kostenrahmen

Für beide Bauwerke, das Schloss Altenstein und das Historische Waldschlößchen, bei denen die historistischen Bauphasen zwar bekannt, jedoch

weitgehend durch Brand, Verschleiß oder Umbauten verändert sind und wichtige Bauphasen nebeneinander stehen, gilt, dass beide Denkmale trotz unterschiedlicher Geschichte und Nutzungen in ihrer Zeit das Ergebnis der durchlaufenen Abfolge mit ihren Umbauten, Reparaturen, Alterungs- und Verfallerscheinungen sind. Die überlieferten Bauwerke können und sollen nicht in ihren Urzustand zurückversetzt werden. Die Konservierung von Befunden und Fassungsresten jedoch allein reicht nicht, um eine vollwertige ästhetische Gesamtraumfassung zu erhalten. Am Schloss Altenstein und am Waldschlößchen werden so ausgewählte Bauteile und Raumfassungen nach gesicherter Befundlage als wichtige Verständnishilfen für das Gesamtwerk wieder hergestellt.

Literatur und Quellen

- [Meier, 2012] Meier, H.-R., (2012): Vermittlungsdefizite – Ursache gegenwärtiger Akzeptanzprobleme der Denkmalpflege? In: Kommunizieren Partizipieren. Neue Wege der Denkmalvermittlung. Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz, Band 82, Bonn
- [Petzet, Mader, 1993] Petzet, M., Mader, G., (1993): Praktische Denkmalpflege. Stuttgart, 1993
- [Benjamin, 1936] Benjamin, W., (1936): Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. In: Allegorien kultureller Erfahrungen, Reclam-Verlag, Leipzig, S. 414, 432
- [Will, 2010] Will, T., (2010): Zur Werktreue in der Denkmalpflege. In: Bildung und Denkmalpflege, 78. Tag für Denkmalpflege. Jahrestagung der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland, Brandenburg an der Havel (Forschungen und Beiträge zur Denkmalpflege im Land Brandenburg Bd. 12, hg. von Detlev Karg), Worms, S. 102–106
- [Fliegler, 2011] Fliegler, D., (2011): Dialogische Erinnerungsräume – Neue Wege in der Denkmalpflege. In: Die Politische Meinung, Sankt Augustin
- [Grunewald et al., 2010] Grunewald, J., Will, T., Pohl, M., (2010) : Pilotstudie zum Modellprojekt des Sächsischen Staatsministeriums des Innern: Energetische Sanierung von Baudenkmalen. Technische Universität Dresden; Fakultät Architektur; 2. korrigierte Aufl., Dresden, sowie: Energetische Sanierung von Baudenkmalen, Handlungsanleitung für Behörden, Denkmaleigentümer, Architekten und Ingenieure. Sächsisches Staatsministerium des Innern (Hrsg.), Dresden 2011
- [Sturm, 2010] Sturm, A., (2010): Dendrochronologische Untersuchungen durch Dr. Albrecht Sturm. Institut für bewahrende Erneuerung historischer Bauwerke, Pirna (unveröffentlicht)
- [Grohmann, 1804] Grohmann, J. G. (Hrsg.), (1804): Ideenmagazin für Liebhaber von Gärten, englischen Anlagen und für Besitzer von Landgütern. (Heft 41, Blatt VIII), Leipzig; rezensiert wurde der Entwurf u. a. in der Jenaischen Allgemeinen Literaturzeitung, JALZ, Nr. 249, Jena

Auswahlverfahren für die Vergabe von Leistungen in der Denkmalpflege

Die Wahl des Ausschreibungsverfahrens ist entscheidend für den Erfolg einer Restaurierungsmaßnahme. Dafür stehen unterschiedliche Vertragswerke (VOB, VOF) und unterschiedliche Vergabearten zur Verfügung, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Öffentliche Ausschreibungen sind wenig geeignet, da in ihrem Rahmen in der Regel nur Mindestanforderungen der Qualifikation der Restauratoren geprüft werden können. Bei einem öffentlichen Teilnahmewettbewerb kann diese Überprüfung im Vorfeld stattfinden. Freihändige Vergaben können bei Aufträgen erfolgen, bei denen besondere Umstände eine Ausschreibung ungeeignet machen. Vergaben im Rahmen der VOF erfolgen im Verhandlungsverfahren nach vorherigem Teilnahmewettbewerb.

*Klaus Lienenrth
Peter Reiner*

Schlagwörter: Vergabe, VOB, VOF, Ausschreibung, öffentliche Ausschreibung, Teilnahmewettbewerb, beschränkte Ausschreibung, freihändige Vergabe

Für die Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen in der Denkmalpflege gilt es, im Vorfeld sämtliche Planungsschritte mit Eigentümer, Denkmalpflege und Nutzer abzustimmen und über Restaurierungen die Qualitätsanforderungen und die Ästhetik zu bestimmen. Um für die jeweiligen Arbeiten die geeignetsten Auftragnehmer zu finden, werden unter Beachtung der Vergaberichtlinien unterschiedliche Auswahlverfahren angewendet.

1 Vergabearten

Die Ausschreibung und die Vergabe von öffentlichen Bauaufträgen werden in der Verdingungsordnung für Bauleistungen Teil A (VOB/A) festgelegt. Dabei existieren unterschiedliche Arten der Vergabe.

Öffentliche Ausschreibungen sind Verfahren, in denen eine unbeschränkte Anzahl von Unternehmen öffentlich zur Abgabe von Angeboten aufgefordert wird. Diese Verfahrensart ist für Arbeiten an Kulturdenkmälern deshalb ungeeignet, weil regelmäßig besondere Anforderungen an die Art der Durchführung gestellt werden, die nicht von jedem Betrieb ausgeführt werden können. Die Ausschreibungen

sind hier deshalb in aller Regel auf Leistungserbringer mit eben der gewünschten Eignung zu beschränken.

Bei der *beschränkten Ausschreibung* nach öffentlichem Teilnahmewettbewerb wird aus dem Bewerberkreis eine begrenzte Anzahl von Unternehmen zur Einreichung von Angeboten bestimmt. Nach dem Teilnahmewettbewerb kann anhand eines Kriterienkatalogs die besondere Eignung festgestellt und nach einer Bewertung mittels Punktesystem diejenigen Teilnehmer für den Versand der Leistungsverzeichnisse ausgewählt werden, die für die gestellte Aufgabe das bestmögliche Ergebnis erwarten lassen. Nach Rücklauf der ausgefüllten Leistungsverzeichnisse erhält das unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten angemessenste Angebot den Zuschlag.

Freihändige Vergaben sind Verfahren, bei denen sich die Auftraggeber mit oder auch ohne Teilnahmewettbewerb grundsätzlich an mehrere ausgewählte Unternehmen wenden, um mit einer oder mehreren Firmen über die Auftragsbedingungen zu verhandeln. Diese Vergabeart findet Anwendung bei Aufträgen, die zur Ausschreibung wegen besonderer Umstände nicht zweckmäßig und somit ungeeignet sind.



Bild 1 Bei beschränkten Ausschreibungen und freihändigen Vergaben werden mehrere, in der Regel mindestens drei bis fünf Bieter, zur Angebotsabgabe aufgefordert.

Ein weiteres *Vergabeverfahren* erfolgt nach der *Verdingungsordnung für freiberufliche Leistungen (VOF)*. Die VOF findet Anwendung für die Vergabe von Leistungen, die im Rahmen einer freiberuflichen Tätigkeit erbracht oder im Wettbewerb mit freiberuflich Tätigen angeboten sind. Die Aufträge werden im Verhandlungsverfahren mit vorheriger öffentlicher Aufforderung zur Teilnahme (Teilnahmewettbewerb) vergeben. Auch hier wird, wie bei der beschränkten Ausschreibung, nach einem Kriterienkatalog im Rahmen einer qualifizierten Bewerbung und eines Bewerbungsgesprächs eine Bewertung vorgenommen und der für die Aufgabenlösung am besten geeignete Bewerber ausgewählt. Die Vergütung für diese Leistungen erfolgt nach Honorarordnungen, die für alle Bewerber gleichermaßen gelten, weshalb die Honorarhöhe für die Auswahl des Leistungserbringers nur untergeordnet von Bedeutung ist.

Kulturdenkmale von besonderer Bedeutung wie z. B. die Kloster- und Schlossanlage Salem erfordern von Bauherren/Auftraggebern, Denkmalschutzbehörden, Planern und allen weiteren Entscheidungsträgern genaue Vorüberlegungen und einen steuernden Ansatz bei der Wahl der Verga-

beart. Höchste Priorität ist der qualitätsvollen Umsetzung der Instandsetzungsmaßnahmen zu widmen. Dieses Ziel kann nur durch die beschränkte Vergabe von Bauleistungen nach VOB an Betriebe erreicht werden, die eine profunde Erfahrung in denkmalpflegerischen Arbeiten haben. Eine Wettbewerbsöffnung kann durch den öffentlichen Teilnahmewettbewerb mit sorgsam erarbeitetem Kriterienkatalog für das beschränkte Verfahren erfolgen. Mit den Suchverfahren und Vergaben nach VOF für die freiberuflichen Leistungserbringer wurden auch mit den freiberuflichen Restauratoren äußerst positive Erfahrungen innerhalb der vorgegebenen Kostenbudgets gemacht.

Die Entscheidung für diese Vergabearten ist im Vorfeld rechtzeitig durch den Bauherrn festzulegen und bei Bedarf von den Planern und Denkmalschutzbehörden mit Nachdruck zu fordern.

2 Vergabe nach VOB am Beispiel Steinerneuerung im Sternenhof der Prälatur im Schloss Salem

Im Sternenhof der Prälatur im Schloss Salem (Bild 1) standen schadhafte Steinteile des Sockelgesimses und des Sockelmauerwerks zum Austausch an. Im Bereich der Fenstergesimse wurde vollständig auf einen Steinaustausch verzichtet, um die Reste der Malereien der Fensterumfassungen nicht zu gefährden.

Als Austauschmaterial wurde Rorschacher Sandstein vorgesehen, der dem Originalsteinmaterial weitgehend in Farbe und Struktur entspricht. Ein geeigneter Auftragnehmer mit Spezialisierung in der denkmalpflegerischen Arbeit war für den Steinaustausch zu ermitteln. Die Vergabe des Auftrags an einen geeigneten Bieter sollte nach beschränkter Ausschreibung mit öffentlichem Teilnahmewettbewerb erfolgen, weil die zu erbringende Leistung nach ihrer Eigenart nur von einem begrenzten Kreis von Firmen in geeigneter Weise ausgeführt werden konnte. Zunächst wurde der Veröffentlichungstext zwischen Bauherr/Auftraggeber und verantwortlichem Planungsbüro abgestimmt, der Leistungsumfang umschrieben und die zu erbringenden Nach-

weise benannt. Die Veröffentlichung erfolgte auf mehreren Plattformen. Nach Ablauf der Bewerbungsfrist von üblicherweise ca. drei Wochen lag eine Vielzahl von Bewerbungen vor. Jeder Bewerber hatte mit dem Teilnahmeantrag zum Nachweis seiner Fachkunde, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eine, falls eine Registrierung vorliegt, direkt abrufbare Eintragung in die allgemein zugängliche Liste des Vereins für Präqualifikation von Bauunternehmen e. V. (Präqualifikationsverzeichnis) nachzuweisen. Der Nachweis der Eignung konnte auch durch Eigenerklärungen erbracht werden. Entsprechende Referenzen, die mit der beschriebenen Leistung vergleichbar sind, hatte der Bewerber ebenfalls vorzulegen.

Bereits vorliegende Erfahrungen mit dem Bewerber, insbesondere während des Bauablaufs an vergleichbaren Projekten, die Umsetzung der Absprachen mit der Bauleitung, die rechtzeitige Vorlage der geforderten Unterlagen wie z. B. Steinlisten oder Rapporte sind entscheidend für die Bewertung durch den Auftraggeber.

Die Unterlagen sind durch den Bauherrn/Auftraggeber hinsichtlich Vollständigkeit geprüft worden. Nach Bewertung der wirtschaftlichen und finanziellen sowie technischen Leistungsfähigkeit der einzelnen Bewerber wurde die Teilnehmerauswahl, in der Regel zwischen fünf und acht qualifizierte Bewerber, für die beschränkte Ausschreibung ermittelt.

Für das Ergebnis der Ausschreibung ist entscheidend, dass die ausschreibende Stelle das Leistungsverzeichnis vollständig technisch richtig und stimmig erstellt hat. Jede Einzelposition muss auskömmlich kalkulierbar sein. Mischkalkulationen sind unzulässig. Mit Angebotsabgabe ist die Preiskalkulation einzelner Hauptpositionen offen zu legen. Bei der Prüfung ist zum Beispiel der Zeiteinsatz zu hinterfragen oder sogar im Zweifel an einem Musterstück beproben zu lassen.

Im Laufe der Ausschreibungsphase sind vom Bieter auftretende Fragen und Unstimmigkeiten wie z. B. fehlerhafte Maßeinheiten direkt mit der Vergabestelle zu klären. In Einzelfällen werden dann alle Bieter durch die Vergabestelle über die fehlerhaften Textangaben im Leistungsverzeichnis informiert.

Bei der Kalkulation der Einzelposition sind durch den Bieter baustellenspezifische Besonderheiten oder baustellenbedingte Erschwernisse zu berücksichtigen. Dies kann die beschränkte Fläche für die Baustelleneinrichtung oder der erschwerte Baustellenzugang sein. Nach der Submission werden die vorliegenden Angebote rechnerisch und wirtschaftlich geprüft. In Einzelfällen ist ein Bietergespräch erforderlich, wenn anhand des Bietervergleichs die Angebotssumme zu niedrig oder zu hoch erscheint bzw. wenn einzelne Einheitspreise von Positionen nicht auskömmlich oder zu hoch angesetzt erscheinen. Im Bietergespräch, das schriftlich protokolliert und von den Teilnehmern unterzeichnet und somit Vertragsbestandteil wird, werden Unstimmigkeiten aufgeklärt. Entweder es kommt danach zur Bestätigung des Angebots und eventuell zur Beauftragung oder der Bieter wird aus der Wertung ausgeschlossen.

Eine Ausschreibung kann durch den Bauherrn/Auftraggeber auch vollständig aufgehoben werden, falls die vorliegenden Angebote wesentlich von der Kostenberechnung abweichen. Dann wird ein neuer Bieterkreis bestimmt und neu ausgeschrieben, was jedoch zu einer zeitlichen Verzögerung im Bauablauf führt. Bei der beschränkten Ausschreibung nach öffentlichem Teilnahmewettbewerb sind ca. drei Monate Vorlauf in der Planung zu berücksichtigen bis der Zuschlag erteilt wird.

Eine Bietergemeinschaft wurde mit der Durchführung, Planung und Bauleitung der Instandsetzungsmaßnahmen am Schloss Salem beauftragt. Ab 2009 begannen die Sofortmaßnahmen. Wesentlicher Teil der Maßnahmen waren die Dächer und die Fassaden im Sternenhof der Prälatur der Kloster- und Schlossanlage Salem sowie die Restaurierung des Kaisersaals. Am ehemaligen Kloster wurden Instandsetzungsmaßnahmen an den Dächern, den Fassaden des Tafelobstgartens und die Gemälderestaurierung der Abtszyklen des Kreuzgangs nach streng konservatorischen Grundsätzen durchgeführt. In den Jahren 2011 bis 2014 erfolgten an der Prälatur Maßnahmen an den Dächern und den Fassaden des Sternenhofs sowie die Restaurierung der Raumschale der Flure. Am Marstall begannen die Fassaden- und Dachinstandsetzungen sowie die Restaurierung der Raumschale mit den hochwertigen Wandmalereien in den ehemaligen Pferdeboxen.



Bild 2 Ansicht des Betsaals

Nach der Beauftragung sind die betriebswirtschaftlichen Zwänge sowohl auf Auftraggeber- als auch auf Auftragnehmerseite zu berücksichtigen. Zum einen gilt es, den vom Auftraggeber vorgegebenen Kostenrahmen einzuhalten und zum anderen durch den Auftragnehmer eine qualitativ hochwertige Leistung termingerecht abzuliefern. Hierbei spielt das bauleitende Büro eine entscheidende Rolle, indem rechtzeitig auftretende Schwierigkeiten erkannt, besprochen und bei Bedarf Alternativlösungen erarbeitet werden. Der Auftragnehmer hat auf Verlangen der Bauleitung des Auftraggebers Bemusterungen vorzulegen, um die Entscheidungsfindung mit den verantwortlichen Baubeteiligten herbeizuführen. Der Auftragnehmer hat die Ausführung nach den verbindlichen Fristen (Vertragsfristen) zu beginnen, angemessen zu fördern und zu vollenden. Dabei ist der Bauablauf nicht nach den betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten durch den Auftragnehmer zu planen, sondern nach den tatsächlichen Gegebenheiten an der Baustelle zu fördern. Insbesondere der Einsatz der Vor- und Nachfolgewerke ist rechtzeitig mit der Bauleitung zu kommunizieren, damit es im weiteren Bauablauf zu keiner Bauverzögerung kommt. Nach Fertigstellung der Gesamtleistung oder von in sich abgeschlossenen Teilleistungen erfolgt eine gemeinsame Abnahme. Dabei werden noch zu beseitigende Mängel oder Restarbeiten schriftlich festgehalten und eine verbindliche Frist für die Fertigstellung vereinbart.

Die Bauleitung steht beim Bauherrn/Auftraggeber in der Pflicht, die Qualität, Termine und Kosten zu kontrollieren oder bei Bedarf zu verifizieren.

3 Vergabe nach VOF am Beispiel Restaurierung der Raumschale des Betsaals, Schloss Salem

Im Betsaal, dem ehemaligen Sommerrefektorium des Klosters, sollten Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten zur Substanzerhaltung durchgeführt werden. Der Betsaal gehört sowohl durch seine Ausmaße als auch durch die äußerst prachtvolle Raumgestaltung in den Rang der herausragenden Prachträume der Kloster- und Schlossanlage Salem (Bild 2). Dominiert wird der Raumeindruck von einem ausgelebten »horror vacui« (Angst vor der Leere). Mit herausragender Handwerksleistung bleibt der reich ausgeschmückte Deckenstuck nicht nur im flachen Relief, sondern lässt Florales und Figürliches halbplastisch, in Teilbereichen sogar vollplastisch, hervortreten. Florale Rahmen fassen wiederum florale Rankenflächen an Decke, Wänden und Fensternischen ein. Innerhalb der reich stuckierten Decke sind elf Gemälde (Öl auf Leinwand) in Stuckrahmen eingesetzt, die parallel restauriert werden sollten.

Im Rahmen des VOF Verfahren ist hier eine genaue Planung mit Bemusterung und Probearbeiten vorausgesetzt worden, um möglichst präzise die zu erwartenden Kosten benennen zu können. Im Betsaal wurde anhand einer Musterachse am Stuck sowie der Musterrestaurierung an einem Gemälde das Stundenkontingent für die einzelnen Arbeitsschritte exakt ermittelt und auf die Gesamtmaßnahme berechnet. Die zu erbringenden Leistungen stellten höchste restauratorische und konservatorische Anforderungen an die ausführenden Restauratoren. Ziel war die vollständige Substanzerhaltung und Sicherung des Bestands in höchst möglicher Arbeitsqualität.

Entsprechend der Aufgabenstellung wurden von den Bewerbern umfassende praktische Erfahrungen mit Konservierung und Restaurierung von Stuckdecken, hervorragende restaurierungstech-

nische Kenntnisse und Fähigkeiten, eine wissenschaftliche Arbeitsweise, Teamgeist und Einfühlungsvermögen in einer vorgegebenen Arbeitsgemeinschaft erwartet. Aus den geeigneten Restauratoren wurden sechs Restauratoren für die Stuck-Raumschale und drei Restauratoren für die Gemälde ausgewählt, die unter Anleitung und Koordination eines gesamtverantwortlichen Restaurators arbeiteten. Die Auswahl der vor Ort ausführend tätigen Restauratoren erfolgte ausschließlich personenbezogen nach Qualifikation.

Ein Anzeigetext mit den festgelegten Kriterien wurde in geeigneten Medien veröffentlicht. Anhand eines Kriterienkatalogs, der individuell für diese

Maßnahme aufgestellt wurde, erfolgte die engere Bewerberauswahl über eine Punktebewertung. In einem zweiten Auswahlschritt, im Bewerbergespräch, wurden die für diese Maßnahmen geeigneten Restauratoren ausgewählt. Auch hier kam ein Bewertungsfragebogen mit Punktebewertung zur Anwendung.

Die dargestellte Vorgehensweise für die Restauratorenauswahl erforderte einen Zeitumfang von ca. vier bis fünf Monaten, einschließlich der planerischen Vorleistung und die Bearbeitung der Musterachse, um den genauen Maßnahmenumfang definieren zu können.

Weiterführende Literatur

VOB – Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, 2012

VOF – Vergabeordnung für freiberufliche Leistungen, 2010

Strategien zur Schadensprävention, Wartung und Unterhalt von Baudenkmalen

Jörg Möser

Historische Baudenkmale sind durch die Eigenschaften ihrer Materialien und Oberflächen wartungsintensiv. Entsprechende Wartungs- und Pflegeintervalle für zahlreiche historische Oberflächen sind dabei ein unverkennbarer und anerkannter Grundsatz denkmalpflegerischen Handelns. Gerade die sparsame und einfache Pflege und Fürsorge über einen langen Zeitraum hilft nicht selten bei der Vermeidung größerer Totalauswechslungen. Im Bereich der Natursteinbauwerke trifft dies besonders zu. Am Beispiel der Restaurierung und Instandhaltung der Südtreppe des Fasanenschlößchens Moritzburg, wird auf die wichtige Rolle der langfristigen Fürsorge eingegangen.

Schlagwörter: Früherkennung, Analyse und Dokumentation, Planung und Umsetzung, dauerhafte Nachsorge, Bauaufnahme, Schadenserfassung, Bauforschung, Kostenermittlung, Variantendiskussion

Anders als bei heute errichteten Bauten mit neuen Technologien und Baumaterialien, die sich nach neuesten Richtlinien als nachhaltig und relativ dauerhaft erweisen, sind historische Baudenkmale durch die Eigenschaften ihrer Materialien und Oberflächen wartungsintensiver. Obwohl zahlreiche historische Bauten ihre Vorzüge in Bezug auf Langlebigkeit der Konstruktion und der Baustoffe bewiesen haben, sind doch ihre Oberflächen pflegeaufwändiger als moderne Baustoffe. Der Vorzug der Oberfläche eines (vorgeblich wartungsfreien) Kunststofffensters gegenüber einem gestrichenen Holz-Kastenfensters wäre jedoch noch zu beweisen. Während ersteres wahrscheinlich nach weniger als zwei Jahrzehnten als unvermeidlicher Sondermüll entsorgt werden muss, ist das letztere auch nach 200 Jahren reparaturwürdig und kann durch geeignete Mittel ergänzt oder ertüchtigt werden, ohne sein charakteristisches Bild einzubüßen.

Die Notwendigkeit kürzerer Wartungs- und Pflegeintervalle für zahlreiche historische Oberflächen ist jedoch ein unverkennbarer und anerkannter Grundsatz denkmalpflegerischen Handelns. Gerade die sparsame und einfache Pflege und Fürsorge über einen langen Zeitraum hilft nicht selten bei der Vermeidung größerer Totalauswechslungen. Im Bereich der Natursteinbauwerke trifft dies beson-

ders zu. Stein als natürliches Material unterliegt im eingebauten Zustand den gleichen Verwitterungs- und Erosionsbedingungen wie in der Natur.

Aus der Erfahrung zahlreicher Projekte soll am Beispiel der Restaurierung und Instandhaltung der Südtreppe des Fasanenschlößchens Moritzburg auf die wichtige Rolle der langfristigen Fürsorge eingegangen werden. Diese Aufgaben können vom versierten Eigentümer (oder dem öffentlichen Bauamt), einem Fachmann oder dem betreuenden Ingenieur/Architekten dauerhaft geleistet werden. Das Spektrum umfasst:

Früherkennung: Erfassen der Aufgabe, Verzeichnen von Schäden und Verschleißerscheinungen, Analyse und Bewertung von Schadensbildern, Erstellen von langfristigen Bedarfsplanungen;

Analyse und Dokumentation: langfristige Vorbereitung einer Baumaßnahme mit Dokumentationen sowie qualitativen und quantitativen Bewertungen;

Planung und Umsetzung: unmittelbarer Instandsetzungsprozess als Planer und Steuerer des Prozesses mit der Prüfung von Alternativen und Integration in Nutzungsänderungen bis zur langfristigen Pflege;

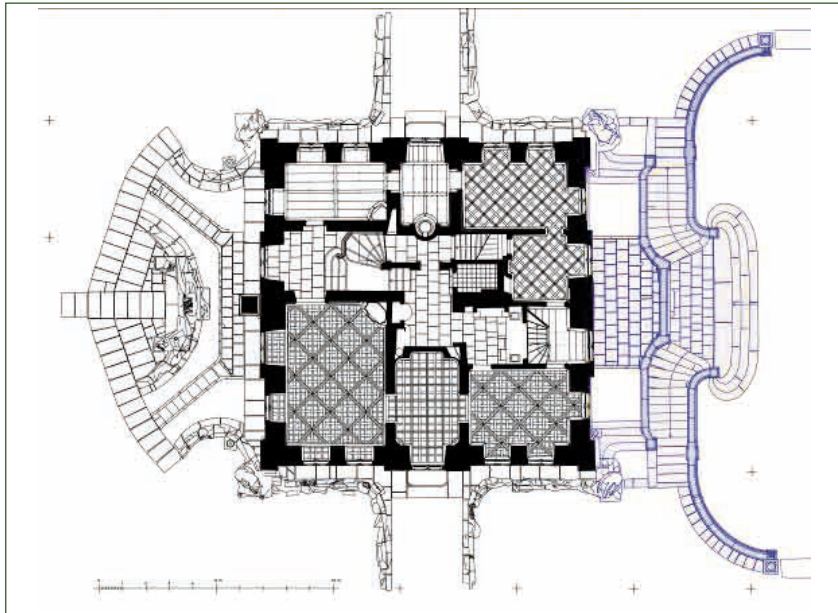


Bild 1 Fasanenschlößchen in Moritzburg b. Dresden, Ansicht von Südosten, Aufnahme 2008

Bild 2 Fasanenschlößchen, Grundriss mit Treppenanlagen, o. M., blau markiert ist die südliche Freitreppenanlage, die in den Jahren 2000 bis 2004 abgedichtet und restauriert wurde, Zeichnung Architektengemeinschaft Milde + Möser, Pirna, 2004

Dauerhafte Nachsorge: permanente Pflege und Wartung des Baues, dem Bauherrn müssen die nötigen Werkzeuge als Pflegeanleitungen oder ein Nutzerhandbuch in die Hand gegeben werden;

Ein hochwertiges Baudenkmal wie das spätbarocke Fasanenschlößchen steht in besonderem Maße für den Bedarf an dauerhafter Instandhaltung und restauratorischer Pflege.

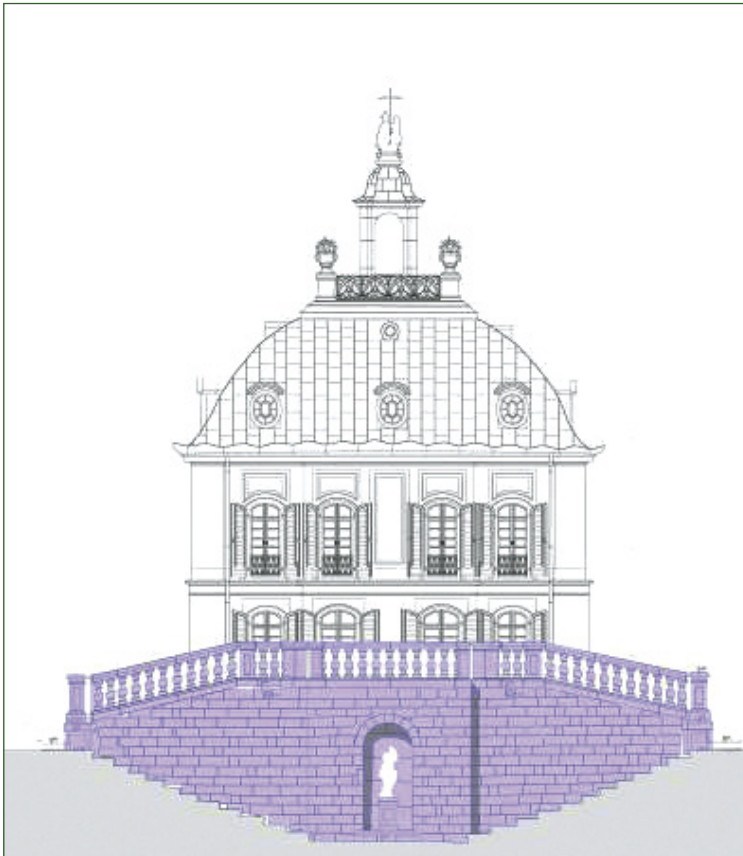
Dieses besondere Bauwerk hat eine wechselvolle Geschichte. Eine Fasanerieanlage entstand bereits während der groß angelegten Umbauten des Mo-

ritzburger Schlosses 1728 östlich vom Jagdschloss. Nach dem 7-jährigen Krieg (1756–63) verwüstet, wurde das Fasanenschlößchen unter dem Architekten Johann Daniel Schade zwischen 1770 bis 1782 in chinesischem Formen erbaut (Bild 1). Dazu kamen Vogelvolieren, wie das so genannte Garnhaus, eine Brunnenanlage, die Buchstabenhecke, das Wohnhaus des Grafen Marcolini, Getreidescheunen sowie Stall- und Wagenschuppengebäude. Nach 1815 wurde die intensive Fasanhaltung eingestellt und nur noch die Schauvolieren mit Edelfasanen und anderen exotischen Vögeln beibehalten. Die Innenräume sind als »Landsitz« mit allen Funktionsbereichen ausgestattet. Im Erdgeschoss lagen Arbeitskabinett, Wohnkabinett, Schlaf- und Toilettenzimmer sowie ein Vorzimmer. Eine Tee- und Kaffeeküche war hier ebenfalls untergebracht. Die eigentliche Hofküche befand sich im Nachbarhaus. Das Obergeschoss beherbergt den Speisesaal, den größten Raum des Gebäudes. Im Dachgeschoss befanden sich Dienerkammern [Dehio, 1990].

Genutzt wurde das Fasanenschlößchen von König Friedrich August I. von Sachsen tageweise als Sommerresidenz. Bis 1945 gehörte der Fasanengarten dem ehemaligen sächsischen Königshaus. Das Haus beherbergte bis 1994 eine Vogelpräparatausstellung.

Die Planung zur komplexen Restaurierung des Bauwerks von 1999 bis 2007 schloss mehrere Wartungsintervalle z. B. an Fenstern und Fensterläden ein. Dabei beginnt die Restaurierung oder Modernisierung eines solchen Bauwerks fast nie am Punkt Null. Das Beispiel der südlichen Freitreppe ist ein beredtes Beispiel für eine gelungene dauerhafte Fürsorgemaßnahme (Bilder 2 und 3).

Nach dem Abbau der letzten Vogelvoliere um 1882 stand die repräsentative Treppenanlage frei und wurde über Jahrzehnte hinweg im Rahmen der jeweiligen finanziellen Möglichkeiten instand gehalten bzw. wurden verschlissene Teile ausgewechselt. Ältere Baurechnungen und die Befunde vor Ort belegen, dass in verschiedenen Zeitabschnitten ständig Sandsteinbauteile ausgebessert oder gewechselt wurden. Nicht immer entsprachen diese Maßnahmen dem, was heute Stand der Steinrestaurierung genannt wird.



1 Früherkennung

Ständige Kontrolle – Wartung – Kleinreparaturen – Dokumentation des langfristigen Bedarfs

In Obhut des Eigentümers wurden bereits in den Jahren bis 1989 und ab 1990 durch das damalige Staatshochbauamt Dresden laufend Kontrollen und Reparaturen durchgeführt.

Die Treppe und vor allem die um das Bauwerk befindlichen Bildhauerarbeiten, vor allem die hochwertigen Hirschskulpturen wurden in annäherndem Fünfjahresrhythmus ausgebessert, neu verfugt und in Teilen erneuert (Bild 4). Größerer Wassereintrag, der z. B. zu Frostschäden geführt hätte, wurde so verhindert. Ein ursprünglich vorhandener Anstrich auf der Treppenanlage ist nie wieder aufgebracht worden.

Durch die ständigen Wartungsarbeiten konnten jedoch langfristig größere Schädigungen nicht verhindert werden. Durch Setzungen und Wärmeausdehnungen der Sandsteinbauteile sowie durch Wassereintrag ist es über eine Dauer von vielen

Jahre zu größeren Fugen und Fehlstellen bis zu 5 cm Weite gekommen. Dadurch ist nicht nur eine latente Schädigung der Sandsteinbauteile der Treppe, sondern auch ein Wassereintrag am Haus selbst entstanden. Es wurde deutlich, dass eine grundlegende Abdichtung von Bauwerk und Stützmauer der Treppenanlage notwendig werden würde.

2 Analyse und Dokumentation

Bauaufnahme, Schadenserfassung, Bauforschung, Kostenermittlung, Variantendiskussion

Nach dem Erkennen der Schadensbilder wurde nach einer genauen Vermessung aller Teile mit Verbindungsfugen, Verformungen und sichtbaren Befestigungen eine Schadensdokumentation durchgeführt. Dabei sind auch die Materialwechsel, Oberflächenbearbeitungen, die historischen Umbauten und alle Veränderungen mit allen zugängigen Befunden dokumentiert worden. Nach dieser Analyse und qualitativen Bewertung der Schäden sowie einer Abschätzung des Aufwandes konnten

Bild 3

Fasanenschlößchen, Ansicht von Süden, o. M., blau markiert ist die südliche Freitreppenanlage; Zeichnung Architektengemeinschaft Milde + Möser, Pirna, 2004

Bild 4

Fasanenschlößchen, Hirschskulptur an der südöstliche Gebäudeecke nach Abschluss der Konservierungsarbeiten, Aufnahme 2008



Bild 5 Fasanenschlößchen, Ansicht von Süden, Detailausschnitt der Stützmauer und Treppenanlage nach Abschluss der Konservierung und Restaurierung, Aufnahme 2008

Bild 6 Fasanenschlößchen, Ansicht der Treppenanlage von Südwesten, Aufnahme 2008

Investitionsvarianten für eine Instandsetzung diskutiert werden. Es bestand hier die Aufgabe, nicht nur die Skulpturen, die Treppen und Stützmauern allein, sondern auch das Sockelmauerwerk des Bauwerks gegen Schäden und Wassereintrag zu schützen.

Eine komplette Demontage mit nachfolgender Abdichtung der Fundamente und Stützmauern wäre nach gängigen Fachregeln einzuhalten gewesen. Dies barg aber große Risiken für den Erhalt und die Wiedermontage der im Original erhaltenen Bautei-

le. Nach dem sorgfältigen Abwägen der Risiken wurde gemeinsam mit dem Landesamt für Denkmalpflege entschieden, die Sandsteinkonstruktion nicht zu demontieren, sondern in situ zu restaurieren. Eine WTA-gerechte Abdichtung schied somit aus.

3 Planung und Umsetzung Sicherung des Bauwerkes

Für die Sicherung des Bauwerks wurde eine abschnittsweise Umsetzungsstrategie entwickelt. Im ersten Schritt konnte im Zuge der Bauunterhaltsmaßnahmen die Rückwand der Stützmauer und das Kellermauerwerk freigelegt und fachgerecht abgedichtet werden. Diese Maßnahme ergab als Nebeneffekt wichtige bauhistorische Erkenntnisse wie Brandspuren, Umbauindizien u. a. Im nächsten Schritt wurden, nach ausführlicher restauratorischer Planung im Zuge einer investiven großen Baumaßnahme, in der Restaurierung des Fasanenschlößchens alle Sandsteinteile bearbeitet. In der Aufstellung der Planunterlage sind nicht nur die Restaurierungskosten, sondern auch die späteren laufenden Betriebskosten für Pflege und Wartung ausgewiesen worden. Nach vorhergegangener Abdichtung und einem neuen Unterbau der Stufenanlage wurde schrittweise gearbeitet:

- Bereits realisiert waren die Bestandserfassung und Dokumentation nach steingerechter Bauaufnahme, die Schadenskartierung, eine farbrestauratorische Untersuchung und dezidierte Bauphasenuntersuchungen im Untergrund.
- Nachdem statische Gründungs- oder Bauwerksertüchtigungen nicht nötig waren, konnten unter Anleitung alle erhaltenen Bearbeitungsspuren und Oberflächen handwerklich gesichert werden.
- Es wurden traditionell alle Flächen schonend mit Heißdampf gereinigt, lose Stein- und Fugenteile entfernt und materialgerecht mit Steinersatzmörtel oder Vierungen ergänzt. Verfugungen sind ergänzt worden, Risse in Brüstungen, Abdeckungen oder ähnliches mit Edelstahl vernadelt.
- Auf eine Wiederherstellung oder Rekonstruktion von gestörten Bauformen oder Fassaden-

bereichen konnte nicht verzichtet werden. Zerstörte bzw. verschlissene Sandsteinteile der Oberfläche wurden exakt nach Vorbild neu gefertigt und am alten Ort eingesetzt.

- Im Gesamterscheinungsbild war eine Angleichung von Farbunterschieden des neuen Materials nicht gewünscht. So wurden neben der Festigung der Steinoberflächen mit KSE nur die neuen Fugenmörtel farblich angepasst. Die neuen Steinflächen zeigen ihr Alter (Bild 5, 6).
- Großer Wert wurde auf Dauerhaftigkeit aller Maßnahmen gelegt, um die laufenden Wartungsarbeiten effektiv und schonend zu gestalten.

4 Dauerhafte Nachsorge Nutzerhandbuch, Wartungs- und Pflegeintervalle

Nach Abschluss der Arbeiten wurde nicht nur für die Natursteinarbeiten ein Nutzerhandbuch erstellt. Darin sind in Kooperation mit allen Fachplanern und in Übereinstimmung mit dem langfristigen Bauhaushalt der Staatlichen Schlösserverwaltung auch alle notwendigen Kontroll-, Wartungs- und Pflege-

intervalle mit Angabe der möglichen Fachfirmen, der turnusmäßige Mittelbedarf und die Verantwortlichkeiten für Kontrolle und Dokumentation aufgelistet. Die Kontrolle und Umsetzung obliegt der technischen Verwaltung des Schlossbetriebs Moritzburg und dem Bauamt. So kann langfristig die Erhaltung und Ästhetik gesichert werden.

Im Allgemeinen ist das Bewusstsein für die Notwendigkeit und die Bereitstellung entsprechender Mittel bei vielen privaten, aber auch bei öffentlichen Bauherren nicht genug entwickelt. Der Bauingenieur oder Architekt einer Modernisierungsmaßnahme muss auch für die Nutzungszeit hinreichende Pflegemaßnahmen planen und dem Eigentümer diese als Arbeitshilfe an die Hand geben. Ob es in einem Nutzerhandbuch festgehalten ist oder ein entsprechender Pflegeplan aufgestellt wird, ist unerheblich. Wichtig ist, dass der Eigentümer konkrete Angaben für Wartungs- und Pflegeintervalle verschiedener Bauteile und Gewerke, aber auch Kontrollfristen für technische Anlagen und alle Bauteile aufgezeigt bekommt. Die langfristige Planung von Finanzmitteln ist dabei ebenso von Vorteil wie der Abschluss mehrjähriger Wartungsverträge mit Restauratoren und Handwerksfirmen.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

[Dehio, 1990] Dehio, G., (1990): Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Sachsen. Deutscher Kunstverlag, München/Berlin

Steinzentrum Wunsiedel – Restaurieren lernen

Die Verbindung von Ausbildung, Weiterbildung, Fortbildung, Dokumentation, Information und Dienstleistung im Steinzentrum ist ein weltweites Alleinstellungsmerkmal für das handwerklich orientierte Bildungszentrum und trägt zu einer sehr fruchtbaren Zusammenarbeit mit anderen Institutionen bei. Vier Einrichtungen haben sich zu diesem Zentrum zusammengeschlossen, um den Anforderungen einer modernen Aus- und Weiterbildung für das Steinmetz- und Bildhauerhandwerk mit Kompetenz und richtungsweisenden Ansätzen zu begegnen.

Erwin Hornauer

Schlagwörter: Steinzentrum Wunsiedel, Restaurieren lernen, Restaurator im Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk, Steinmetz und Steinbildhauer in der Denkmalpflege, Ausbildung, Weiterbildung, Fortbildung, Dienstleistung

1 Staatliche Fachschule für Steintechnik

Die staatliche Technikerschule ist seit über 100 Jahren eine Ausbildungsstätte für Führungskräfte der mittleren und oberen Managementebenen in der Steinindustrie. Staatlich geprüfte Techniker/innen der Fachrichtung Steintechnik planen Natursteinarbeiten, bereiten diese vor und führen sie aus. Die Technikerausbildung dient in Wunsiedel gleichzeitig der gründlichen Vorbereitung auf die Meisterprüfung im Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk. Die schulgeldfreie Ausbildung dauert zwei Jahre, in denen das erste Schulhalbjahr als Probezeit gilt. Die über BAFöG geförderte Ausbildung beginnt jeweils im September.

2 Staatliche Berufsschule Marktredwitz-Wunsiedel

Die Berufsschule setzt mit dem Fachbereich Steintechnik die lange Tradition der Ausbildung im Bereich Naturstein aus dem Anfang des 19. Jahrhunderts fort. Die Ausbildung der Lehrlinge erfolgt nach den im Rahmenlehrplan festgelegten Lernfeldern.

3 Europäisches Fortbildungszentrum für das Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk

Das Europäische Fortbildungszentrum führt Lehrgänge zur überbetrieblichen Ausbildung der Lehrlinge im Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk durch. Es ist derzeit für die Auszubildenden aus dem Regierungsbezirk Oberfranken, der nördlichen Oberpfalz und den Bundesländern Sachsen und Thüringen zuständig. Weiterhin bietet es seit 25 Jahren kontinuierlich eine breite Palette von Seminaren an, in denen Fachleute ihr theoretisches Wissen erweitern und ihre handwerkliche Tätigkeit an die ständig wachsenden Erfordernisse anpassen können. Je nach Bedarf wechseln Inhalte und Themen des Bildungsangebotes.

Für das gesamte Natursteingewerk hat sich das Europäische Fortbildungszentrum zu einem wertvollen Kompetenzzentrum entwickelt. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere die Fortbildung zum Restaurator im Handwerk und die Fortbildung zum Steinmetz und Steinbildhauer in der Denkmalpflege (Bild 1). Diese Aufstiegsfortbildungen tragen in beachtlichem Maße dazu bei, dass Steinmetze in der Denkmalpflege auch bei der Planung mit ein-



Bild 1
Europäisches Fortbildungszentrum – Werkstatt

bezogen werden. Mit dem Deutschen Natursteinarchiv, der Gesteinsprüfung und der Beratung zu Themen handwerklicher Denkmalpflege hat sich Wunsiedel weit über die Grenzen Deutschlands hinaus einen Namen gemacht und Anerkennung erworben.

Neben dem theoretischen Unterricht wird besonderer Wert auf die Praxis in Werkstatt und Labor gelegt, wobei insbesondere auch schwierige Restaurierungsprobleme an Natursteinoriginalen nach den neuesten Erkenntnissen der Wissenschaft und Technik gelehrt werden (Bild 2).

Die Ausbildung wird vervollständigt durch Exkursionen und Arbeitsbesuche unter fachkundiger Leitung zu kulturhistorisch wertvollen Bauwerken und Denkmälern im In- und Ausland. Dabei wird das Basiswissen vertieft und durchgeführte Restaurierungsarbeiten mit Fachleuten vor Ort und den begleitenden Fachdozenten diskutiert, dokumentiert und bewertet. Nicht nur die Referenten, auch die Kursteilnehmer bringen ihr Fachwissen und Können in beispielhafter Weise in den Unterricht mit ein. Der gegenseitige Erfahrungsaustausch, das interdisziplinäre und wissenschaftliche Arbeiten ist Bestandteil des Lehrkonzeptes. Die Themen werden als Kursbausteine in Einzelseminaren angeboten. Referenten sowie Kontakte zu Bauhöfen, zur Industrie, zu Denkmalbehörden und zu Universitäten ermöglichen, dass in Wunsiedel Praxis, Wissenschaft und Forschung vereint werden.



Bild 2
Europäisches Fortbildungszentrum – Projektarbeiten





Bild 3
Deutsches Naturstein-Archiv

4 Deutsches Naturstein-Archiv (DNSA)

Das Natursteinarchiv dient der Lehre, der Dokumentation und Information über Naturwerkstein. Das DNSA archiviert alle im deutschsprachigen Raum je für Architektur und Skulptur verwendeten Natursteine, darüber hinaus auch die in der übrigen Welt geförderten und international angebotenen Natursteinsorten. Die Sammlung von derzeit fast 6000 verschiedenen Mustern im einheitlichen Format (Bild 3), bietet seit Jahrzehnten den Auszubildenden die Möglichkeit, die immer umfangreicheren Natursteinimporte aus nahezu allen Ländern der Erde in der Ausbildung kennen zu lernen. Das Natursteinarchiv mit all seinen Möglichkeiten und ein Unterricht mit praxisnahen, zeitgemäßen Inhalten garantieren eine fundierte und umfassende Ausbildung, die sich mit naturwissenschaftlichem Hintergrund an den Bedürfnissen des Handwerkes orientiert.

Im Natursteinarchiv finden gesteinskundliche Seminare statt, z. B. zum Vermitteln von Grundkenntnissen oder die Auffrischung vorhandenen Wissens über Naturstein aber auch für Spezialgebiete wie Verarbeitung oder Anwendung von Natursteinen.

5 Dienstleistungen des Steinzentrums

Das Kompetenzzentrum Wunsiedel steht Berufsverbänden, Ausbildungsstätten, Museen und Instituten in- und ausländischer Universitäten als Dienstleister zur Verfügung. Die Kontakte mit Fachbetrieben in aller Welt helfen, die vorhandenen Sammlungen kontinuierlich zu erweitern und immer aktuelle Informationen liefern zu können. In Wunsiedel besteht außerdem die Möglichkeit, in einem gut ausgestatteten Labor normgerechte Prüfungen von Druck-, Biege- und Abriebfestigkeit von Steinmaterial sowie die Ermittlung anderer Kennwerte durchzuführen. Gesteine werden bestimmt, Handelssorten erkannt oder Ersatzgesteine für Restaurierungsarbeiten gefunden. Das Europäische Fortbildungszentrum ist kompetent, wenn es um Fragen zur handwerklichen Denkmalpflege und Steinrestaurierung geht.

Leistungsspektrum:

- Archivierung von Naturwerkstein
- Das Steinzentrum Wunsiedel archiviert sowohl alle im deutschsprachigen Raum für Architektur und

Skulptur verwendeten als auch die in der übrigen Welt geförderten und international angebotenen Natursteine.

- Erfassung aller relevanten Daten der Natursteine

Es werden die geologischen, petrographischen, geographischen, technologischen, kulturellen und wirtschaftlichen Daten der archivierten Natursteine erfasst.

- Lehr- und Unterrichtssammlung

Das Naturstein-Archiv mit seinen umfangreichen mineralogischen und paläontologischen Sammlungen ist fest in das Lehrfach Gesteinskunde im Rahmen der Ausbildung zum Staatlich geprüften Techniker, Meister und Restaurator im Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk integriert.

- Gesteinsbestimmung und Gesteinsprüfung

Proben aktueller und historischer Baugesteine werden bestimmt und Bezugsquellen für Steinersatz oder im Bedarfsfall entsprechende Ersatzmaterialien empfohlen. Im eigenen Prüflabor können die wichtigsten technischen Gesteinsdaten nach den geltenden Richtlinien ermittelt werden wie die Trockenrohdichte, die Wasseraufnahmefähigkeit, die Verwitterungsbeständigkeit, die Druckfestigkeit, die Verschleißprüfung nach Böhme, die Be-

stimmung des Widerstandes gegen Kristallisation, die Biegefestigkeit, die Ausbruchlast am Ankerdornloch sowie die Bestimmung der Sieblinie für die Zuschlagstoffe bei Mörteln.

- Beratung von Bauherren, Architekten, Behörden und Verarbeitungsbetrieben

Die Exponate des Deutschen Naturstein-Archivs dienen vielen Fachbüchern und anderen Publikationen als Vorlage für Abbildungen und Gesteinsbeschreibungen. Nirgendwo können Auflistung und systematische Zuordnung von Werkgesteinen und ihrer Nomenklatur so komplett vollzogen werden.

- Ausbildung

Überbetriebliche Ausbildung und Berufsschulunterricht für Steinmetze und Steinbildhauer sowie die Ausbildung zum Staatlich geprüften Techniker – Fachrichtung Steintechnik wird angeboten. Auch die Vorbereitung auf die Meisterprüfung im Steinmetz- und Steinbildhauerhandwerk ist möglich.

- Weiterbildung und Fortbildung

Regelmäßig finden Fachseminare zu verschiedenen Themen über historische Bearbeitungstechniken statt. Der Schwerpunkt des Bildungsangebots liegt in der Steinrestaurierung und Baudenkmalpflege sowie bei Aufstiegsfortbildungen in der Denkmalpflege.

Literatur und Quellen, weiterführende Literatur

www.efbz.de

Der Steinmetz: Handbuch für Ausbildung und Praxis,
R. Watzke (Hrsg.), 2013, Callway Verlag

Normen, WTA-Merkblätter, Richtlinien und Technische Regeln

Normen

DIN EN 18555-9:1999-09 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit

DIN EN 998-2:2010 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel

DIN EN 1926:2007-03 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit

DIN EN 771-6:2011-07 Festlegungen für Mauersteine – Teil 6: Natursteine

DIN EN 1990:2010-12 Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC:2010

DIN EN 998-1:2010 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel

DIN EN 13914-1:2013 Planung, Zubereitung und Ausführung von Innen- und Außenputzen – Teil 1: Außenputz

DIN 1054:2010-12 Baugrund-Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN 1997-1

DIN 4095:1990-06 Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung; Bemessung und Ausführung

DIN 1053-1:1996-11 Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung (zurückgezogen)

DIN EN 1996-1-1:2014 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012

DIN EN 1996-1-1/NA:2014 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten, Anhang NA.L: Konstruktion, Ausführung und Bemessung von Mauerwerk aus Natursteinen

DIN EN 1996-1-1/NA:2012 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk

DIN EN 1996-2:2010-12 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-2:2006+AC:2009

DIN EN 1996-2/NA:2012 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk

DIN EN 998-1: 2010-1 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel

DIN 18195-2: 2009-04 Bauwerksabdichtungen – Teil 2: Stoffe

DIN EN 15801:2010-04 (D) Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Bestimmung der Wasserabsorption durch Kapillarität; Deutsche Fassung EN 15801:2009

DIN EN 15803:2010-04 (D) Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Bestimmung des Wasserdampfleitkoeffizienten (δ_p); Deutsche Fassung EN 15803:2009

DIN EN 1062-1:2004-08 (D) Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich – Teil 1: Einteilung

DIN EN ISO 2810:2004-10 (D) Beschichtungsstoffe – Freibewitterung von Beschichtungen – Bewitterung und Bewertung (ISO 2810:2004)

DIN EN 1993-1-1:2010-12 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005+AC:2009

DIN 1356-6:2006-05 Technische Produktdokumentation: Bauzeichnungen – Teil 6: Bauaufnahmezeichnungen

DIN 4123:2013-04 Ausschachtungen, Gründungen und Unterfangungen im Bereich bestehender Gebäude

DIN EN 13755:2008-08 Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck

DIN EN 1925:1999-05 Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung

DIN EN 772-1:2011-07 Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit

DIN EN 52617:2003-03 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002

DIN 52615:2013-08 Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

SIA 269/6-1:2011 Erhaltung von Tragwerken – Mauerwerksbau, Teil 1: Natursteinmauerwerk

DIN 1960:2012-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmungen

DIN 1961:2012-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen

DIN 18330:2012-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Mauerarbeiten

DIN 18332:2012-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Naturwerksteinarbeiten

DIN 18363:2012-09 VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Maler- und Lackierarbeiten – Beschichtungen

WTA-Merkblätter

WTA-Merkblatt 4-5-99/D	Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik (derzeit in Überarbeitung)
WTA-Merkblatt 3-12-99/D	Natursteinrestaurierung nach WTA IV: Fugen (derzeit in Überarbeitung)
WTA -Merkblatt 2-9-04/D	Sanierputzsysteme
WTA-Merkblatt 2-4-08/D	Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden
WTA-Merkblatt 2-10-06/D	Opferputze
WTA-Merkblatt 3-13-01/D	Zerstörungsfreies Entsalzen von Natursteinen und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen
WTA-Merkblatt 4-4-04/D	Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit
WTA-Merkblatt 4-5-99/D	Beurteilung von Mauerwerk Mauerwerksdiagnostik
WTA-Merkblatt 4-11-02/D	Messung der Feuchte bei mineralischen Baustoffen
WTA-Merkblatt 3-11-97/D	Natursteinrestaurierung nach WTA III: Steingergänzung mit Restauriermörteln/Steinersatzstoffen
WTA-Merkblatt 2-11-07/D	Gipsmörtel im Mauerwerksbau und an Außenfassaden
WTA-Merkblatt 4-6-14/D	Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile
WTA-Merkblatt 2-7-01/D	Kalkputze in der Denkmalpflege
WTA Merkblatt 3-9-95/D	Natursteinrestaurierung nach WTA XI: Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen
WTA Merkblatt 3-5-98/D	Natursteinrestaurierung nach WTA I: Reinigung
WTA-Merkblatt 3-10-97/D	Natursteinrestaurierung nach WTA XII: Zustands- und Materialkataster an Natursteinbauwerken
WTA Merkblatt 2-12-13/D	Fassadenanstriche für mineralische Untergründe in der Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege
WTA Merkblatt 3-14	Anwendungstechnik – Natursteinrestaurierung – Konservierung (Entwurf, in Vorbereitung)
WTA-Merkblatt 3-17-10/D	Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen
WTA-Merkblatt 4-5-99/D	Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik
WTA-Merkblatt 4-3/D	Erhaltung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit (Entwurf, in Vorbereitung)
WTA-Merkblatt 3-4-90/D	Natursteinrestaurierung nach WTA X: Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Naturwerksteinbauten

Richtlinien und Technische Regeln

DAfStb-Richtlinie 2000-09 – Belastungsversuche an Betonbauwerken, DAfStb (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 2000

Leitlinien für das Verputzen von Mauerwerk und Beton. Grundlagen für die Planung, Gestaltung und Ausführung. Industrierverband WerkMörtel e. V. (Hrsg.), Duisburg, Stand: April 2007

Richtlinie »Fassadensockelputz/Außenanlagen«. Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Verband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau Baden-Württemberg e. V. (Hrsg.), 03/2013

Empfehlungen für Planung, Bau und Instandhaltung von Trockenmauern aus Naturstein. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) (Hrsg.), Ausgabe 2013, Bonn

VOF Vergabeordnung für freiberufliche Leistungen. Bundesministerium der Justiz (Hrsg.), Ausgabe 2009

Autorenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Lehrstuhl für Tragwerksplanung
Arcisstrasse 21, 80333 München
ls.barthel@lrz.tum.de

Ronald Betzold

Betzold + Maak Baumanufaktur GmbH & Co. KG
Waldauer Berg 7, 98553 Hinternah
betzold@betzold-maak.de

Prof. Dr. Stefan Brüggerhoff

Deutsches Bergbau-Museum Bochum
Am Bergbaumuseum 28, 44791 Bochum
Stefan.Brueggerhoff@bergbaumuseum.de

Dr.-Ing. Andreas Bruschke

MESSBILDSTELLE
Gesellschaft für Photogrammetrie
und Architekturvermessung mbH
Altplauen 19, 01187 Dresden (Bienertmühle)
andreas.bruschke@messbildstelle.de

Dr.-Ing. Ralph Egermann

BfB • Büro für Baukonstruktionen GmbH
Rastatter Str. 25, 76199 Karlsruhe
ralph.egermann@bfb-ka.de

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Universität Stuttgart
Institut Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
harald.garrecht@iwb.uni-stuttgart.de

Geschäftsführender Direktor
MPA Universität Stuttgart
harald.garrecht@mpa.uni-stuttgart.de

Dr. Lothar Goretzki

Bauhaus-Universität Weimar
Professur Bauchemie
Coudraystraße 13c, 99423 Weimar
lothar.goretzki@uni-weimar.de

Prof. Dr. rer. nat. Gabriele Grassegger

Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart
Fakultät B: Bauingenieurwesen,
Bauphysik und Wirtschaft
Labor für Bauchemie »Denkmalerhaltung,
Altbauerhaltung (Conservation Sciences)«
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
gabriele.grassegger@hft-stuttgart.de

Hans Michael Hangleiter

Hans Michael Hangleiter GmbH
Bismarckstraße 13, 64853 Otzberg
h.hangleiter@hangleiter.com

Prof. Gottfried Hauff

Fachhochschule Potsdam
Professur für Steinkonservierung und Leiter der
Studienrichtung Steinkonservierung
Studiengang Restaurierung
Kiepenheuerallee 5, 14469 Potsdam
hauff@fh-potsdam.de

Prof. Dr. Christoph Herm

Hochschule für Bildende Künste Dresden
Professur für Archäometrie und naturwissen-
schaftliche Forschung in der Konservierung/
Restaurierung
Güntzstr. 34, 01307 Dresden
herm@hfbk-dresden.de

Erwin Hornauer

Steinzentrum Wunsiedel
Marktrechwitz Straße 60, 95632 Wunsiedel
info@efbz.de

Albert Kieferle

AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

Dr. Helmut Kollmann

epasit GmbH Spezialbaustoffe
Sandweg 12–14, 72119 Ammenbuch-Altingen
helmut.kollmann@epasit.de

Prof. Dr. Peter Kozub

Fachhochschule Köln
Fakultät für Kulturwissenschaften
Institut für Restaurierungs- und Konservierungs-
wissenschaft, Kulturgut aus Stein
Ubierring 40, 50678 Köln
peter.kozub@fh-koeln.de

Reiner Krug

Deutscher Naturwerkstein-Verband e. V.
Sanderstr. 4, 97070 Würzburg
info@natursteinverband.de

Till Läßle

strebewerk. Riegler Läßle
Partnerschaft Diplom-Ingenieure
Reinsburgstraße 95, 70197 Stuttgart
mail@strebewerk.de

Klaus Lienert

AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

Jörg Möser

Architektengemeinschaft Milde + Möser
Wachwitzgrund 56, 01326 Dresden
j.moeser@m-m-architekten.de

Claudia Neuwald-Burg

Ingenieurbüro für Bestandsuntersuchung und
Instandsetzungsplanung
Blankenlocher Weg 58, 76149 Karlsruhe
claudia.neuwald@t-online.de

Dr.-Ing. Gabriele Patitz

IGP Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik und
Schadensgutachten
Alter Brauhoof 11, 76137 Karlsruhe
mail@gabrielepatitz.de

Prof. Dr. Karin Petersen

Hochschule HAWK Hildesheim/Holzminde-
n/Göttingen
Fakultät Bauen und Erhalten
Professorin für Mikrobiologie
Bismarckplatz 10/11, 31135 Hildesheim
petersen@hawk-hhg.de

Dr. Esther von Plehwe-Leisen

Labor für Steinkonservierung
Brühler Str. 265, 50968 Köln
jaeh.leisen@freenet.de

Dr. Hans-Jürgen Schwarz

Ri-Con/Research in Conservation
Richard-Wagner-Str. 9, 30177 Hannover
hans-juergen.schwarz@ri-con.de

Peter Reiner

AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

Prof. Dr.-Ing. Erwin W. A. Schwing

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Architektur und Bauwesen
Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe
prof.schwing@t-online.de

Tilman Riegler

strebewerk. Riegler Läßle
Partnerschaft Diplom-Ingenieure
Reinsburgstraße 95, 70197 Stuttgart
mail@strebewerk.de

Prof. Dr. rer. nat. Heiner Siedel

TU Dresden
Institut für Geotechnik
Professur für Angewandte Geologie
01062 Dresden
Heiner.Siedel@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Ralf Ruhnau

CRP Bauingenieure
Max-Dohm Straße 10, 10589 Berlin
Ralf.Ruhnau@CRP-Berlin.de

PD Dr. Michael Steiger

Universität Hamburg
Fachbereich Chemie
Martin-Luther-King-Platz 6, 20146 Hamburg
michael.steiger@chemie.uni-hamburg.de

Hermann Schäfer

Kartierung von Natursteinbauwerken
Bruchköbelerstr. 29, 63526 Erlensee
hermann.schaefer@steinkartierung.de

Prof. Dr.-Ing. Sylvia Stürmer

HTWG Konstanz
Fakultät Bauingenieurwesen
Lehrgebiete: Baustoffe und Bausanierung
Brauneggerstr. 55, 78462 Konstanz
stuermer@htwg-konstanz.de

Georg Schmid

AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

Eduard Schnell

Steinmetz- und Steinbildhauerwerkstatt
Denkmalpflege
Württembergischer Str. 28, 78567 Fridingen
Steinwerkstatt-Schnell@t-online.de

Gustav Treulieb

Treulieb Steinmanufaktur
Friedhofstr. 33–35, 70191 Stuttgart
post@treulieb-steinmanufaktur.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. rer.nat. Helmuth Venzmer
Ingenieur-Kontor
Fritz-Reuter-Straße 20, 23972 Dorf Mecklenburg
info@helmuth-venzmer.de

Dr. Eberhard Wendler
Fachlabor für Konservierungsfragen
in der Denkmalpflege
Mühlangerstrasse 50, 81247 München
e.wendler@t-online.de

Dr. Wolfgang Werner
Landesamt für Geologie, Rohstoffe
und Bergbau (RP Freiburg)
Albertstr. 5, 79104 Freiburg i. Br.
wolfgang.werner@rpf.bwl.de

Otto Wölbert
Landesamtes für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Fachbereich Restaurierung
Berliner Straße 12, 73726 Esslingen am Neckar
otto.woelbert@rps.bwl.de

Dr.-Ing. Hans-Werner Zier
Materialforschungs- und -prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystraße 9, 99423 Weimar
hans-werner.zier@mfpa.de

Natursteinsanierung

Neue Natursteinsanierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen

Alle Bände auf einen Blick

Natursteinsanierung Stuttgart 2014



Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2014, 128 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abbildungen u. Tabellen, Kartoniert
ISBN 978-3-8167-9167-6
E-Book: ISBN 978-3-8167-9168-3
BuchPlus: ISBN 978-3-8167-9223-9

Der Tagungsband der 20. Fachtagung Natursteinsanierung enthält wieder umfangreiche Fachartikel, die neue Verfahren und Erkenntnisse vorstellen.

So wird beispielsweise auf die Rolle des Architekten bei der Planung und Durchführung steinrestauratorischer Arbeiten am Beispiel der Veste Heldburg eingegangen und die Arbeitsweisen der Münsterbauhütte und der Berner Münster-Stiftung ausführlich vorgestellt. Außerdem werden moderne Bauaufnahmemethoden im Bezug zu bisherigen Forderungen nach Genauigkeitsstufen unter die Lupe genommen und es wird über die interdisziplinäre Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten und ihre Arbeit an Bogenbrücken aus Naturstein berichtet.

Natursteinsanierung Stuttgart 2013



Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2013, 120 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abbildungen u. Tabellen, Kartoniert
ISBN 978-3-8167-8924-6
E-Book: ISBN 978-3-8167-8925-3
BuchPlus: ISBN 978-3-8167-9020-4

Die Themen dieses Tagungsbandes sind u.a. die Konservierung und Restaurierung von englischem Alabaster und belgischem Kohlesandstein in der Bildkunst der norddeutschen Renaissance und die Konservierung von frei bewittertem römischen Ziegelmauerwerk bei den Kaiserthermen Trier. Die Simulation von Mauerwerken, um die besten Fugenmörtel auszuwählen sowie der Erhalt von Skulpturen aus vulkanischem Gesteinsmaterial unter Wassereinfluss werden ebenfalls behandelt. Weiterhin wird über die Arbeit der Freiburger Münsterbauhütte sowie über die statische Ertüchtigung der Wasserspeier am Westwerk des Magdeburger Doms berichtet.

Natursteinsanierung Stuttgart 2012

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2012, 160 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-8660-3

Der Tagungsband enthält umfangreiche Fachartikel, die neue Verfahren und Erkenntnisse vorstellen. So wird z.B. auf die Problematik bei gipshaltigem Mauerwerk und die Erkenntnisse aus einem Forschungsprojekt über die wiederentdeckten Romanelemente ausführlich eingegangen. Baukonstruktive und statische Untersuchungen am Turmhelm des Freiburger Münsters werden genauso beschrieben wie die Umbau- und Instandsetzungsmaßnahmen im Gläsernen Saalbau des Heidelberger Schlosses.

Natursteinsanierung Stuttgart 2011

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2011, 156 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-8461-6

Die Beiträge befassen sich mit der Erhaltung und Sanierung von Mauerwerksbauten aus Naturstein und mit denkmalgeschützten Betonbauten, die immer mehr in den Fokus rücken. Beispielhaft werden die Restaurierungen am ehemaligen Hindenburgbau in Stuttgart und die Restaurierungsarbeiten der Betonsäule „elements interchangeable« beschrieben.

Natursteinsanierung Stuttgart 2010

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2010, 196 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-8254-4

Bei der 16. Fachtagung wurden aktuelle Probleme und Möglichkeiten der Natursteinrestaurierung in Baden-Württemberg vorgestellt und diskutiert. Dazu gehörten u.a. die Arbeiten am Bahnhofsturm in Konstanz, an den Fassaden der St. Martinskirche in Neckartailfingen und am Kapellenturm in Rottweil. Ein großer Sonderbeitrag zur Verwendung, Verwitterung und Konservierung von Natursteinen auf alten Friedhöfen ergänzt die Vorträge.

Natursteinsanierung Stuttgart 2009

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2009, 136 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-7989-6

Im Spektrum stehen dieses Mal u.a. die Arbeiten an der Reutlinger Marienkirche, eine Zusammenstellung zur Kalk- und Mörtelherstellung in historischen Bild- und Schriftquellen, Konservierungsarbeiten am Figureschmuck des Dresdner Zwingers, die Sanierung der Marmorfassade des Staatstheaters in Darmstadt und die Instandsetzungsarbeiten am Herkules Bauwerk Kassel.

Natursteinsanierung Stuttgart 2008

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2008, 152 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-7553-9

Die Sanierungsarbeiten an der Walhalla in Donaustauf, Informationen und praktische Hinweise zur Sicherung von Bachkatzenmauerwerk, historische Mörtel und Putze in Nord- und Südtirol, die Farbigkeit am Freiburger Münster und die Steinkonservierungen an einer mittelalterlichen Kreuzigungsgruppe am Schloss Eberstein waren Themen der 14. Fachtagung Natursteinsanierung. Über ägyptische Baumaterialien und Steinkonservierungen wurde ebenfalls berichtet.

Natursteinsanierung Stuttgart 2007

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2007, 143 Seiten, zahlr. Abb. u. Tab., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-7311-5

Der Tagungsband enthält neben aktuellen Untersuchungsverfahren auch verschiedene Projekte aus der Praxis sowie neue Ergebnisse aus der Forschung. Es werden u.a. die Konservierungsarbeiten am Buntsandstein des Freiburger Münsters vorgestellt und über die verschiedenen Herangehensweisen beim Ersatz von geschädigtem Naturstein durch Beton am Regensburger Dom berichtet.

Natursteinsanierung Stuttgart 2006

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2006, 112 Seiten, zahlr. Abb., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-7016-9

Schwerpunktmäßig werden u.a. die gezielte Anwendung, Herstellung und Aufbau von Mörteln, Verfahren zur Entsalzung von Naturstein und Mauerwerk sowie Restaurierungskonzepte und bereits abgeschlossene Restaurierungen vorgestellt. Des Weiteren werden Methoden der Schadenerfassung sowie die Ergebnisse der Voruntersuchungen und die geplante Sanierung der ältesten Natursteinbrücke Deutschlands in Regensburg erläutert

Natursteinsanierung Stuttgart 2005

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2005, 142 Seiten, zahlr. Abb., Kartoniert
ISBN 978-3-8167-6718-3

In diesem Tagungsband finden Sie durchgeführte Voruntersuchungen und ausgeführte Sanierungsarbeiten an weltbekannten Objekten. Die Tempelanlagen von Angkor Wat kommen ebenso zur Sprache, wie der Aachener Dom und die baukonstruktiven Probleme des Meißner Doms. Anhand von Praxisbeispielen wie dem Ulmer Münster, der Kathedrale Chur, der Dresdner Frauenkirche sowie dem Markttor von Milet wird auf Konvervierungs- und Instandsetzungskonzepte an Fassaden und Natursteinen eingegangen.

Hrsg:

Gabriele Patitz | Gabriele Grassegger | Otto Wölbert

Natursteinbauwerke

Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen

Der Bestand an historisch bedeutsamen Natursteinbauwerken ist erheblich. Ihre natürliche Bausubstanz ist aber durch Umwelteinflüsse wie saurer Regen, Meeresluft oder CO₂ gefährdet. Um sie zu schützen und zu restaurieren ist ein behutsamer Umgang mit möglichst minimalen Eingriffen in die Originalsubstanz notwendig.

Für die Erfassung und Bewertung von Schäden sowie für die Planung und Ausführung von Instandsetzungen ist ein umfassendes Fachwissen erforderlich, das dieses Buch liefert. Vierzig Autoren, alles Spezialisten in den jeweiligen Fachgebieten, befassen sich ausführlich mit der sinnvollen Bestandsaufnahme am Gebäude, der Kartierung von Schäden sowie geeigneten Sanierungsmaßnahmen. Sie gehen dabei gezielt auch auf planerische Aspekte, Strategien zur Schadensprävention und aktuelle Normen ein.

ISBN 978-3-8167-9196-6



ISBN 978-3-8062-3036-9



Fraunhofer IRB  Verlag

THEISS