

The background of the cover is a photograph of a stone wall. The top section shows a close-up of large, rectangular stone blocks. The middle section features a Gothic-style window with a pointed arch and intricate tracery. The bottom section shows more of the stone wall, with some areas appearing more weathered or damaged.

Rolf Snethlage | Michael Pfanner

Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen
zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein

5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB  Verlag

In der Steinkonservierung sprechen begründete Schätzungen davon, dass sich Denkmalpfleger zur Hälfte ihrer Zeit mit den Folgen fehlgeschlagener Restaurierungen auseinandersetzen müssen.

Die Forschungen der letzten 35 Jahre haben den Kenntnisstand so erweitert, dass alle Maßnahmen der Steinkonservierung mit nachprüfbaren Anforderungskriterien beschrieben werden können, deren Einhaltung Bauschäden meist vermeidet und eine dauerhafte Erhaltung der Denkmalsubstanz sichert. Diese Kriterien stellen jedoch keine Richtlinien für die Anwendung einer ganz bestimmten Methode oder eines ganz bestimmten Konservierungsmittels dar. Starre Regeln verbieten sich bei den komplexen Fragestellungen der Denkmalpflege von selbst.

Dieser Leitfaden gibt deshalb keine Rezepte vor. Vielmehr werden dem Praktiker Hinweise gegeben, welche Probleme bei Steinkonservierungsmaßnahmen auftreten können. Er soll die Möglichkeit haben, dafür Lösungswege, keinesfalls aber Lösungsanweisungen zu finden.

Risikoziffer

Umweltschäden an Denkmälern aus Marmor- und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten
Gesamtrisikoziffern der im DBU-Projekt AZ 33 162/01-45 behandelten Objekte

Schlosspark Sanssouci



Apoll
Carrara Marmor
R(ges) = 0,49



Vestalin
Carrara Marmor
R(ges) = 0,65



Satyr
Carrara Marmor
R(ges) = 0,39

Barockgarten Großsedlitz



Hera Juno Original
Sandstein Typ Cotta
R(ges) = 0,64



Hera Juno Kopie
Sandstein Typ Cotta
R(ges) = 0,53



Rhea Kybele Original
Sandstein Typ Cotta
R(ges) = 0,64



Rhea Kybele Kopie
Sandstein Typ Cotta
R(ges) = 0,55

Schlosspark Nymphenburg



Äolus
Sterzinger Marmor
R(ges) = 0,60



Flora
Laaser Marmor
R(ges) = 0,59



Siegmund Sulzberger
Schilfsandstein
R(ges) = 0,41



Bernhard Ehrenbacher
Schilfsandstein
R(ges) = 0,40



Nr. 935 Löw Gans
Schilfsandstein
R(ges) = 0,45



Nr. 1091 Name unbekannt
Buntsandstein
R(ges) = 0,36

Rolf Snethlage, Michael Pfanner

Leitfaden Steinkonservierung

Rolf Snethlage, Michael Pfanner

Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen
zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein

5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Fraunhofer IRB Verlag

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 (Print): 978-3-7388-0307-5

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0308-2

Lektorat: Claudia Neuwald-Burg

Herstellung: Angelika Schmid

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH, Zwickau

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 dürfen.

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, 2020
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

Vorwort: Warum ein Leitfaden?

Keine Vorschriften

Der unbefangene wie der hellhörige Leser wird sich unwillkürlich fragen: Was soll ein Leitfaden? Handelt es sich wieder um eine neue Variante der Qualitätssicherung nach ISO 9000? Brauche ich das überhaupt?

Gewiss, die Angst vor weiteren Vorschriften und Reglementierungen ist nicht ganz unberechtigt. Es besteht aber auch ein nicht zu bestreitender Bedarf für solche Regelwerke, gerade im Zusammenhang mit Ausschreibungen.

Der Leser möge nicht befürchten, es sei das Ziel dieses Buches, verpflichtende Richtlinien aufzustellen. Vielmehr soll der Leitfaden die Erkenntnisse, die in der Forschung seit nun mehr als 35 Jahren in großem Umfang gewonnen wurden, für den Praktiker erläutern, in Kriterien für eine gute Anwendung umformen und damit für die Praxis nutzbar machen. Er will dem Bedürfnis nach Anleitungen zur Qualitätssicherung in der Steinkonservierung entgegenkommen und auf diese Weise dazu beitragen, die an die Naturwissenschaftler gestellten Fragen leicht verständlich zu beantworten:

- Welche Konservierungsmittel sind richtig?
- Wie dauerhaft sind unsere Konservierungsmaßnahmen?
- Was muss ein Restaurator beachten?

Solch komplexe Fragen verbieten aus zwei Gründen von vornherein feste Vorschriften. Zum einen sind die Aufgaben der Konservierung so spezifisch und verschiedenartig, dass sie nie in einem Katalog von Vorschriften festgeschrieben werden könnten, zum anderen verbietet die Tatsache, dass Forschung für bislang nur unzureichend gelöste Fragen neue und bessere Lösungswege finden wird, jedwede starre Regeln, die doch nur in wenigen Jahren schon wieder veraltet sein könnten.

Die Berufsgruppe der Restauratoren und Konservatoren

An wen richtet sich der Leitfaden? An alle in der Restaurierung und Konservierung tätigen Berufsgruppen, angefangen beim Handwerker über den Restaurator bis hin zum Kunsthistoriker, Architekten, Naturwissenschaftler und nicht zuletzt an die zuständigen Ämter, Auftraggeber und Denkmalbehörden. Eine gelungene Konservierungsmaßnahme zeichnet sich durch ihre Interdisziplinarität aus und gründet auf der funktionierenden Kommunikation aller Beteiligten. So individuell wie die Maßnahmen selbst sind auch die Berufe und Aufgaben:

Wissenschaftler nehmen Voruntersuchungen, Archivrecherchen und naturwissenschaftliche Tests vor; Bauforscher, spezialisierte Büros und Statiker kümmern sich um Pläne und Konstruktion; für einen reibungslosen Ablauf der Maßnahme zuständig

sind Architekten oder Restauratoren; ausgeführt werden die Arbeiten von Handwerkern und Restauratoren, die in den jeweiligen Materialien oder Fachgebieten versiert sind. Es ist jedoch schwierig, eindeutige Grenzen zwischen den Begriffen und Tätigkeiten zu ziehen. So gibt es neben den handwerklichen Restauratoren die Diplom- und Master-Restauratoren der Studiengänge Restaurierung und Konservierung an Fachhochschulen und Universitäten, oft spezialisiert auf bestimmte Materialien.

Masterstudiengänge in der Denkmalpflege bieten für Architekten, Kunsthistoriker und Restauratoren eine zusätzliche Weiterbildung an. Auskunft und Überblick zu den Ausbildungsmöglichkeiten in Deutschland findet man beim Verband der Restauratoren (VDR; www.restauratoren.de) sowie beim Restaurator im Handwerk e. V. (www.restaurator-im-handwerk.de); das alle zwei Jahre erscheinende Restauratoren Handbuch ermöglicht einen schnellen und kompakten Einstieg und Überblick (Restauratoren Handbuch 2018/2019). In Österreich (www.dieangewandte.at/restaurierung und www.orv.at) und in der Schweiz (www.handwerkid.ch und www.restaurierung.swiss/de) gibt es ebenfalls spezielle Ausbildungen und Studiengänge.

Mit einem gewissen Bedauern ist zu beobachten, dass sich praktische und theoretische Restaurierung zusehends spalten. Oftmals verfügen die akademisch ausgebildeten Restauratoren nicht mehr über die handwerklichen Erfahrungen und Fertigkeiten, die man gerade bei Konservierungsmaßnahmen am Bau benötigt. Eine handwerkliche Ausbildung oder Lehre ist nach wie vor die beste Voraussetzung. Denn der heutige Restaurator restauriert nur das, was seine Vorgänger, die Handwerker, einst geschaffen haben. In manchen Ländern wie in Polen oder Ungarn ist die Ausbildung teilweise praktischer ausgerichtet. Nicht zufällig sind die Restauratoren aus diesen Ländern zusehends gefragt.

Keine fertigen Rezepte – Kooperation und Diskussion!

Welchen Zweck verfolgt der Leitfaden also? Er soll helfen, für jedes Objekt die seinem Charakter gerecht werdende, bestmögliche Behandlungsmethode zu finden, so komplex und schwierig die fachlichen Probleme auch sein mögen. Das bedeutet aber gerade nicht das gedankenlose Anwenden von Rezeptbüchern und Vorschriften, sondern die Bereitschaft, aus einem Katalog von Möglichkeiten im interdisziplinären Disput den besten Lösungsweg zu finden und konsequent zu beschreiten. Der Leitfaden will deshalb besonders zum fruchtbaren Dialog auffordern, damit klare Entscheidungen getroffen werden. Es ist nicht gefordert, dass diese Entscheidungen immer absolut richtig sind. Es kann sogar vorkommen, dass sie sich auf lange Sicht als falsch erweisen. Entscheidend ist aber, dass die Beschlüsse voll und ganz den Stand des Wissens und der Technik berücksichtigen, sodass die Maßnahmen schlussendlich höchsten Qualitätsstandards genügen.

Naturwissenschaftliche Kriterien als Hilfe für den Restaurator

In den vergangenen 35 Jahren sind durch die vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) bzw. vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekte viele Ergebnisse erzielt worden, die gesicherte Kriterien für die Bewertung von Konservierungsmaßnahmen aufzustellen erlauben. Diese Kriterien sollten natürlich auch eingehalten werden. Sie stellen jedoch keine Richtlinien für die Anwendung einer ganz bestimmten Methode oder eines ganz bestimmten Konservierungsmittels dar, sondern sind Hilfsmittel, um das beste Produkt und die beste Anwendungsmethode zu finden.

Richtig verstanden limitieren diese Kriterien die restauratorische Freiheit nicht, sondern gewährleisten Resultate, die dem neuesten Stand des Wissens und der Technik entsprechen. Der Leitfaden soll allen Fachleuten in der Steinkonservierung einen Weg aufzeigen, aufgrund welcher Kriterien die bestmöglichen Entscheidungen getroffen werden können, und er soll die Gewissheit vermitteln, dass die mit diesen Entscheidungen eingeleiteten Maßnahmen die denkbar bestgeeigneten für die Erhaltung des betreffenden Denkmals darstellen.

In erster Linie ist dieser Leitfaden selbstverständlich für die praktische Steinkonservierung gedacht, in der sich Geisteswissenschaft, Restaurierungs- und Naturwissenschaft treffen sollen. In zweiter Linie kann er aber auch dazu verwendet werden, bei der Markteinführung von Produkten diejenigen Kriterien festzulegen, welche die neuen Produkte erfüllen müssen.

Vom richtigen Umgang mit dem Leitfaden

Um es noch einmal zu wiederholen: Dieser Leitfaden ist nicht geschrieben worden, um starre Regeln aufzustellen, sondern um Hilfen zu geben. Dem Praktiker sollen Hinweise gegeben werden, welche Probleme bei Steinkonservierungsmaßnahmen auftreten können, und er soll die Möglichkeit haben, dafür Lösungswege, keinesfalls aber Lösungsanweisungen zu finden.

Das diesem Leitfaden zugrunde liegende »Idealprojekt« stellt sich ohne Zweifel fast beängstigend umfangreich dar, und die Verfasser, selbst hinreichend mit der Praxis vertraut, sind natürlich nicht so vermessen zu glauben, dass ein derartiges Untersuchungsprogramm in jedem Fall auch sinnvoll, geschweige denn bezahlbar wäre.

Es ist aber das Ziel, möglichst alle Aspekte zu berücksichtigen, damit im Einzelfall das »Idealprogramm« zusammengestellt werden kann, das ganz auf die individuellen Bedürfnisse des Objekts ausgerichtet ist. Dies geschieht am besten anhand der

Inhaltsübersicht, die am Anfang jedes Kapitels steht und in der mit Hilfe der Kategorisierung in

- »unverzichtbare Maßnahme« (***)
- »meist erforderliche Maßnahme« (**) und
- »optionale Untersuchung oder Maßnahme« (*)

die eindeutigen Prioritäten gesetzt sind.

Aus dieser Wertung wird schon ersichtlich, dass sich die Anzahl der tatsächlich durchzuführenden Untersuchungen beträchtlich reduziert, und das Gesamtprojekt sicher nicht den Umfang des gesamten Leitfadens einnehmen wird. Unter die Zahl der »unverzichtbaren Maßnahmen« sollte man aber keinesfalls gehen, da ansonsten die Minimalanforderungen an die Qualität und Nachprüfbarkeit der Maßnahmen nicht mehr gewährleistet sind.

Um Missverständnissen vorzubeugen, seien zwei Beispiele zur Anwendung der Inhaltsübersicht näher erläutert:

Laboruntersuchungen zur Festigung (Kapitel 9.2) und Erprobung an einer Musterfläche sind selbstverständlich nur dann »unverzichtbar«, wenn die Festigkeitsmessungen (Kapitel 6.4.8) im Arbeitsschritt »Untersuchungen zur Schadensdiagnose« (Kapitel 6.4) ergeben haben, dass eine Festigung nötig ist. Die Kategorie »unverzichtbar« soll also zum Ausdruck bringen, dass eine Festigungsmaßnahme ohne vorige Laboruntersuchungen und Erprobung an einer Musterfläche abzulehnen ist. Vergleichbares gilt für die Ausführung der Maßnahmen (Kapitel 13.2); sie ist logischerweise »unverzichtbar«. Die eigentlichen Maßnahmen wie Reinigung, Festigung usw. bleiben dagegen je nach Notwendigkeit »möglicherweise erforderlich«.

Der richtige Umgang mit diesem Leitfaden liegt also im eigenverantwortlichen und kritischen Benutzen der hier gemachten Vorschläge, die dazu beitragen sollen, fundiert zu planen und konsequente Projektverfolgung zu betreiben. In der Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz (DNK) ist 1998 eine sehr nachdenklich stimmende Broschüre »Schon aufgegeben und doch erhalten« erschienen, die in eindringlicher Weise die Bedrohung gefährdeter, dennoch sehr markanter Denkmäler durch »normierte« Begutachtungen erläutert. Möge der Leitfaden zu der Erkenntnis beitragen, dass auch für scheinbar dem Verfall preisgegebene Denkmäler immer noch Lösungen zu deren Bewahrung gefunden werden können.

Anmerkungen der Verfasser

Der vorliegende Leitfaden stellt die ergänzte und erweiterte Neuauflage des Leitfadens von 2013 dar. Er berücksichtigt die wichtigsten, seit der letzten Auflage zum Thema Steinkonservierung erschienenen Publikationen.

Die Neuerungen der 5. Auflage betreffen u. a. Folgendes:

In Kapitel 3 wird die Bedeutung der »Archivarbeiten« besonders gewürdigt, ergänzen und fundieren sie doch viele, in diesem Buch vorgestellten, naturwissenschaftlichen Untersuchungen.

Im Kapitel 6.2.2.3 über 3D-Techniken sind die Ausführungen zur Vermessung und Kartierung von Objekten grundlegend überarbeitet worden. Der Abschnitt über elektronische Archive wie »MonArch« ist deshalb seiner Bedeutung gemäß vertieft abgehandelt.

In den Kapiteln 9 und 11 werden neuere Reinigungsmethoden wie Rucksacklaser oder Trockeneis vorgestellt. Die oftmals verpönten »Steinvierungen« erfahren als handwerklich anspruchsvolle Restaurierungstechnik eine angemessene Würdigung.

Die Kapitel 12 und 14 behandeln die nach wie vor kaum zu lösende Unvereinbarkeit von DIN- und EN-Normen, VOB (Vergabe- und Vertragsordnungen für Bauleistungen) und den sog. Anerkannten Regeln der Technik mit den Erfordernissen der Restaurierung. Bei der Erstellung eines LVs (Leistungsverzeichnisses) haben die Architekten nicht selten eine Gratwanderung zu machen, zumal bei öffentlichen Aufträgen – ein Großteil von Restaurierungsobjekten fällt darunter – die VOB bindend ist. Umso wichtiger ist es sowohl für den Planer als auch die ausführende Firma, diese VOB genau zu kennen. Sie kann und darf nicht einseitig zu Gunsten oder Ungunsten einer Partei abgewandelt werden.

Das Kapitel 11 »Ausarbeitung eines konkreten Maßnahmenplans« hat eine umfangreiche Aktualisierung erfahren, um die neuen digitalen Methoden ihrer Bedeutung gemäß einzuführen.

Im Vorspann sind aufgrund von Überlegungen, den Leitfaden für Nicht-Fachleute und Quereinsteiger leichter verständlich zu machen, gänzlich neue Kapitel eingefügt worden, die eine Einführung in die fachlichen Grundlagen anbieten:

- Genese und Eigenschaften von Gesteinen
- Marmor – Eigenschaften und Verwitterung
- Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden – kleine Einführung in die chemischen Grundlagen
- Risikoziffer – Umweltschäden an Skulpturen aus Marmor und Sandstein erfassen und objektiv bewerten.

Die Verfasser wollen mit diesen Kapiteln dem Neueinsteiger grundlegende Verständnisfragen wie in einem Kurzlehrbuch nahebringen.

Bedauerlicherweise hat es seit der letzten Auflage bei der Entwicklung und Erprobung von neuen Konservierungsmitteln kaum Neuerungen gegeben. Es zeigt sich, dass die mangelnde Förderung dieser Forschung in Deutschland auch durch die verdienstvollen DBU-Projekte nicht ausgeglichen werden kann. Die Resultate, welche in

dem BMFT-Programm »Steinzerfall – Steinkonservierung« erzielt wurden, sind bis heute nicht übertroffen worden und dienen weiterhin als Grundlage für die Ableitung von Anwendungskriterien.

Die an die Praxis gebundenen Projekte der DBU können diese Lücke schon aufgrund ihrer Orientierung nicht schließen. Sie erlauben eigentlich nur den Einsatz bekannter Konservierungsmittel und -methoden; die Entwicklung neuer Stoffe und Verfahren bedarf jedoch der Loslösung vom Einzelobjekt und die Hinwendung zum Modellfall, d. h. die Erprobung der neuen Stoffe und Methoden an Modellmaterialien im Labor. Demgegenüber hat die Förderung durch die DBU den unschätzbaren Vorteil, Denkmalpflege, Konservierungswissenschaften und Naturschutz miteinander zum gegenseitigen Nutzen zu verbinden, wodurch sich vollkommen neue Argumente und Strategien zur Erhaltung von Denkmälern ergeben.

Auch die Förderung auf EU-Ebene hat nur wenige Fortschritte für die Konservierungswissenschaft gebracht. In den vergangenen Jahren ist sie im Bereich »Cultural Heritage« sogar fast zum Erliegen gekommen. Die geringe Resonanz der EU-Förderung hat vor allem den Grund, dass es großer zeitlicher und organisatorischer Anstrengungen bedarf, ein internationales Team aus mehreren Nationen zusammenzustellen. Ist das gelungen, dann liegen die Erfolgsaussichten auf eine Förderung immer noch bei weniger als 10 %, sodass die meisten potentiellen Antragsteller vor diesem übergroßen und selten von Erfolg gekrönten Aufwand zurückschrecken.

Der besondere Dank der Verfasser gilt denjenigen Kollegen, welche durch Hinweise, Korrekturarbeiten oder das bereitwillige Überlassen von Fotos und Zeichnungen das Entstehen des Leitfadens aktiv gefördert haben: Dr. Th. Aumüller, Prof. Dr. A. Boué, Prof. Dr. R. Drewello, Dipl.-Ing. M. Hartmann, M. Hauck M. Sc., Dipl.-Ing. D. Kollmann, Dipl.-Ing. (FH) J. Pfanner, Dr. R. Pick, Dipl.-Ing. L. Heim-Reichenbach, Prof. Dr. H.-R. Sasse, Dr. H. Schuh, Dr. E. Wendler, Dipl.-Ing. N. Wetter, sowie Hüttenmeister U. Först und Herr R. König M. Sc. von der Dombauhütte Bamberg. Für die vorliegende 5. Auflage steuerten Stephanie Hodek M. Sc., Christa Pfanner-Birkeneder M.A., Dipl.-Ing. Viola Rein und Dipl.-Ing. Florian Winkler wichtige Ergänzungen und Anregungen bei.

Dank gebührt auch immer noch dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, das den Gedanken des Leitfadens zur Verbreitung der Forschungsergebnisse des Förderschwerpunktes »Naturwissenschaftliche Forschung für den Denkmalschutz« seinerzeit 1995 nachhaltig unterstützt hat.

Abschließend möchten die Verfasser darauf hinweisen, dass wertvolle ergänzende Informationen den DIN-Normen, den Merkblättern der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft (WTA) und den Arbeitsblättern des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege entnommen werden können. Die entsprechenden Verweise sind dem Literaturverzeichnis im Anhang zu entnehmen.

Inhaltsübersicht

Erläuterungen zu den fachlichen Grundlagen der Natursteinkonservierung 13

E1	Genese und Eigenschaften von Gesteinen	15
E2	Marmor – Eigenschaften und Verwitterung	31
E3	Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden – kleine Einführung in die chemischen Grundlagen	41
E4	Risikoziffer – Umweltschäden an Skulpturen aus Marmor und Sandstein erfassen und objektiv bewerten	71

Leitfaden Steinkonservierung 79

Detaillierte Inhaltsverzeichnisse finden Sie am Anfang eines jeden Kapitels mit einer Zuordnung der Maßnahmen und Untersuchungen in die Kategorien

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme.

1	Erste Sitzung der Projektleitung	***	81
2	Objektidentifikation	***	95
3	Archivarbeiten	***	103
4	Mauerwerk und Statik	*	113
5	Hydrogeologie	***	127
6	Bestandsaufnahme	***	135
7	Zweite Sitzung der Projektleitung	***	179
8	Klima- und Schadstoffmessungen	**	183
9	Methoden und Laboruntersuchungen zur Konservierung	***	193
10	Dritte Sitzung der Projektleitung	***	285
11	Bearbeitung der Musterfläche (Probefläche)	***	291
12	Vierte Sitzung der Projektleitung		349
13	Begleitung und Ausführung der Maßnahmen	***	365
14	Fünfte Sitzung der Projektleitung	***	379
15	Nachkontrolle, Monitoring und Wiederbehandlung	**	383
16	Sonderverfahren Acrylharzvolltränkung (AVT)	*	399
17	Sechste Sitzung (Abschlusssitzung) der Projektleitung	***	405
	Anhang		411

Erläuterungen zu den fachlichen Grundlagen der Natursteinkonservierung

E1 Genese und Eigenschaften von Gesteinen

Inhalt

E1.1	Die drei Gesteinsklassen	17
E1.1.1	Magmatische Gesteine (Erstarrungsgesteine)	17
E1.1.2	Sedimentäre Gesteine (Ablagerungsgesteine)	18
E1.1.3	Metamorphe Gesteine (Umwandlungsgesteine)	18
E1.2	Die Eigenschaften von Gesteinen	19
E1.2.1	Magmatische Gesteine	19
E1.2.2	Metamorphe Gesteine	21
E1.2.3	Sedimentäre Gesteine	24
E1.2.3.1	Sandsteine	25
E1.2.3.2	Kalksteine	27
E1.3	Schlussfolgerungen	29
E1.4	Weiterführende Literatur	30

E1 Genese und Eigenschaften von Gesteinen

E1.1 Die drei Gesteinsklassen

Auf der Erde sind derzeit mehr als 1 000 unterschiedliche Gesteine bekannt. Trotz ihrer Vielzahl lassen sie sich in drei verschiedenen Gruppen zusammenfassen:

1. Magmatische Gesteine
2. Sedimentäre Gesteine
3. Metamorphe Gesteine

E1.1.1 Magmatische Gesteine (Erstarrungsgesteine)

Magmatische Gesteine bilden sich aus einem flüssigen, sehr heißen Magma (Gesteinsbrei). Das Magma entsteht in den tieferen Schichten der Erdkruste oder im Erdmantel (Bild 1). Weil es leichter ist als das umgebende feste Gestein, wandert es entlang von Schwächezonen und Spalten nach oben, wobei es ständig umgebendes Gestein aufnimmt und ganz oder teilweise aufschmilzt. Erstarrt das Magma unterhalb der Erdoberfläche, bezeichnet man das entstehende Gestein als Plutonit (Tiefengestein), dringt es durch Vulkane oder entlang von auseinanderdriftenden Kontinentalplatten an die Erdoberfläche, spricht man von einem Vulkanit (Ergussgestein, Eruptivgestein).

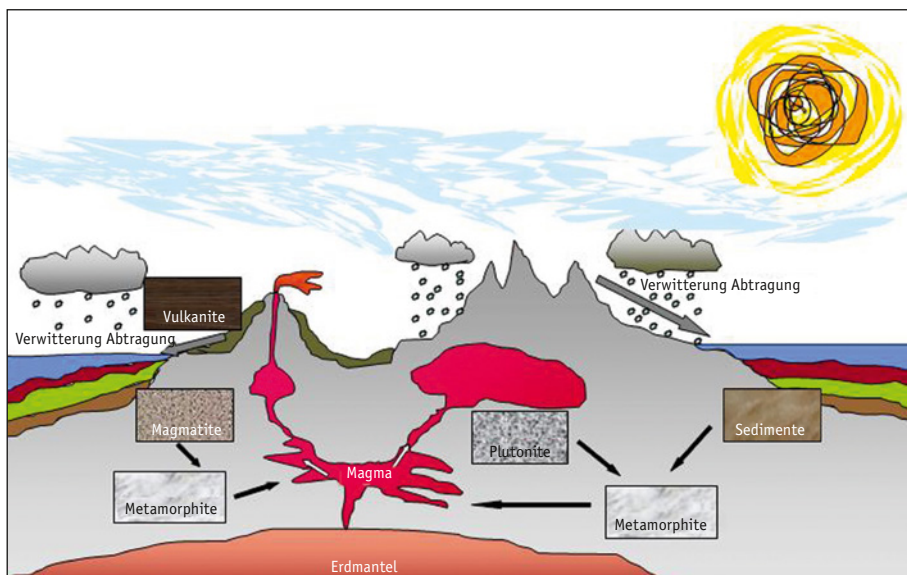


Bild 1: Kreislauf der Gesteine

Endogene und exogene Kräfte sorgen auf der Erde für einen ständigen Wechsel der Morphologie der Erdkruste. Endogene Kräfte heben Gesteinsformationen zu Gebirgen auf, wo sie einer verstärkten Erosion durch exogene Kräfte (Hitze – Frost, Trockenheit – Niederschlag, Wind, Sonneneinstrahlung) ausgesetzt sind und verwittern. Mechanischer Transport in Form von Felsstürzen und fließendem Wasser bringt die Gesteinsbruchstücke zu Tal, von dort weiter über die Kontinente bis zum Meer. Die zuerst noch großen Gesteinsblöcke werden zerbrochen, zu Geröllen zerkleinert und letztlich zu feinem Sand und Schluff zerrieben. Die Ablagerungen dieser Materialien nennt man Sediment.

E1.1.2 Sedimentäre Gesteine (Ablagerungsgesteine)

Sedimentäre Gesteine bilden sich an Flüssen, in Seen und im Meer, wenn die Kraft des fließenden Wassers nicht mehr für einen Weitertransport der Sedimentfracht ausreicht. Man unterscheidet zwischen klastischen, biogenen und chemischen Sedimenten. Erstere entstehen durch die Ablagerung von festen Gesteins- oder Mineralfragmenten, letztere durch die Ausfällung chemischer Verbindungen, meist aus dem Meerwasser. Biogene Sedimente bestehen aus den Schalen lebender und toter Organismen, z. B. Muschel oder Korallen. Die Verfrachtung von feinem Sand und Staub durch Wind führt zur Bildung von äolischen Sedimenten (z. B. die Lössvorkommen im periglazialen Bereich in Oberbayern oder in den nördlichen Provinzen Chinas). Eine Besonderheit stellen pyroklastische Sedimente dar, welche aus den Aschen bei einem Vulkanausbruch gebildet werden (z. B. Rheinische Tuffe).

Die Überlagerung der Sedimente durch immer neue Schichten führt zu einem Absinken in tiefere Zonen der Erdkruste, verbunden mit einem Anstieg von Temperatur und Druck. Die an der Erdoberfläche stabilen Mineralgesellschaften wandeln sich in neue Mineralparagenesen um. Durch Umwandlung anderer Gesteine gebildete Gesteine heißen metamorph.

E1.1.3 Metamorphe Gesteine (Umwandlungsgesteine)

Metamorphe Gesteine entstehen aus vormals anderen Gesteinen, die in tiefere Erdschichten verlagert wurden. Sie sind durch besondere Mineralvergesellschaftungen (Paragenesen) gekennzeichnet und besitzen häufig eine typische Paralleltextur. Zu jedem Ausgangsgestein gibt es ein metamorphes Pendant, worauf später noch näher eingegangen wird.

Sinken die metamorphen Gesteinspakete in noch tiefere Schichten der Erdkruste ab, sodass die Schmelztemperatur überschritten wird, beginnt die Aufschmelzung, zunächst in Teilen, dann vollständig. Der Kreislauf ist geschlossen, ein neues magmatisches Gestein kann entstehen. Gesteine, die den Zustand der partiellen Aufschmel-

zung zeigen, nennt man Migmatite. Diese haben häufig ein optisch ansprechendes Erscheinungsbild und sind als Dekorationsgesteine besonders beliebt.

Wie Bild 1 zeigt, führt die Dynamik der Erdkruste auch dazu, dass Plutonite und Magmatite direkt in die tiefe Erdkruste absinken und dort zu metamorphen Gesteinen werden können. Metamorphe Gesteine verwittern, wenn sie an die Erdoberfläche gelangen, und werden zu Sedimenten umgelagert. Sedimente können aufgebrochen und zu neuen Sedimenten geschichtet werden. So sind alle drei Gesteinstypen – magmatische, sedimentäre, metamorphe – miteinander verbunden und ständigem Wandel unterzogen. Dies hat dazu geführt, dass die Spuren des ersten Lebens weitgehend vernichtet sind, weil die Gesteine, in denen sich diese Spuren finden könnten, im Verlauf der Erdgeschichte bereits einmal oder sogar öfter umgewandelt wurden.

E1.2 Die Eigenschaften von Gesteinen

E1.2.1 Magmatische Gesteine

Magmatische Gesteine entstehen aus Silikatschmelzen. Diese können SiO_2 -reich oder SiO_2 -arm sein. Im ersteren Fall spricht man von einem sauren Magma, im zweiten Fall von einem basischen Magma. Die Bezeichnung sauer oder basisch bezieht sich auf den Gehalt an Alkalien (Na^+ , K^+), Erdalkalien (Ca^{2+} , Mg_{2+}) sowie Fe^{2+} und Fe^{3+} im Verhältnis zu SiO_2 . In einem basischen Magma ist das Verhältnis SiO_2 zu ($\text{MgO} + \text{CaO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) annähernd 1. Es bilden sich Minerale wie Olivin, Pyroxen oder Ca-reiche Plagioklase, wodurch das gesamte SiO_2 , das im Magma vorhanden ist, verbraucht wird.

In sauren Gesteinen, in welchen die Alkalien K_2O und Na_2O vorherrschend sind, ist das Verhältnis SiO_2 zu ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) weitaus größer als 1. Nachdem im Lauf der Kristallisation alle Alkalien durch die Bildung von Kali- und Natronfeldspäten und Glimmer verbraucht sind, bleibt ein beträchtlicher Rest an SiO_2 übrig, welcher dann zum Abschluss der Erstarrung des Magmas als Quarz in Erscheinung tritt (Bild 2).

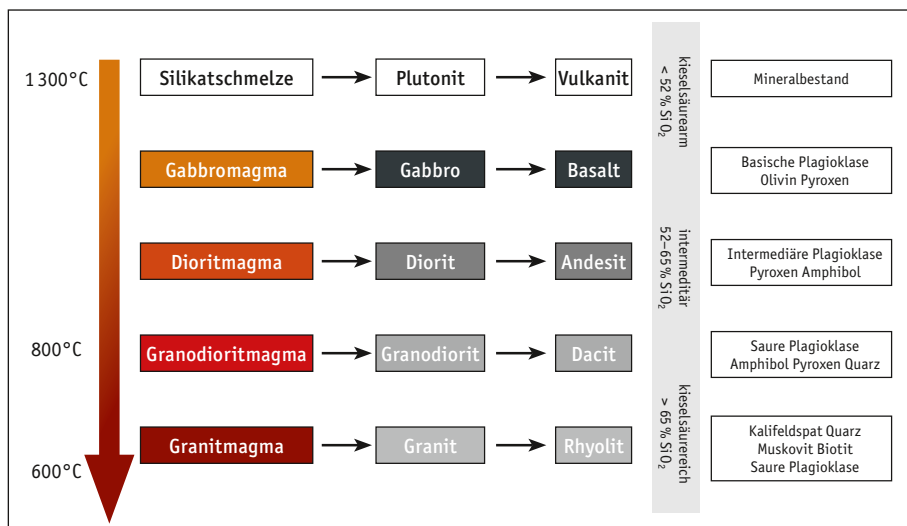


Bild 2: Nomenklatur und Mineralbestand der wichtigsten magmatischen Gesteine (Amphibol = Hornblende)

Aus Bild 2 lässt sich ablesen, dass ein Gabbro- bzw. Basaltmagma etwa 1200 °C heiß ist. Es ist dünnflüssig und hat einen SiO₂-Gehalt von < 52 Gew-%. Die betreffenden festen Gesteine bestehen hauptsächlich aus Pyroxen, Ca-reichen Feldspäten und Olivin. Ein Granitmagma ist wesentlich weniger heiß (nur noch etwa 700 °C) und zäher. Der SiO₂-Gehalt beträgt > 65 Gew-%. Die Mineralparagenesen sind Kalifeldspat, Muskovit, Biotit, Natronfeldspat und Quarz. Die niedrigere Temperatur und die Zähigkeit bedingen, dass Granitmagmen, im Gegensatz zu den flüssigen Basaltmagmen, zumeist in der Erdkruste stecken bleiben. Die meisten Vulkane liefern deshalb basaltische oder intermediäre Magmen. Aus diesem Grund findet man auf der Erde viel Basalt und wenig Gabbro, viel Granit und wenig Rhyolith.

Die SiO₂-Gehalte der intermediären Magmen von Diorit und Granodiorit liegen bei 52–65 Gew%. Sie weisen noch keinen Überschuss an SiO₂ auf. Die vorherrschenden Mineralparagenesen umfassen vor allem Amphibole (Hornblenden), intermediäre bis saure Plagioklase, Pyroxene und in der Regel noch keinen freien Quarz. Die analogen Ergussgesteine zu Diorit und Granodiorit heißen Andesit und Dacit.

Die Minerale Olivin, Pyroxen und Amphibol, die sich aus basischen und intermediären Magmen bilden, besitzen eine dunkle Farbe. Die entsprechenden Gesteine sind deshalb dunkel bis dunkelgrau gefärbt (Bild 3). Kalifeldspäte und Quarz, die sich aus sauren Magmen bilden, besitzen eine hellgraue Farbe oder sind farblos. Granite sind deshalb zumeist hellgrau bis weißlich.



Bild 3: Magmatische Gesteine

Die Verwitterungsbeständigkeit von Graniten und verwandten Gesteinen ist allgemein sehr gut. Vorsicht mag nur geboten sein, wenn die Feldspäte aufgrund der geologischen Vorgeschichte bereits stark in Kaolin oder den Glimmer Serezit umgewandelt sind.

Die Porosität der magmatischen Gesteine ist außerordentlich gering. Sie reicht von 0,1 bis maximal etwa 3,0 Vol-%, mit einem Mittelwert um 1,0 Vol-%. Frostopfindlichkeit ist aus diesem Grund nicht gegeben, zumal die Mineralkörner aufgrund der Bildung aus einem Magma sehr dicht aneinander liegen und miteinander verzahnt sind.

Aufgrund der großen Härte sind magmatische Gesteine nur selten für Bildhauerarbeiten verwendet worden. Auch bei Denkmalgebäuden spielen sie außer in Granitregionen eine untergeordnete Rolle. Ihr Hauptverwendungsgebiet liegt in der Grabmalkunst. Besonders beliebt waren und sind die schwarzen Granite aus Schweden, die auch nach mehr als 100 Jahren freier Bewitterung noch die ursprüngliche Politur zeigen.

E1.2.2 Metamorphe Gesteine

Die metamorphen Gesteine bilden die kleinste Gruppe der drei Gesteinsklassen. Sie entstehen durch die Umwandlung anderer Ausgangsgesteine in tiefen Schichten der Erdkruste. Zu jedem Ausgangsgestein existiert ein metamorphes Analoggestein. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Gesteinspaare.

Je nach Versenkungstiefe entstehen aus identischen Ausgangsgesteinen unterschiedliche metamorphe Gesteine, weil sich die gebildeten Mineralparagenesen mit jeder Tiefenstufe wieder verändern. Diese Mineralumwandlung geschieht im festen Zustand bei Gegenwart einer fluiden, d. h. überkritischen wässrigen Phase. Bevor die Aufschmelzung beginnt, können die Metamorphosebedingungen Temperaturen von nahe 1000 °C und Drucke größer als 6 kbar erreichen. Damit unter diesen Bedingungen noch keine Aufschmelzung beginnt, müssen die Gesteine außerordentlich trocken sein.

Die bekanntesten metamorphen Gesteine sind Marmor und Gneis; der erstere wird aus einem Kalkstein gebildet, der letztere aus einem Granit (Orthogneis) oder aus einem Tonsediment (Paragneis). Die schwarzen Tonschiefer, die vielfach auf Dächern oder als Fassadenverkleidung Verwendung gefunden haben, stehen ganz am Anfang der Metamorphose. Sie sind durch ihre ausgezeichnete Spaltbarkeit bekannt. Dies gilt auch für die zahlreichen Grünschiefer, welche in alpinen Regionen oft als Dachschiefer eingesetzt wurden.

Tabelle 1: Einige Ausgangsgesteine und ihre metamorphen Analoggesteine

Ausgangs- gestein	Ton	Kalk- schlamm Kalksand	Quarzsand	Granit	Basalt
Metamor- phose					
beginnend 100–200 °C, 0–1 kbar	Tonschiefer	Kalkstein	Sandstein	Granit	Basalt
niedrig 200–300 °C, 1–2 kbar	Phyllit	Marmor	Quarzit		Grünschiefer
mittel 300–400 °C, 2–4 kbar	Grünschiefer			Orthogneis	Amphibolit
hoch 400–600 °C, 4–6 kbar	Paragneis				
sehr hoch 600–1000 °C, > 6 kbar	Granulit				

Metamorphe Gesteine spielen mit Ausnahme von Marmor für die Konservierung keine große Rolle. Das liegt vor allem daran, dass sie aufgrund der schieferartigen Textur für Bauzwecke oder zur Herstellung von Skulpturen wenig geeignet sind. Bestimmte Tonschiefer und Grünschiefer wurden und werden hingegen häufig als Dachschiefer verwendet, weil sie sich leicht in dünne Platten spalten lassen und trotz ihrer guten Spaltbarkeit frostbeständig sind.



Bild 4: Metamorphe Gesteine

Das für die Konservierung wichtigste metamorphe Gestein ist der Marmor. Seit der Antike wird er für die kostbarsten Bildhauerarbeiten verwendet. Das gleichmäßige, isotrope Gefüge macht ihn bei gleichzeitig geringer Korngröße für die Herstellung feinsten bildhauerischer Details geeignet. Das Gefüge von Marmor ist im bruchfrischen Zustand sehr dicht. Die Gesamtporosität beträgt zwischen 0,1 bis 0,5 Vol-%. Im verwitterten Zustand kann sie auf 2–3 Vol-% ansteigen.

Im bruchfrischen Marmor sind die Calcitkristalle allseits miteinander verzahnt. Zwischen ihren ebenen Begrenzungsflächen bestehen feine Spaltporen mit einem Durchmesser um $10\ \mu\text{m}$. Das Verwitterungsverhalten von Marmor wird wesentlich durch die besonderen physikalischen Eigenschaften des Calcitkristalls bestimmt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient α eines Calcitkristalls beträgt parallel zu seiner c-Achse $+26 \cdot 10^{-6}\ (\text{K}^{-1})$, senkrecht dazu jedoch $-6 \cdot 10^{-6}\ (\text{K}^{-1})$. Er dehnt sich also bei Erwärmung parallel zu seiner c-Achse aus, senkrecht dazu zieht er sich zusammen. Dadurch kommt es bei jedem Temperaturwechsel zu einer Gefügespannung in Richtung der c-Achse bzw. zu einer Aufweitung der Spaltporen in Richtung senkrecht zur c-Achse. In Laborexperimenten hat man gemessen, dass bei jeder Temperaturänderung irreversible Verformungen des Gefüges zurückbleiben. Befindet sich zusätzlich Feuchtigkeit im Porenraum, wachsen diese Verformungen sogar noch an und die Schädigung des Gefüges fällt noch stärker aus.

Thermische und hygrische Belastungen können auf Dauer zu einer vollständigen Zerrüttung des Gefüges führen, was sich in Form eines zuckerkörnigen Absandens offenbart; die Calcitkörner lassen sich ohne Mühe mit der Hand von der Oberfläche

abreiben. Ist eine Marmorfigur so stark geschädigt, kann sie vollständig in sich zusammenfallen.

Der Verwitterungsgrad von Marmor lässt sich sehr gut mit Hilfe der Ultraschallgeschwindigkeit verfolgen. Bei einem bruchfrischen Marmor beträgt die Ultraschallgeschwindigkeit zwischen 5–6 km/s. Besonders gute Marmorarten können sogar Ultraschallgeschwindigkeiten von mehr als 6 km/s aufweisen. Mit fortschreitender Gefügelockerung fällt die Ultraschallgeschwindigkeit je nach Ausmaß der Schädigung auf Werte unter 3 km/s. Besonders stark geschädigte Marmorpartien zeigen sogar Ultraschallgeschwindigkeiten von weniger als 2 km/s.

Die Ultraschallgeschwindigkeit eignet sich deshalb besonders gut zur Feststellung des Verwitterungsgrades von Marmor, weil die Unterschiede der absoluten Geschwindigkeiten sehr groß sind (Spanne von 6 bis 2 km/s). Bei der Auswertung der Messungen muss allerdings beachtet werden, dass der Calcitkristall auch hinsichtlich der Ultraschallgeschwindigkeit eine starke Anisotropie aufweist. Parallel zur c-Achse beträgt diese 5,71 km/s, senkrecht dazu jedoch 7,73 km/s. Dieser große Unterschied kann zu beträchtlichen Fehlinterpretationen führen, weil natürlich auch hier die Orientierung der Calcitkristalle im Marmorgefüge eine entscheidende Rolle spielt [KÖHLER (2014)].

Auch der Feuchtegehalt spielt für den gemessenen Wert der Ultraschallgeschwindigkeit eine wichtige Rolle. Im nassen Zustand kann die Ultraschallgeschwindigkeit je nach Marmorart 1,0 bis 1,5 km/s höher liegen. Für vergleichende Messungen muss deshalb immer auch die klimatische Situation vor dem Zeitpunkt der Messungen in Betracht gezogen werden. Grundsätzlich sollte eine Messung immer erst nach einer Periode von ungefähr 14 Tagen angesetzt werden, in denen das Objekt gegen Regen geschützt war. Dennoch bleiben auch unter diesen Bedingungen Unsicherheiten in Bezug auf die feuchtebedingte Verfälschung der Ultraschallgeschwindigkeit bestehen.

KÖHLER (2014) schlägt aus diesem Grund eine Korrektur der Ultraschallgeschwindigkeit auf ein Referenzklima von 17 °C und 75 % r.F. vor, was in etwa sommerlichen Klimakonditionen entspricht. Die entsprechenden Korrekturfaktoren, welche die aktuellen Messwerte und die Klimahistorie in einem Zeitraum von 4 Wochen vor der Messung einbeziehen, sind dort nachzulesen.

E1.2.3 Sedimentäre Gesteine

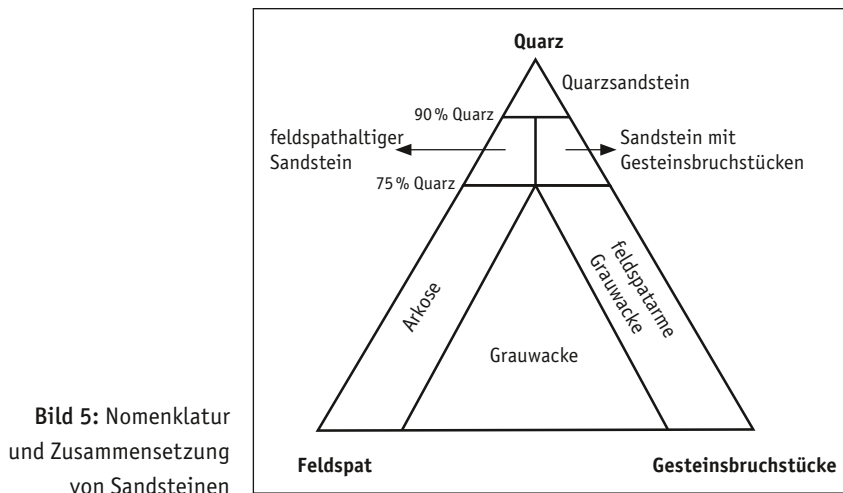
Für Fragen der Denkmalerhaltung sind in erster Linie Sandsteine und Kalksteine von Interesse, welche den klastischen, biogenen und chemischen Sedimenten zuzuordnen sind.

E1.2.3.1 Sandsteine

Sandsteine gehören zu den klastischen (von Griechisch κλαστός gebrochen) Sedimenten. Die Bezeichnung Sandstein bezieht sich nicht auf einen kompakten Gesteinskörper, sondern auf den Korngrößenbereich von 0,063–2 mm, welcher in der Sedimentologie als Sand bezeichnet wird.

Die Zusammensetzung der Sandsteine ist abhängig von den Ausgangsgesteinen, sodass aus dem Mineralbestand häufig auf das Liefergebiet geschlossen werden kann. Je länger der Transportweg vom Liefergebiet bis zum Sediment ist, desto mehr verschwinden die verwitterungsanfälligen Komponenten wie schiefrige Gesteinsbruchstücke, Carbonate und Feldspäte. Am Ende bleiben letztlich reine Quarzsande übrig. In Folge der Ablagerungsbedingungen zeigen viele Sandsteine typische sedimentäre Schichtungen mit Wechseln zwischen gröberen und feineren Lagen. Auf die Feinheiten der verschiedenartigen Texturen in Sedimenten kann hier nicht eingegangen werden.

Die Zusammensetzung der Sandsteine wird in einem Konzentrationsdreieck dargestellt. Es besteht aus den Komponenten Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücke (Bild 5).



Ein Sandstein mit über 90 % Quarzanteil wird als Quarzsandstein bezeichnet. Feldspathaltige Sandsteine heißen Arkosen, Sandsteine aus vornehmlich Gesteinsbruchstücken und Feldspäten heißen Gauwacken. Der Name Wacke soll sich aus Wackerstein ableiten. Gauwacken sind im Rheinischen Schiefergebirge besonders häufig. Als Gesteinsbruchstücke kommen feinkörnige Reste von Gneis, Quarzadern, Granit, häufig jedoch tonige Gesteinsbruchstücke aus ehemaligen Schiefern in Frage. Letztere sind für die Verwitterungsbeständigkeit eines Sandsteins besonders bedeutsam, weil hohe Tongehalte immer eine verminderte Verwitterungsbeständigkeit bedeuten.



Bild 6: Sandsteine

In dem gezeigten Konzentrationsdreieck sind die für Sandsteine so wichtigen Carbonate Calcit und Dolomit nicht aufgeführt. Sie sind jedoch für zahlreiche Denkmalgesteine wie den Baumberger Sandstein oder die Grünsandsteine im Raum Regensburg von außerordentlicher Bedeutung. Die Carbonate in diesen Sandsteinen gehen zum Teil auf ehemalige Carbonatsande zurück; zum Teil sind sie während der Diagenese aus den Porenlösungen entstanden. Bei der Benennung carbonathaltiger Sandsteine fügt man deshalb in aller Regel noch eine weitere Erläuterung hinzu, also zum Beispiel »carbonat- und feldspathaltiger Sandstein« oder »feldspathaltiger Kalksandstein«.

Carbonatgehalte stellen für die Verwitterungsbeständigkeit von Sandsteinen im Allgemeinen ein erhöhtes Risiko dar, weil Carbonate gegenüber Atmosphärien nicht beständig sind und sich in Gips umwandeln. Besonders zu den Zeiten hoher Schwefeldioxidimmissionen war die starke Gipsbildung an carbonatischen Gesteinen ein gravierendes Problem.

Fast alle Sandsteine sind mehr oder weniger intensiv gefärbt. Vorherrschend sind ocker, rote und grüne Farbtöne. Alle Farbtöne weisen auf Tonablagerungen in den Porenräumen hin, die durch fein verteiltes Eisenoxidhydroxid gefärbt sind oder durch die Eigenfarbe der Tonminerale, z. B. Chlorit, selbst verursacht sind. Tongehalte stellen ein erhöhtes Verwitterungsrisiko dar, das aber durch eine stabile Gefügestruktur kompensiert werden kann, wie sich an den beständigen roten Buntsandsteinen zeigen lässt.

Bild 7 zeigt die Unterschiede zwischen einem korngestützten und einem matrixgestützten Gefüge. Der direkte Kontakt zwischen den stabilen Komponenten verhindert bei einem korngestützten Gefüge das Auseinanderfallen des Gesteins,

auch wenn die Matrix verwittern sollte. Bei einem matrixgestützten Gefüge hängt die Stabilität des Kornverbands von der Art der Matrix und deren Porosität ab. Eine sehr dichte carbonatische Matrix kann dem Gestein eine hohe Verwitterungsbeständigkeit verleihen, eine poröse carbonatische Matrix hingegen verursacht eine hohe Verwitterungsanfälligkeit, ebenso wie Ansammlungen von Tonmineralen im Gefüge.

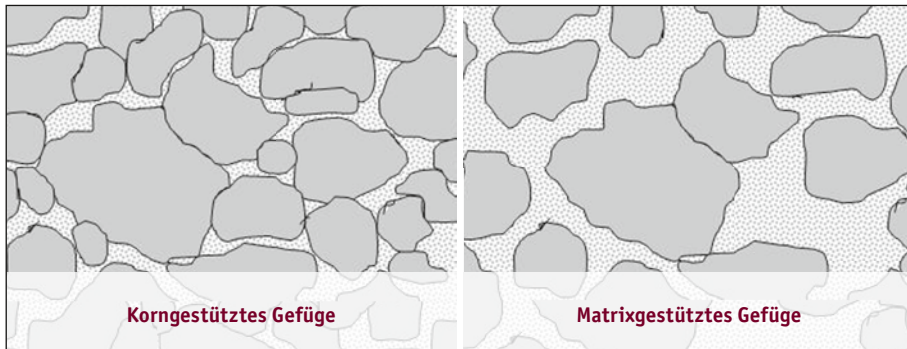


Bild 7: Gefügearten

Sandsteine weisen eine Porosität von 5 bis 25 Vol-% auf, mit einem Mittelwert um 15 Vol-%. In Einzelfällen mag die Porosität sogar noch höher liegen. Ein großer Porenraum bedeutet für sich genommen jedoch noch kein erhöhtes Verwitterungsrisiko. Sandsteine mit hohem Porenraum sind vielmehr gegen Frost und Salz häufig sehr resistent. Eine größere Bedeutung kommt der Verteilung der Porenradien zu. Als besonders gefährdet gelten Sandsteine mit einer bimodalen Porenradienverteilung, d. h. einem Porenmaximum im Bereich der Mikroporen und einem zweiten Porenmaximum im Bereich der Grobporen. Bei diesen Gesteinen kann es zu Frostschäden auch unterhalb der Wassersättigung kommen, wenn der Wassergehalt in den Mikroporen zu Eiskristallen wandert, die sich in den Makroporen gebildet haben. Ist der Anteil an Mikroporen groß genug, kann dieser Nachschub an Flüssigkeit die Eiskristalle so weit anwachsen lassen, dass sie die Makroporen ausfüllen und auseinandersprengen.

E1.2.3.2 Kalksteine

Kalksteine sind in ihrem Erscheinungsbild vielfältiger als Sandsteine. Das liegt an ihren Entstehungsbedingungen, die entweder anorganisch-chemisch, klastisch oder biogen sein können.

Anorganisch-chemisch sedimentierte Kalksteine entstehen durch Ausfällung von Calcit in Lagunen. Der sedimentierte Kalkschlamm verdichtet zu kompakten, sehr feinkörnigen Kalksteinlagen. Die Porosität ist sehr gering; dennoch ist meist keine Frostresistenz gegeben. Ein typischer Vertreter dieser Gesteinsart ist der Solnhofen Kalkstein, der zu Fußbodenplatten und Grabplatten verarbeitet wurde. Ein anderer

Vertreter eines chemisch sedimentierten Kalksteins sind Travertin und Kalktuff, die sich beim Quellaustritt hydrogencarbonathaltiger Wässer bilden.

Biogene Kalksteine entstanden aus den Hartteilen abgestorbener Meeresbewohner wie Muscheln, Schnecken, Brachiopoden, Seeigeln, Foraminiferen (Nummuliten) oder aus den riffbildenden Korallen und Schwämmen. Die mechanisch zerkleinerten Gehäuse werden von Meeresströmungen transportiert und im Küstenbereich abgelagert. Besonders bekannt und in Deutschland als Baustein wichtig sind die Muschelkalke (Bild 8). Sogenannte Massenkalk, die als Pflastersteine Verwendung finden, bilden sich aus kalkbildenden Algen und Bakterien (Stromatoliten).

Klastische Kalke beinhalten Bruchstücke ehemaliger Kalksteine und/oder den Schutt von Riffen wie z. B. Korallenstöcke oder Schwämme. Viele Dekorationsgesteine sind den Riffschuttkalken zuzurechnen.



Bild 8: Kalkstein

Bild 8 zeigt die feinkörnige, leicht gebänderte Struktur eines Solnhofers Kalksteins, dessen Gefüge so dicht sein kann, dass das Gestein zur Herstellung von Lithografien verwendet wird.

In dem abgebildeten Treuchtlinger Kalkstein erkennt man den Querschnitt eines Schwammes und die feinen hellen Flämmchen der Tuberoide (feiner Riffschutt) nebst bräunlichen Ausfällungen von Limonit.

Nicht biogenen, sondern anorganischen Ursprungs dagegen sind die Ooidkalke. Sie bestehen aus kleinen runden Calcitkugeln, die sich als Konkretion um einen Kristallisationskeim gebildet haben und im marinen Milieu abgelagert wurden.

Ooidkalk sind vor allem in England und Frankreich von Bedeutung. In Deutschland ist neben dem heimischen Elmkalk der französische Savonnièreskalk als Importgestein von Bedeutung.

Weltweit verbreitet sind die sogenannten Rotmarmore oder Knollenmarmore. Man findet sie in Italien (Rosso di Verona, Ammonitico Rosso), in Österreich (Adneter Rotmarmor), in Deutschland (Ruhpolder Marmor), auch in Griechenland, der Türkei, in Indien und in China. Sie bestehen aus dichten Knollen von sehr feinkörnigem Kalkstein, die in eine meist dunklere Matrix aus Kalk und Ton eingebettet sind. Diese Gesteine sind im Außenbereich nur selten witterungsbeständig, weil die tonhaltige Matrix auswittert und somit die runden Kalkknollen ihren Zusammenhalt verlieren.

Von großer Bedeutung für das Verhalten der Kalksteine ist die calcitische Matrix. Diese kann porös oder sehr dicht sein, grobkristallin oder feinkristallin. Im Zuge der Erdgeschichte ist es immer wieder vorgekommen, dass diese Matrix aufgelöst und neu ausgefällt wurde, sodass der geübte Petrograph oft mehrere Matrixgenerationen unterscheiden kann. Auch für Kalksteine gilt, dass ein komponentengestütztes Gefüge stabiler ist als ein matrixgestütztes, zumal, wenn innerhalb der Matrix eine gute Wegsamkeit für Porenwässer besteht.

Kalksteine weisen ein breites Spektrum von Porosität auf. Es reicht von den kleinsten Werten unter 1 Vol-% bis zu höchsten Werten über 35 Vol-%. Die Angabe eines Mittelwertes erscheint kaum sinnvoll. Es ist erforderlich, sich immer den Wert des betreffenden Kalksteins zu beschaffen. Die Verwitterungsbeständigkeit von Kalksteinen, die als Werkstein Verwendung gefunden haben, ist meist sehr gut, wie viele Gebäude aus Muschelkalk belegen. Viele dieser Kalksteine sind so dicht, dass die Verwitterung nur oberflächlich angreifen kann, ohne dass das Gefüge im Inneren geschädigt wird.

E1.3 Schlussfolgerungen

Zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit und der Konservierbarkeit ist es nicht allein wichtig, den Mineralbestand und das Gefüge zu betrachten. Von besonderer Bedeutung ist die Beschaffenheit des Porenraums. Ist dieser mit Tonmineralen ausgekleidet, besteht immer das Risiko, dass das betreffende Gestein verwitterungsanfällig ist. Bei der carbonatischen Matrix kommt es darauf an, ob diese grobkristallin oder sehr feinkristallin ist, oder ob der Porenraum in der Matrix eine hohe Wasseraufnahme des Gesteins ermöglicht oder nicht. Weiterhin ist darauf zu achten, ob die Porenradienverteilung für eine hohe Wasseraufnahme spricht oder nicht. Bimodale Porenradienverteilungen mit zwei Radienmaxima beinhalten die Gefahr, dass Frost und Salzsprengung dem Gestein besonders zusetzen können. Enthält ein Gestein vornehmlich Mikroporen, kann die Aufnahme von Konservierungsmitteln stark eingeschränkt sein. Es wird deshalb dringend dazu geraten, bei jeder Konservierung das

betreffende individuelle Gestein vollständig hinsichtlich seiner relevanten Eigenschaften, welche Verwitterung und Konservierung bestimmen, zu untersuchen.

E1.4 Weiterführende Literatur

GRIMM W. D. (2018): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. 2. Auflage. Ebner Verlag Ulm

EHLING A. Hrsg. (2009): Bausandsteine in Deutschland. Band 1: Grundlagen und Überblick. Schweizerbart Stuttgart

KÖHLER W. (1988): Preservation Problems of Carrara Marble Sculptures in Potsdam-Sanssouci (Radical Structural Destruction of Carrara Marble). In: Proceedings 5th Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, p. 653–662. Nicholas Copernicus University Torun Poland

KÖHLER W. (2014): Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen. In: Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32, S. 37–44

WEISS T., SIEGESMUND S., RASOLOFOSAON P. N. J. (2000): The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. Proceedings 9th Intern. Congress Deterioration and Conservation of Stone, Vol 1 p. 215–223. Venice.

RÜDRICH J. (2005): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation Universität Göttingen

SIEGESMUND S., ULLEMEYER K., WEISS T., TSCHEGG E. K. (2000): Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. Int. J. Earth Sci. 89 p. 170–182. Springer Berlin

SIEGESMUND S., SNETHLAGE R., eds. (2014): Stone in Architecture – Properties, Durability. Fifth Edition. Springer Heidelberg.

FÜCHTBAUER H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. Verlag Schweizerbart Stuttgart

E2 Marmor – Eigenschaften und Verwitterung

Inhalt

E2.1 **Einleitung 33**

E2.2 **Verwitterungsbild Oberflächenrauheit 33**

E2.3 **Biologische Besiedlung 34**

E2.4 **Marmorgefüge und Verwitterungsursachen 35**

E2.5 **Ultraschallgeschwindigkeit und Verwitterungsgrad 37**

E2.6 **Konservierungsvorschläge 39**

E2 Marmor – Eigenschaften und Verwitterung

E2.1 Einleitung

Marmor ist das Steinmaterial der Bildhauer schlechthin. Bildwerke aus Marmor schmücken Parkanlagen, Grabmäler aus Marmor preisen das Gedenken an verstorbene Berühmtheiten, Denkmäler erinnern an große Persönlichkeiten der Geschichte. Obwohl mineralogisch petrographisch ein sehr einfach zusammengesetztes Gestein – Marmor besteht zumeist aus Calcit, in selteneren Fällen aus Dolomit oder aus beiden Mineralen – weist es einige Besonderheiten auf, die es von anderen Gesteinen unterscheidet.

E2.2 Verwitterungsbild Oberflächenrauheit

Die Verwitterung beginnt mit einer Aufrauung der Oberfläche. Diese wird durch die partielle Auflösung der Calcitkristalle durch das CO₂-haltige Regenwasser an der Oberfläche verursacht. Im fortgeschrittenen Zustand werden Kanten gerundet, die Konturen verschwimmen und die originale Oberflächengestaltung des Bildhauers geht verloren (Bild 9 und Bild 10).



Bild 9: Stark aufgeraute Oberflächen an der Parkfigur Äolus im Schlosspark Nymphenburg München



Bild 10: Grabmalbüste im Alten Südlichen Friedhof in München

Kommt zur starken Rauheit noch biologische Besiedlung hinzu, sind Bildwerke aus Marmor oft nur noch vom Fachmann zu erkennen. Ihr Erscheinungsbild ist vollkommen indifferent und gleicht eher dem von grauen Sandsteinen oder Kalksteinen.

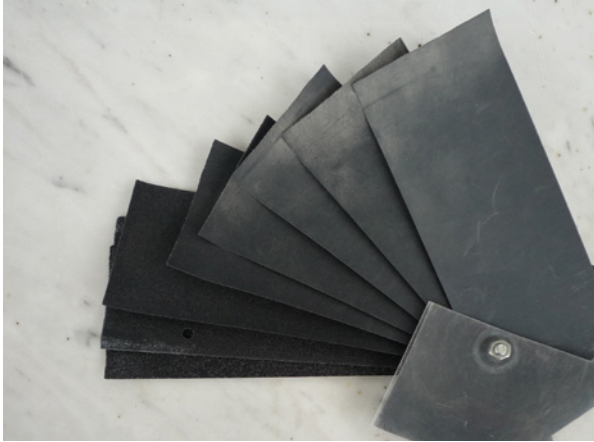


Bild 11: Fächer aus Schleifpapieren unterschiedlicher Körnung von P 60 bis P 1000

Die Rauheit kann auch als Maßstab für den Angriff der Verwitterung verwendet werden. Sie lässt sich recht einfach dadurch bestimmen, indem ihr Grad mit der Körnung von handelsüblichen Schleifpapieren verglichen wird (Bild 11). Bei der Messung streicht der Bearbeiter mit der Zeigefingerspitze abwechselnd über die Marmor- und die Schleifpapieroberfläche und nähert sich durch mehrfaches Ausprobieren an das Schleifpapier an, dessen Rauheit dem der Oberfläche am nächsten kommt. Diese einfache Methode ist keinesfalls unwissenschaftlich. Sie wurde von DAMJANOVIC (2003) entwickelt und in Mehrpersonen Testreihen geprüft. Sie ist seitdem vielfach mit Erfolg auch vom Verfasser dieses Beitrags verwendet worden [SNETHLAGE (2018)].

E2.3 Biologische Besiedlung

Zunehmende Rauheit fördert die biologische Besiedlung, weil die raue Oberfläche Feuchtigkeit speichert und beste Besiedlungsbedingungen bereitstellt. Die vorherrschenden Mikroorganismen sind Algen, Bakterien, Pilze und Flechten. Sie können den Marmor durch unterschiedliche Mechanismen schädigen:

- Ausscheidung organischer und anorganischer Säuren,
- Ausbildung von quellfähigen Biofilmen auf der Oberfläche und im Gestein,
- Ausbildung endolithischer Biofilme und Einwachsen in die Rissysteme in tiefere Bereiche des Steins mit Schädigung des Gefüges durch Quell- und Schrumpfvorgänge,
- Erzeugung von thermischen Spannungen an der Oberfläche durch Erhöhung der Oberflächentemperatur aufgrund der häufig schwarzen Färbung,
- Aufbau organischer Biomasse als Substrat für weitere Besiedlung bis hin zu höheren Pflanzen.



Bild 12: Standbild Friedrichs des Großen im Schlosspark Sanssouci in Potsdam (Aufnahme: W. Köhler, Potsdam 2018)

Eine intensive biologische Besiedlung ist deshalb nicht nur ein ästhetisches Problem, sondern auch ein Zeichen der fortschreitenden Verwitterung und der Gefährdung des Marmorgefüges. Bild 12 zeigt ein Standbild Friedrichs des Großen, das eine starke biologische Besiedlung durch Flechten und Pilze aufweist.

Die Untersuchung von Mikroorganismen auf Gesteinen muss immer von einem Fachmann durchgeführt werden, der in dieser Sparte der mikrobiologischen Forschung bewandert ist. Am Anfang steht immer die Bestimmung der Spezies. Manche Flechten wie *Caloplaca flavescens* sind so aggressiv, dass sie durch ihre Säureausscheidungen ganze Oberflächenbereiche abtragen und flache Gruben hinterlassen, wenn sie entfernt werden. Weiterhin muss bestimmt werden, ob die Spezies noch aktiv sind oder temporär inaktiv oder bereits abgestorben sind. Aktive Zellen findet man durch Anfärbung mit speziellen Chemikalien und/oder Nachweis der Fluoreszenz im nahen UV. Hierfür ist auch das Verfahren Trace-It bestens geeignet. Vertiefte Informationen über dieses Thema findet man bei PETERSEN, GERMAN-JANSSEN UND FRITZ (2018) und KÖHLER (2018a).

E2.4 Marmorgefüge und Verwitterungsursachen

Das Gefüge des Marmors ist von besonderem Einfluss auf die Verwitterungsbeständigkeit. Aus Bild 13 wird verständlich, dass Marmorarten mit geradlinigen Korngrenzen weniger beständig sind als solche mit lobaten (gebuchteten) Korngrenzen. Unter den genannten Arten sind wiederum die widerstandsfähiger, die einheitliche Korngrößen aufweisen, weil größere Körner eine geringere Löslichkeit aufweisen als kleine.

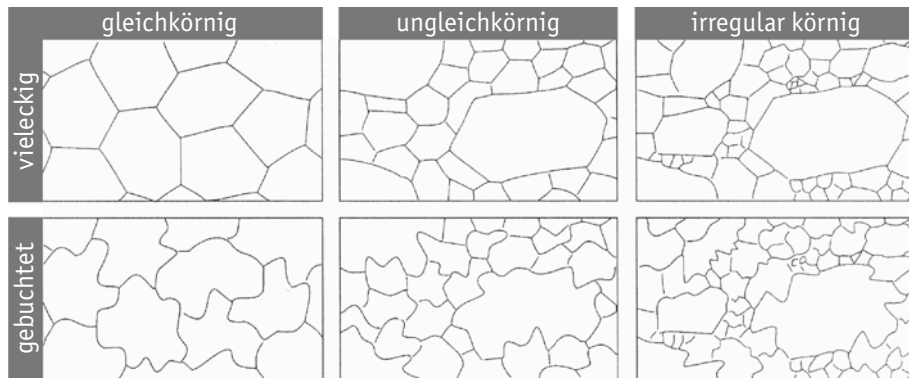


Bild 13: Gefügearten von Marmor [RÜDRICH (2003)]

Die Gefügauflockerung kann bei Marmor bis ins Zentrum von Figuren reichen. Ursächlich verantwortlich ist die anisotrope thermische Dehnung des Calcitkristalls (Bild 14). Er dehnt sich bei Erwärmung in Richtung der c-Achse aus, in Richtung der a-Achse dagegen zieht er sich zusammen. Dieses Verhalten ist einzigartig unter den üblichen gesteinsbildenden Mineralien. Die dadurch auftretenden Spannungen schaffen zunächst Mikrorisse, später werden daraus Mikroporen, in denen Wasser zirkulieren kann. Die Mikrorisse wachsen immer weiter, weil Wasserfilme an den Risspitzen die Bindungskräfte zwischen den Kristallflächen und Kristallspaltflächen aufheben. Dennoch steigt auch bei stark verwitterten Marmoren die Porosität nicht über wenige zwei bis drei Prozent.

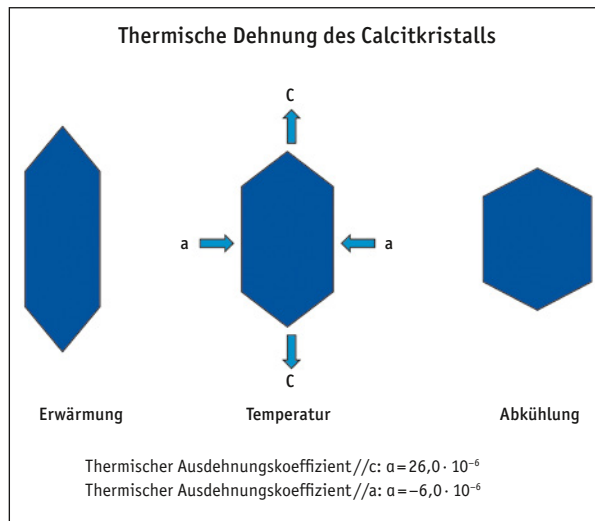


Bild 14: Thermische Dehnung des Calcitkristalls

E2.5 Ultraschallgeschwindigkeit und Verwitterungsgrad

Der Verwitterungsgrad von Marmor lässt sich sehr gut mit Hilfe der Ultraschallgeschwindigkeit bestimmen. Gemessen wird die Geschwindigkeit der Kompressionswelle v_p in Durchschallung. Dadurch erhält man einen Überblick über den integralen Zustand des Marmors. Informationen über den Zustand der Oberfläche können nur durch Messung der Rayleigh-Wellen gewonnen werden, für die aber spezielle Ultraschallgeber und Empfänger erforderlich sind. Bild 15 zeigt die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit bei Durchschallung an einem Figurensockel.

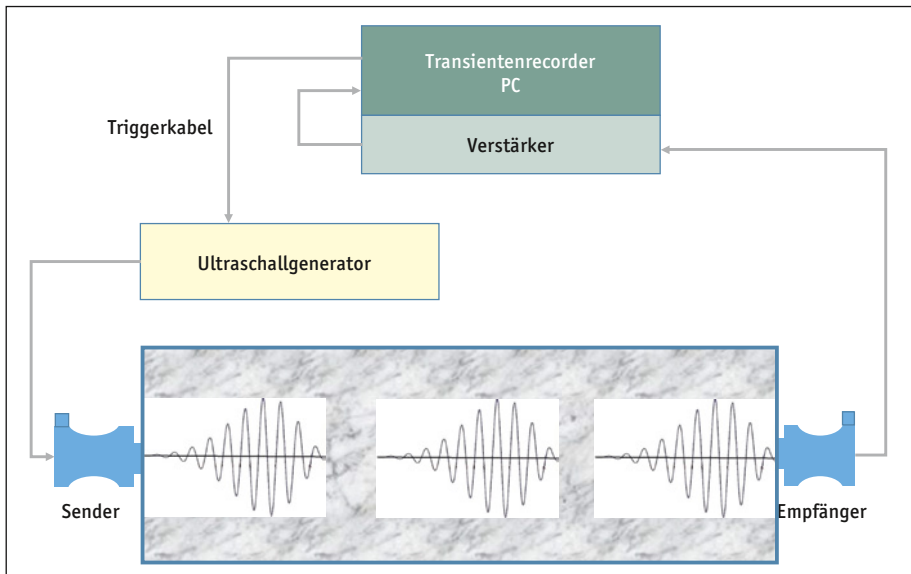


Bild 15: Ultraschallmessung an einem Figurensockel (Quelle: Köhler, Potsdam)

Bereits 1988 hat KÖHLER (1988) eine Skala zur Beurteilung des Verwitterungsgrades von Marmor vorgestellt. Diese Skala ist bis heute in Gebrauch und hat sich immer wieder bewährt. In einer leicht überarbeiteten Version stellt sie sich wie folgt dar (Tabelle 2).

Tabelle 2: Schadensklassen und v_p Geschwindigkeiten nach KÖHLER (2015 und 2018b)

Schadensklasse	v_p (km/s)	Zustand
0	> 5	frisch
1	3–5	zunehmend porös
II	2–3	absandend
III	1,5–2	brüchig
IV	< 1,5	zerfallend

Für die richtige Interpretation der Ultraschallmesswerte müssen einige Einflussparameter berücksichtigt werden. Wie die thermische Dehnung ist der Calcitkristall auch hinsichtlich der Ultraschallgeschwindigkeit anisotrop. Die Geschwindigkeit v_p beträgt in Richtung der c-Achse des Kristalls 5,7 km/s, senkrecht dazu in Richtung der a-Achse dagegen 7,7 km/s, also 2 km/s mehr (Bild 16).

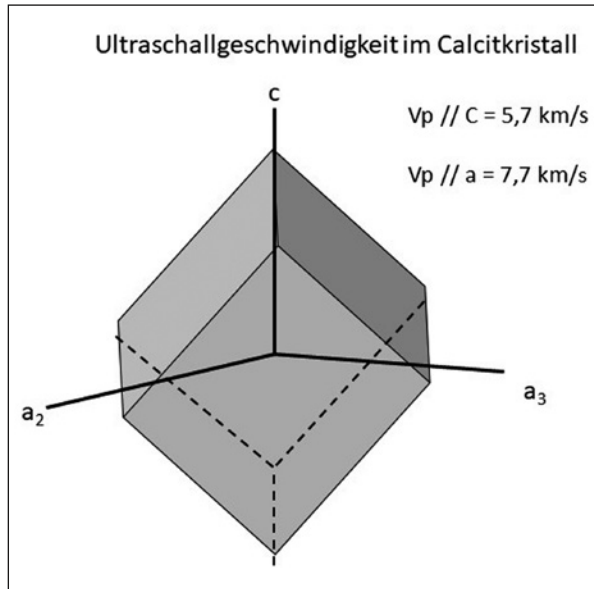


Bild 16: Anisotropie der Ultraschallgeschwindigkeit im Calcitkristall

Diese anisotropen Zahlenwerte machen deutlich, dass die Skala nach KÖHLER nur dann Gültigkeit besitzt, wenn die Orientierung der Calcitkristalle im Gefüge statistisch verteilt ist. Liegt dagegen eine Vorzugsrichtung vor, dann ändern sich die Messwerte mit der Messrichtung. Das kann zu gravierenden Fehlinterpretationen führen, weshalb man immer mit senkrecht zueinanderstehenden Messstrecken messen muss. Stark abweichende Messwerte sind dann wahrscheinlich immer ein Hinweis auf eine Vorzugsorientierung im Marmorgefüge.

Die Ultraschallgeschwindigkeit ist auch vom Feuchtegehalt im Marmor abhängig, und zwar dergestalt, dass sie bei höherem Feuchtegehalt bis zu 1 km/s oder mehr höher liegt. Die täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur bedingen ebenfalls unterschiedliche Feuchtezustände, die sich auf die Ultraschallgeschwindigkeit auswirken. Wiederholende Messungen, die an einer Marmorskulptur bei unterschiedlichen Wassergehalten gemessen wurden, sind deshalb hinsichtlich des Verwitterungsgrades nicht interpretierbar. Sie müssen auf einen Feuchtegehalt korrigiert werden, welcher der Sorptionsfeuchte bei 75 % rel. Feuchte entspricht. Die hierfür erforderlichen Korrekturformeln hat KÖHLER (2015) ausführlich erläutert. Als Minimalforderung kann angesehen werden, dass Marmorskulpturen im Freien vor einer Ultraschallmessung mindestens 14 Tage unter einem Schutzdach stehen müssen.

Letztlich wird die Aussagefähigkeit der Ultraschallmesswerte auch durch die Genauigkeit der Messungen an sich begrenzt. Die Messgenauigkeit der Messsysteme beträgt 1 %, die realistische Messgenauigkeit ist je nach Erfahrung und Sorgfalt des Operators mit 5–10 % anzusetzen. Der größte Fehler wird bei der Messung der Messstrecke begangen. Nähere Ausführungen zu diesem Thema siehe KROMPHOLZ (2018).

Wie tief die Verwitterungszone reicht, kann mit einer Durchschallung mit Ultraschall nicht erfasst werden. Die schmale Oberflächenzone mit niedriger Geschwindigkeit hat auf die Gesamtlänge nur wenig Einfluss, sodass die Brutto-Ultraschallgeschwindigkeit nur insignifikant beeinflusst wird. Die Vermessung der Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen) erfordert eine spezielles Equipment und große Erfahrung bei der Auswertung und wird deshalb nur sehr selten angewendet.

E2.6 Konservierungsvorschläge

Wegen der geringen Porosität muss für die Konservierung von Marmor ein anderer Ansatz gewählt werden als für Sandsteine.

Kieselsäureester für die Festigung »zuckernder« Oberflächen sind nicht geeignet, weil das SiO_2 -Gel sich wegen der anderen Polarität nicht mit der Calcitoberfläche verbinden kann und weil die totale innere Oberfläche von Marmor sehr gering ist (bis $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ gegenüber Sandsteinen je nach Porosität 2 bis $8 \text{ m}^2/\text{g}$). Die für einen Einsatz geeigneten Festigungsmittel müssen eine bessere Klebekraft als Kieselgel aufweisen. Letztendlich sind für diesen Zweck nur Acrylharze geeignet, die in Lösungen verdünnt appliziert werden. Organischen Lösungsmitteln ist der Vorzug gegenüber Acryldispersionen zu geben.

Diese Methode ist in Fällen anwendbar, wenn die Verwitterungstiefe wenige Millimeter (bis 5 mm) beträgt. Reicht die Verwitterung tiefer, so kann mit Kompressen versucht werden, eine hinreichende Eindringtiefe zu erreichen. Tiefgreifend zerrütete Skulpturen können vor Ort nicht gefestigt werden, weil die gesamte Struktur des Marmors so geschädigt ist, dass die Standfestigkeit stark gefährdet ist. Hier können nur die Acrylharzvolltränkung oder eine Kopie Abhilfe schaffen.

Der für eine Kopie vorgesehene Marmorblock sollte vor dem Kauf gründlich mit Ultraschall geprüft werden. Die Wellengeschwindigkeit sollte mindestens 5 km/s betragen.

E3 Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden – kleine Einführung in die chemischen Grundlagen

Inhalt

E3.1	Anorganische Bindemittel	43
E3.2	Organische Bindemittel	49
E3.3	Kieselsäureester	53
E3.4	Hydrophobierungsmittel: Silane – Siloxane – Polysiloxane	56
E3.5	Steinreinigung – Materialien und Methoden	59
E3.6	Entsalzungskompressen	62
E3.7	Farbsysteme für Fassungen auf Stein	64
E3.8	Graffitienschutz	70

E3 Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden – kleine Einführung in die chemischen Grundlagen

E3.1 Anorganische Bindemittel

Fugenmörtel, Putzmörtel und Steinersatzmörtel setzen sich alle – lässt man die kunststoffgebundenen Mörtel außer Acht – aus einem sandigem Zuschlag und einem Bindemittel zusammen, das wiederum aus Kalk oder Zement oder einer Mischung aus diesen beiden besteht. Einen Überblick über die anorganischen Bindemittel und deren Mischungen gibt Bild 17.

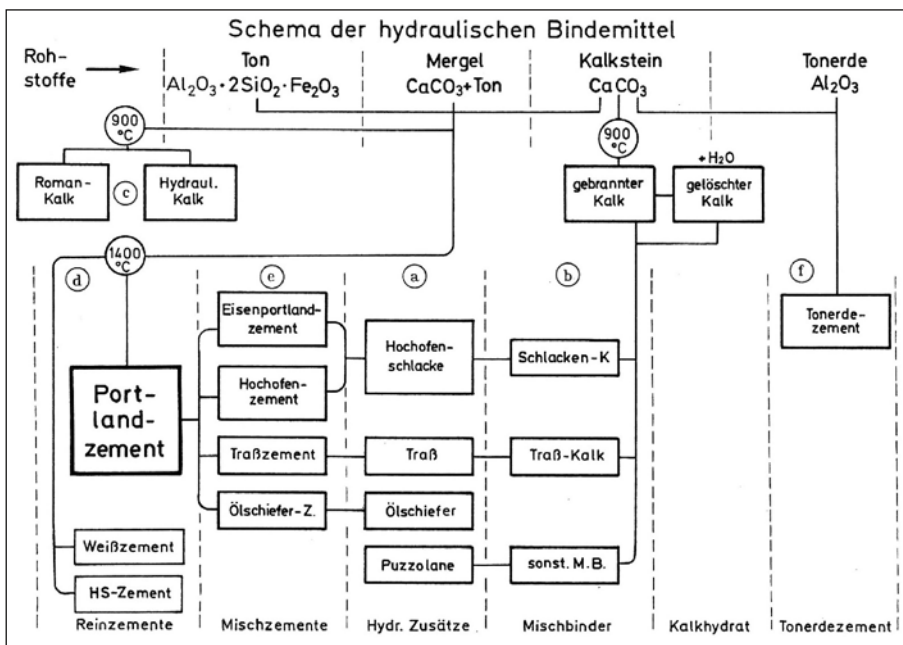


Bild 17: Schema der anorganischen Bindemittel

Die wichtigen Endglieder sind gebrannter (CaO) oder gelöschter Kalk (Ca(OH)_2) und Portlandzement, hergestellt aus einer Mischung aus Kalk (CaCO_3) und Ton (Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3). Die Brenntemperaturen betragen 900°C bzw. 1400°C . Die Oxide Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 stehen stellvertretend für die Tonminerale Kaolinit, Illit, Chlorit, Montmorillonit und weitere, die in natürlichen Tönen vorkommen. Besonders geeignet für das Brennen von Portlandzement sind Mergel, welche von Natur aus Mischungen von Kalk und Ton sind.

Hydraulische Zusätze wie Hochofenschlacke, Trass oder Ölschiefer führen zu den Zementprodukten Hochofenzement, Trasszement bzw. Ölschieferzement, auf der anderen Seite zu den Produkten Schlackenalk, Trassalk bzw. sogenannten Mischbindern mit Puzzolanen. Puzzolane sind vulkanische Erden, dem Trass nahe verwandt; der Name geht auf die vulkanischen Felder bei Pozzuoli bei Neapel zurück. Mit Puzzolanen ist es schon den Römern gelungen, unter Wasser erhärtende Mörtel herzustellen, die sie für den Bau von Hafenanlagen verwendet haben.

Hydraulische Zusätze erhärten nicht von selbst. Sie benötigen einen »Starter«, der entweder Zement oder Kalk sein kann.

Weißzement und HS Zement (hoch sulfatbeständiger Zement) werden als Spezialzemente bezeichnet, da sie für spezielle Einsatzgebiete vorgesehen sind. Romankalk oder Romanzement sind hinsichtlich ihrer Zusammensetzung dem Portlandzement sehr ähnlich, werden aber bei niedrigerer Temperatur von 900 °C gebrannt. Die Herstellung von Portlandzement im heutigen Sinne war erst möglich, als man die Technologie entsprechender Brennöfen beherrschte. Ein weiteres Spezialprodukt ist der Tonerdezement, der sich durch eine besonders schnelle Erhärtung auszeichnet.

Man unterscheidet zwischen lufthärtenden und hydraulisch härtenden Bindemitteln. Zu den lufthärtenden gehören die Baukalke. Deren Einteilung ist in Bild 18 gezeigt.

Einteilung der Baukalke					
Brenn- temp. in °C	CaO-Gehalt				
	90	80	70	60	40
< 1000	CL 90	CL 80	CL 70		
< 1200		NHL 2	NHL 2/3,5	NHL 2/3,5/5	NHL 5 Romankalk
> 1200				Zement	Sonderzemente
< 1000	DL 85 DL 80				

Bild 18: Einteilung und Nomenklatur der Baukalke

Die aus reinem oder fast reinem Kalk (CaCO_3) gebrannten Produkte werden international mit CL 90 ($\text{CaO} > 90\%$), CL 80 ($\text{CaO} > 80\%$) und CL 70 ($\text{CaO} > 70\%$) bezeichnet. CL steht für Englisch Clear Lime (reiner Kalk). Die Brenntemperatur beträgt < 1000 °C. Es entsteht gebrannter Kalk CaO, der durch Wasserzugabe zu gelöschtem Kalk

(Ca(OH)_2) umgewandelt wird. Die Härtung von Luftkalken erfolgt durch Aufnahme von CO_2 aus der Luft, wodurch sich der Kreislauf zu CaCO_3 wieder schließt. Dieser Prozess dauert oft viele Jahre.

DL 85 und DL 80 bedeuten Dolomitic Lime (Dolomitkalk). Sie werden bei $< 1000^\circ\text{C}$ aus Dolomit gebrannt, und zwar in Gegenden, in denen keine reinen Kalke verfügbar waren. Gründerzeitliche Bauten in Berlin sind häufig mit Dolomitkalk verputzt.

NHL Kalke (Natural Hydraulic Lime) werden aus in der Natur vorkommenden Rohstoffen wie Mergeln oder ton- und carbonatreichen Sandsteinen hergestellt. Durch die höhere Brenntemperatur bilden sich bereits Calciumsilikate (Zementklinkerphasen), die hydraulisch, d. h. durch Wasserzugabe erhärten. Je höher der Ton- und Silikatgehalt im Ausgangsmaterial ist, desto hydraulischer reagiert das Produkt. Schließlich landet man beim hoch hydraulischen Romankalk. Die Bezeichnungen NHL 2, NHL 3,5 oder NHL 5 sind nicht genormt. So kann es vorkommen, dass ein als NHL 3,5 bezeichneter Mörtel höhere Druckfestigkeiten entwickelt als ein NHL 5. NHL Mörtel sind, wie später erklärt wird, schwieriger zu verarbeiten als Portlandzementmörtel, sodass das Endprodukt oft nicht die erwünschten Eigenschaften aufweist.

Zemente weisen heute eine exakt genormte Zusammensetzung auf. Durch das Brennen des Gemisches von Kalk und Ton bei Temperaturen $> 1200^\circ\text{C}$ entstehen die Zementklinkerphasen (Bild 19): Tricalciumsilikat C_3S , Dicalciumsilikat C_2S , Tricalciumaluminat C_3A und Tetracalciumaluminatferrit C_4AF . Die Abkürzungen C und S stehen für CaO bzw. SiO_2 , A für Al_2O_3 . Die bei weitem überwiegende Phase C_3S , C_4AF ist für die graugrüne Farbe von Portlandzement verantwortlich. Der spezielle Weißzement besteht fast nur aus C_3S und enthält kein C_4AF , ebenso der hoch sulfatbeständige HS Zement, der ebenfalls kein C_4AF enthält, welches in Verbindung mit Gips zur Bildung des Treibminerals Ettringit führt.

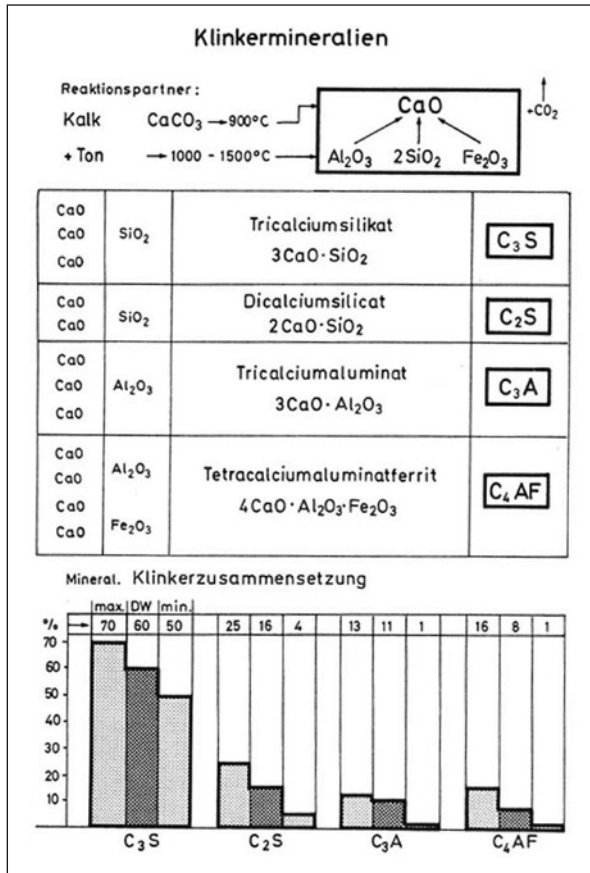


Bild 19: Zusammensetzung der Zemente (aus K. Krenkler: Chemie des Bauwesens. Bd. 1. Springer Verlag 1980)

Die Zementklinkerphasen C_3S und C_2S reagieren bei der Zugabe von Wasser zu Calciumsilikathydratphasen, wie auf Bild 20 zu sehen ist. Erstaunlicherweise ist die Silikathydratphase in beiden Fällen gleich, der Unterschied besteht lediglich darin, dass bei C_3S drei Moleküle $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, bei C_2S , nur ein Molekül $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ gebildet wird. Dieses ist für das alkalische Medium in Beton, Zementmörteln oder Putzen verantwortlich. Die Silikathydratphasen stellen keine geordneten Kristalle dar, sondern vielmehr kryptokristalline, stark fehlgeordnete Kristallite. Sie werden auch als Zementgel bezeichnet. Die sehr große spezifische Oberfläche des Zementgels weist durch die starke Bindung zwischen amorphen Silikathydratphasen und Porenwasser eine hohe Festigkeit auf.

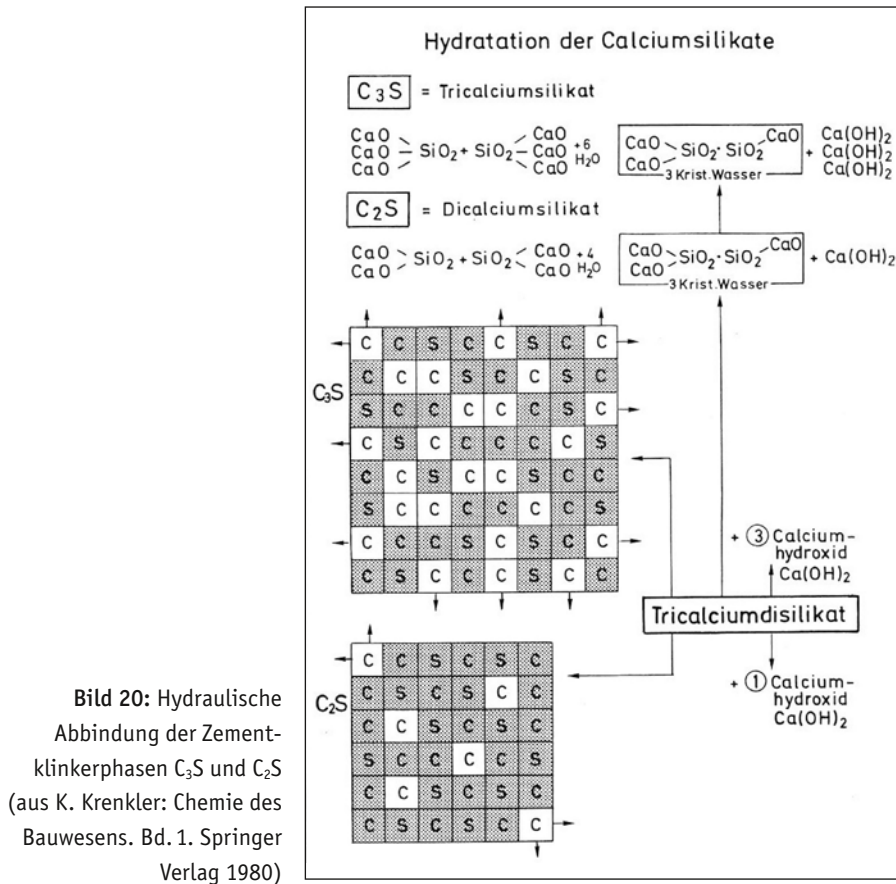
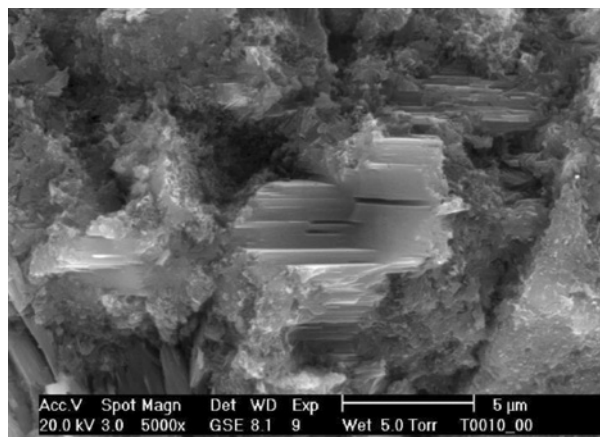


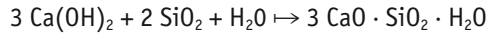
Bild 20: Hydraulische
Abbindung der Zement-
klinkerphasen C₃S und C₂S
(aus K. Krenkler: Chemie des
Bauwesens. Bd. 1. Springer
Verlag 1980)

Bild 21 präsentiert einen Einblick in die Feinstruktur des Zementgels. Die CSH-Phasen des Zementgels sind als unterschiedliche Kristalle nicht auszumachen. Bei den gut ausgebildeten Kristallen handelt es sich um Ca(OH)₂.

Bild 21: Blick in das
Zementgel mit gut aus-
gebildeten Kristallen von
Calciumhydroxid.
Die CSH-Phasen bilden die
Grundmasse.
Aufnahme mit einem
Transmissionselektronen-
mikroskop.



Was bewirkt nun die Zugabe von latent hydraulischen Stoffen (Puzzollanen, Trass) zu Kalk oder Zement? Wie oben bereits ausgeführt, binden Puzzolane nicht von sich aus mit Wasser ab. Sie benötigen Ca(OH)_2 als Starter, das von sich aus im Kalkmörtel vorhanden ist bzw. durch die Hydratation des Zementklinkers als Nebenprodukt entsteht. Gemäß der chemischen Formel



bildet sich aus dem »weichen« Ca(OH)_2 »steiferes« Calciumsilikathydrat, dieselbe Verbindung, die auch bei der Hydratation des Zements entsteht. Dadurch steigt die Festigkeit des Zementgels. Trasszement oder Trasskalk besitzen deshalb eine höhere Festigkeit als die reinen Zemente bzw. Kalke.

Eine Besonderheit unter den anorganischen Bindemitteln stellt Kieselgel dar, welches im KSE-Modulsystem (Kieselsäureethylester, auch Tetraethoxysilan, TEOS) als Bindemittel fungiert (Bild 22). Dies von der Firma Remmers vertriebene Produkt zur Herstellung verschiedener Mörtelgruppen, vom Restauriermörtel über Anböschmörtel bis zur Oberflächenschlämme inclusive Oberflächenfestigung, ist dadurch gekennzeichnet, dass alle diese Varianten das gleiche Bindemittel enthalten und sich

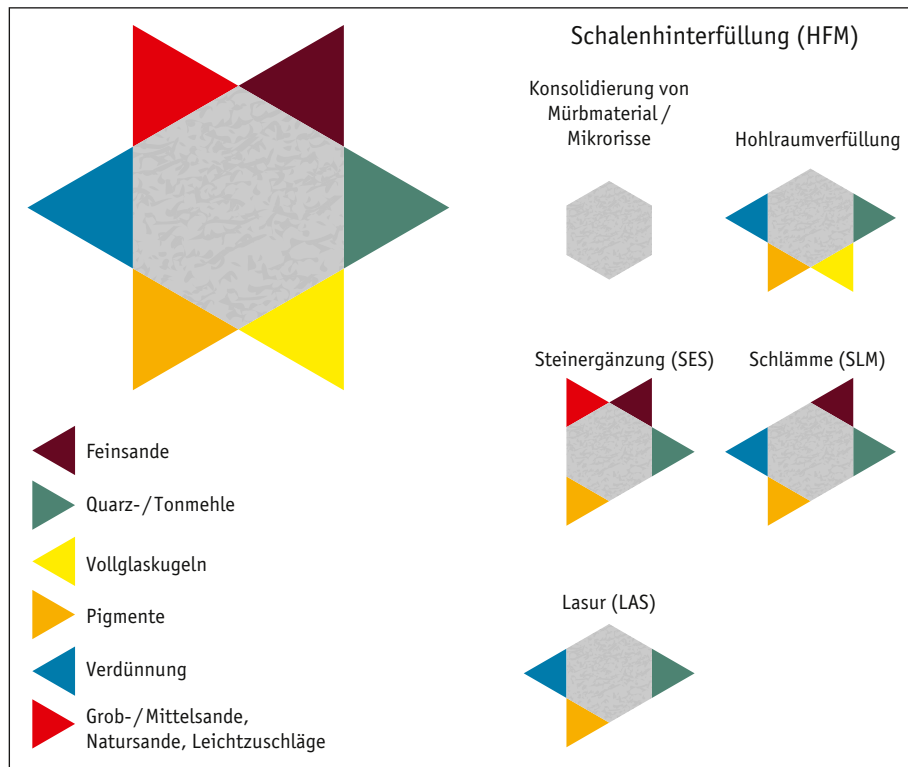


Bild 22: Bestandteile des KSE-Modulsystems

nur in der Zusammensetzung der Zuschlagstoffe (Sande) unterscheiden. Als Bindemittel dient ein besonders angereicherter Kieselsäureester mit einer Gelabscheidung von über 50%. Auf diese Weise können die Übergänge zwischen Untergrund und Mörteln fließend gestaltet werden, was dazu beiträgt, Schäden an den Grenzflächen zu vermeiden.



Kloster Birkenfeld – Kirche Westgiebel
Steinergänzung mit KSE-Mörtel
Perfekt angepasst und nicht sichtbar



Bild 23: Anwendungsbeispiel für das KSE-Modulsystem

Die Anwendung des KSE-Modulsystems am Giebel der ehemaligen Klosterkirche Birkenfeld dokumentiert die gute Anpassungsfähigkeit der KSE-Mörtel. Zu sehen sind Anböschmörtel, Restauriermörtel und Oberflächenschlämme (Bild 23).

E3.2 Organische Bindemittel

Organische Bindemittel spielen vor allem für Spezialanwendungen in der Steinkonservierung eine wichtige Rolle. Sie werden sowohl in Reinform z. B. als Kleber oder auch als Zusätze angewendet. Schon früh erkannte man, dass sich durch die Zugabe von Ölen und Harzen die Eigenschaften anorganischer Bindemittel in positiver Hinsicht verändern lassen. Es ist unmöglich, alle organischen Bindemittel und Zusätze zu Mörteln und Farbsystemen aufgrund ihrer Vielzahl zu erwähnen, geschweige denn zu besprechen. Hinzu kommt noch, dass die Hersteller, gerade was diese Materialien betrifft, eine große Zurückhaltung üben. Zumeist werden nur die ganz allgemeinen Stoffgruppen benannt, die wenig aussagekräftig sind, oder die Zusätze werden sogar gänzlich verschwiegen. Daraus kann man folgern, dass es die organischen Zusätze sind, welche die Produkteigenschaften ganz entscheidend bestimmen.

- Leinöl

Dieser Stoff ist schon seit der Antike in der Steinkonservierung bekannt. Die Römer verwendeten ihn, um die Oberflächen von Bildwerken widerstandsfähiger gegen die Umwelteinflüsse zu machen.

Chemisch ist Leinöl ein Ester des dreiwertigen Alkohols Glycerin mit drei verschiedenen Ölsäuren: Ölsäure, Linolsäure, Linolensäure. Alle drei Säuren sind ungesättigte Kohlenstoffketten, d. h. sie enthalten eine, zwei bzw. drei Doppelbindungen. Die chemische Struktur ist auf Bild 24 zu sehen.

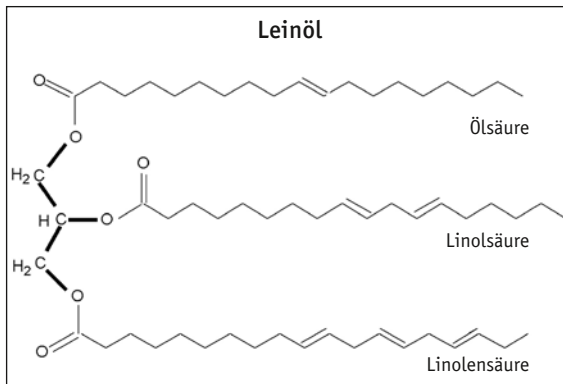


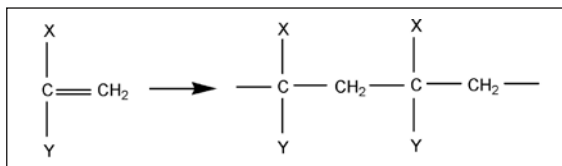
Bild 24: Chemische Struktur von Leinöl

Die Doppelbindungen in den Kohlenstoffketten ermöglichen die Vernetzung der einzelnen Leinölmoleküle zu einem Polymer. Im Fall von Leinöl spricht man von Trocknung. Wichtigste Anwendung von Leinöl war die zur Herstellung von Farben, vor allem die der Leinöl-Bleiweiß-Farbe, wobei dem Pigment Bleiweiß noch die besondere Funktion zukommt, die Trocknung zu beschleunigen. Leinöl-Bleiweiß-Farben waren in der Barockzeit für die Farbfassung von Parkfiguren sehr wichtig. Vor der Zeit der siliziumorganischen Verbindungen wurde Leinöl auch häufig zur Festigung mürber Sandsteine oder zur Imprägnierung von Skulpturen im Freien verwendet.

- Acrylate

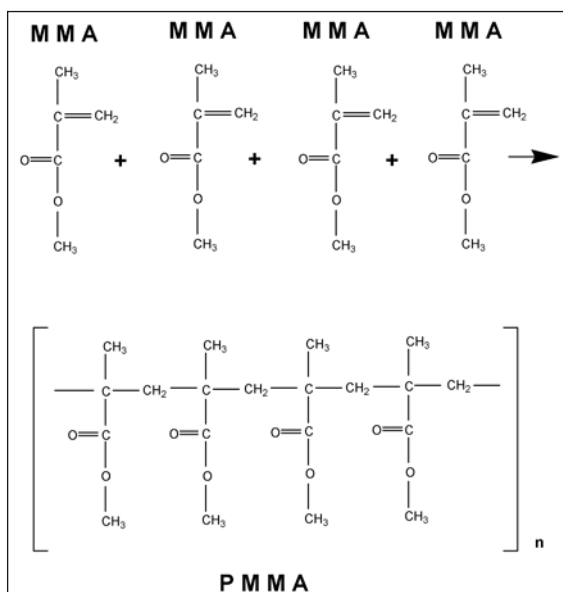
Acrylate stellen eine Stoffgruppe von fast unendlicher Vielfalt dar. Als Tränkstoffe in reiner Form und als Zusätze zu Mörteln oder Farben sind sie ein unersetzlicher Bestandteil in der Palette der Konservierungsmittel. Die Grundstruktur der Acrylate ist in Bild 25 abgebildet. In Zentrum steht die Acrylsäure, welche eine Doppelbindung $-C=CH_2$ besitzt, die, wenn sie aufgespalten wird, zur Vernetzung Anlass gibt. Die Symbole X und Y stehen für unterschiedliche Alkylgruppen, die sich dort anschließen können.

Bild 25: Grundstruktur
der Acrylate



Alle Acrylate sind im Grunde Ester der Acrylsäure mit einem beliebigen Alkohol. Das bekannteste Acrylat ist Methyl-Methacrylat, ein Ester von Methacrylsäure und des Methylalkohol CH_3OH . Wie im folgenden Bild 26 gezeigt, vernetzt das monomere Methyl-Methacrylat MMA zu Polymethyl-Methacrylat PMMA, einem festen, klar durchsichtigen Polymer. Die Polymerisation wird durch Peroxide angestoßen und gesteuert. Der Trivialname von PMMA lautet Plexiglas.

Bild 26: Polymerisation von
Methyl-Methacrylat MMA
zu Polymethyl-Methacrylat
PMMA (Plexiglas)



In der praktischen Konservierung ist vor allem Paraloid B72 in vielfältigem Gebrauch. Chemisch ist Paraloid ein Co-Polymerisat von Ethylmethacrylat und Methylacrylat (Bild 27). Wie sich durch die Nummer B 72 andeutet, existieren zahlreiche weitere Produkte von Paraloid.

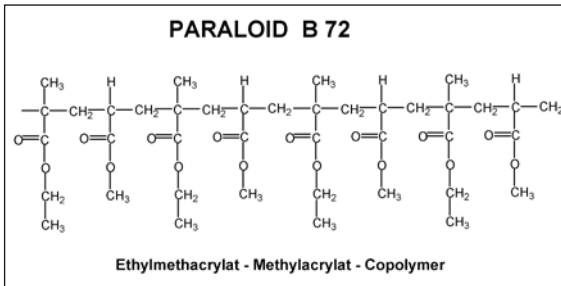


Bild 27: Chemische Struktur von Paraloid B 72

Acrylate werden für viele Anwendungen eingesetzt. Als Tränkstoffe bei Mörteln und Gesteinen, zur Festigung von Farbschichten, als Bindemittel für Retuschen. PMMA ist auch der Tränkstoff bei der Acrylharzvolltränkung. Ein dünner PMMA-Film im Porenraum eines Mörtels ist in Bild 28 zu sehen.

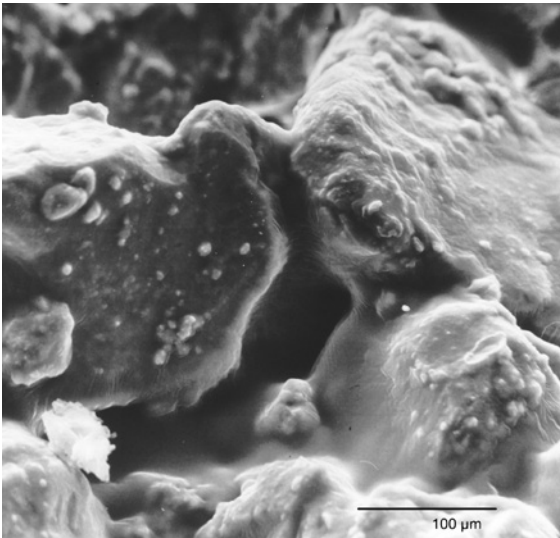


Bild 28: Dünner Film von PMMA im Porenraum eines Mörtels

- Epoxide Epoxidharze

Auch in dieser Stoffgruppe existiert eine große Vielfalt. Epoxide bauen auf dem Epoxidharz Bisphenol A – Diglycidylether (Bild 29) auf. Dieser ist für sich genommen nicht verwendungsfähig, denn er benötigt einen Aminhärter, um ihn zu dem zu machen, wofür er eigentlich vorgesehen ist, nämlich zu einen sehr festen Klebstoff.

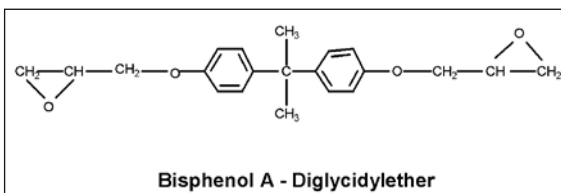


Bild 29: Chemische Struktur von Epoxidharz

Das hauptsächliche Anwendungsgebiet der Epoxide ist die Klebung von gebrochenen Materialien. Je nach Epoxidharz und Härter gibt es auch sehr dünnflüssige Epoxidharze, die auch für die Festigung von Natursteinen Verwendung gefunden haben.

E3.3 Kieselsäureester

Ester sind eine Gruppe von zahlreichen chemischen Verbindungen. Sie entstehen aus der Reaktion einer beliebigen anorganischen oder organischen Säure mit einem beliebigen Alkohol. Die als Steinfestiger bekannten Kieselsäureester sind das Reaktionsprodukt der Orthokieselsäure $\text{Si}(\text{OH})_4$ mit Ethylalkohol $\text{CH}_3\text{H}_2\text{-OH}$, wie in Bild 30 gezeigt.

Angestoßen durch einen Katalysator findet im Baustoff die Rückreaktion zu Orthokieselsäure und Ethylalkohol statt. Diese Reaktion nennt man Hydrolyse. Dabei werden die sensiblen -Si-O-Si- Bindungen aufgebrochen. Der flüchtige Ethylalkohol verdampft vollständig, sodass nur der erwünschte Wirkstoff im Porenraum zurückbleibt. Durch intramolekulare Abspaltung von H_2O vernetzt die instabile Orthokieselsäure spontan zu amorphem Kieselgel. Als Gel wird eine kolloidale Mischung von Feststoffen und Wasser bezeichnet. In dem Kieselgel ist anfangs noch sehr viel H_2O eingelagert, das mit der Zeit verdunstet, wodurch sich die typischen geschwungenen Schrumpfrisse bilden (Bild 31).

Als kommerzielle Kieselsäureester sind verschiedene Produkte auf dem Markt. Das gängigste enthält reinen Kieselsäureester, aus dem sich ungefähr 30 % Gel abscheidet. Andere sind mit Hilfe organischer Lösungsmittel auf einen Wirkstoffgehalt von 10 % verdünnt, andere durch werkseitige, gezielt geregelte partielle Hydrolyse auf 45 bis 50 % Gelabscheidungsrate konzentriert. Die letztgenannten sind für besonders stark entfestigte Materialien wie Putze oder Mörtel geeignet.

Das aus üblichen Kieselsäureestern gebildete Gel weist eine hohe Sprödigkeit und Rissbildung auf, was eigentlich unerwünscht ist. Aus diesem Grund hat man den Kieselsäureestern lineare Verbindungen zugesetzt, die sich als sogenannte Weichsegmente zwischen die Blöcke Kieselgel einreihen. In Bild 32 sind zwei Weichsegmente gezeigt, oben ein Polydimethylsiloxan, unten ein Polyether, der an seiner -C-O-C- Bindung zu erkennen ist. Die Variante mit Polydimethylsiloxan erzeugt ein hydrophobes Gel, das aus Polyether gebildete ist hydrophil. Die aus diesen Produkten gebildeten Gele sind sehr stabil und weisen kaum Schrumpfrisse auf (Bild 33).

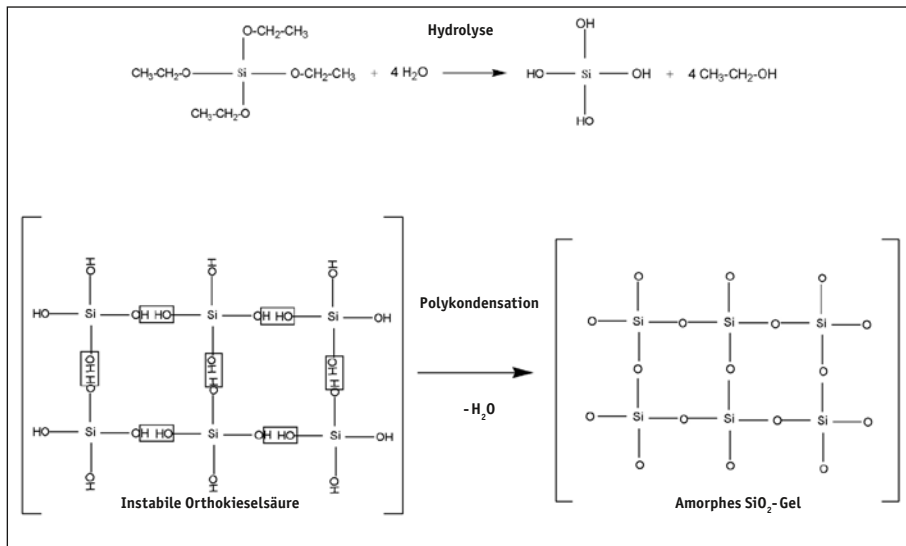


Bild 30: Hydrolyse und Polykondensation von Kieselsäure-Ethylester

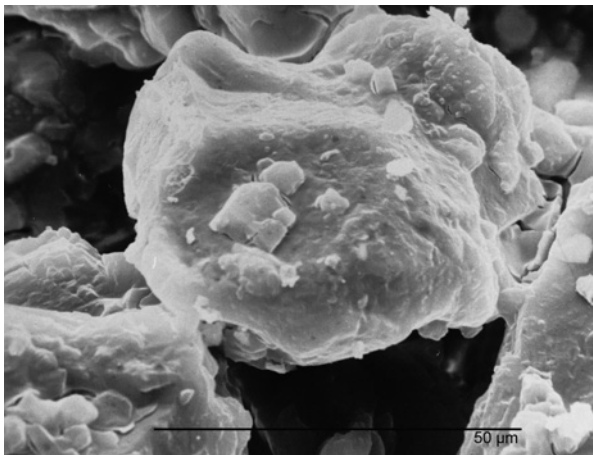


Bild 31: Kieselgel mit geschwungenen Schrumpfrissen

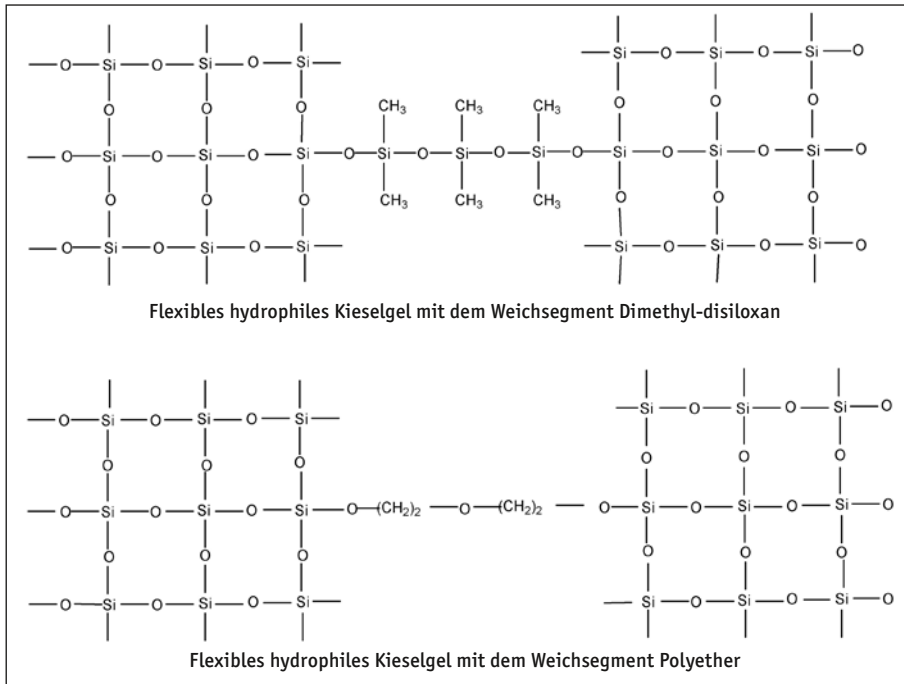


Bild 32: Kieselgele mit Weichsegmenten aus Dimethylsiloxan und Polyether

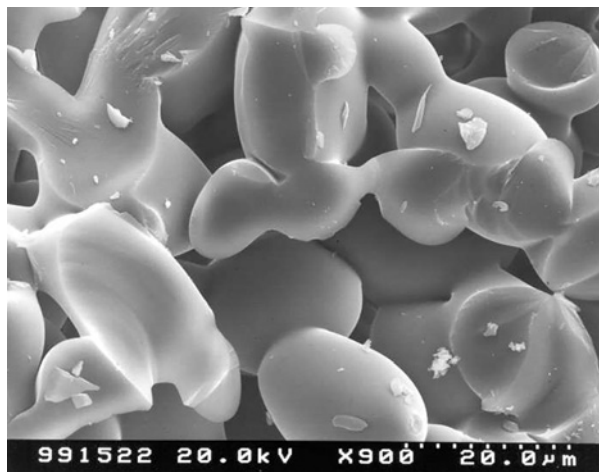


Bild 33: Rissfreies Kieselgel
aus Kieselsäureester
mit Weichsegment

E3.4 Hydrophobierungsmittel: Silane – Siloxane – Polysiloxane

Hydrophobierung bedeutet die Veränderung der Oberflächeneigenschaften eines Baustoffs von hydrophil (Wasser anziehend) zu hydrophob (Wasser abweisend). Die für diesen Zweck eingesetzten Verbindungen gehören zur Klasse der Siloxane.

In der Literatur und in Technischen Merkblättern ist immer wieder zu lesen, dass die betreffenden Hydrophobierungsmittel eine Mischung aus Silanen und Siloxanen seien. Per Definition sind Silane Verbindungen von Silizium mit Wasserstoff. Die Siliziumatome sind direkt miteinander verbunden: --Si--Si--Si-- Verbindungen dieses Typs kommen in Hydrophobierungsmitteln aber nicht vor.

Typisch für Siloxane ist die sogenannte Siloxanbindung: --Si--O--Si-- . Die heute handelsüblichen Hydrophobierungsmittel basieren alle auf sogenannten Alkyl-Trialkoxysilanen, die eigentlich monomere Siloxane genannt werden müssten. Sie weisen eine direkte Si-C Bindung und drei Si-O-C Bindungen auf: $\text{R}_1\text{--Si--(O--R}_2\text{)}_3$. R_1 und R_2 stellen zwei unterschiedliche organische Verbindungen (Reste R) dar, z. B. $\text{R}_1 = \text{CH}_3$ (Methylgruppe) und $\text{R}_2 = \text{CH}_2\text{--CH}_3$ (Ethylgruppe). Die Begriffe monomeres Siloxan, oligomeres Siloxan und polymeres Siloxan sind in Bild 34 bildlich dargestellt.

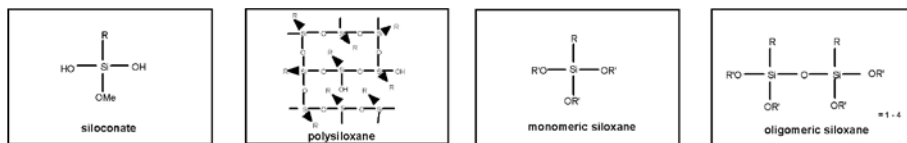


Bild 34: Vereinfachte Strukturformeln von Siloxanen unterschiedlichen Vernetzungsgrades

Monomeres Siloxan besteht aus einzelnen, unvernetzten Molekülen. Im oligomeren Siloxan sind mehrere Einzelmoleküle zu einem Verbundmolekül verbunden. Die Anzahl der über Siloxanbindungen --Si--O--Si-- vernetzten Moleküle liegt zwischen 2 und 10. Polymere Siloxane oder Polysiloxane bestehen aus Makromolekülen mit vielen Tausend Bausteinen.

Zusätzlich ist ein Silikonat abgebildet. Diese Verbindungen besitzen eine --Si--O--Me ($\text{Me} = \text{Na, K}$) Bindung. Sie wirken ähnlich wie Siloxane. Die Metallionen werden abgespalten und verbinden sich mit dem Luft- CO_2 zu Natrium- bzw. Kaliumkarbonaten. Die eigentlichen Silikonatmoleküle vernetzen zu einem Polysiloxan, das aufgrund des organischen Rests R am Si-Atom hydrophobierend wirkt. Silikonate sind im unvernetzten Zustand wasserlöslich und werden für Injektagen gegen aufsteigende Feuchte eingesetzt.

Hydrophobierungsmittel auf Siloxanbasis werden kommerziell in verschiedenen Modifikationen angeboten: monomeres ($n = 1$), oligomeres ($n = 2\text{--}4$) oder polymeres Siloxan. Das Endprodukt nach Hydrolyse und Kondensation ist immer gleich, ein vollständig vernetztes Polysiloxan, welches der Baustoffoberfläche die hydrophoben

Eigenschaften verleiht. Auch vollständig vernetzte Polysiloxane sind im Handel erhältlich. Die Wirkstoffkonzentration beträgt in diesen Fällen nur 5–8 %. Die Wirksamkeit entfaltet sich allein durch die Verdunstung des Lösungsmittels. Die chemischen Zusammenhänge sind auf Bild 35 gezeigt.

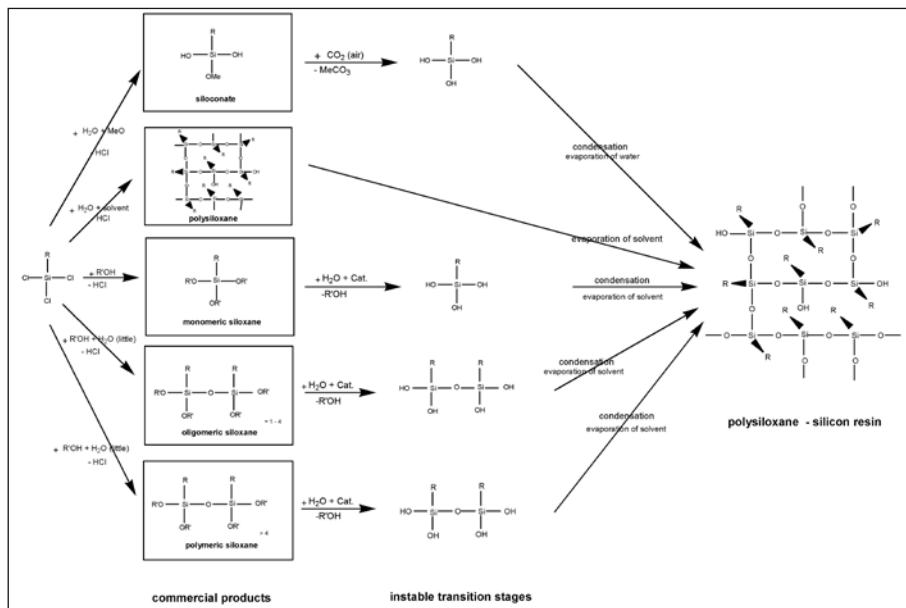


Bild 35: Reaktionsschema der Siloxane zu Polysiloxanen

Die Reaktion der Siloxan Ausgangsprodukte geschieht in der genau gleichen Weise wie bei den Kieselsäureestern. Nach Hydrolyse und anschließender Kondensation bildet sich der in Bild 35 gezeigte Polysiloxanfilm.

Die am Si-Atom gebundenen Alkylreste können aus verschiedenen Molekülgruppen bestehen. Kommerzielle Produkte besitzen meist Methyl-, Isobutyl- oder Isooctylgruppen, welche für die wasserabweisende Wirkung verantwortlich sind. Diese unpolaren Molekülgruppen orientieren sich weg von der polaren, hydrophilen Baustoffoberfläche und bilden somit einen geschlossenen, hydrophoben Film.

Die Silanolbestandteile $\text{Si}(\text{OH})$ orientieren sich zur Baustoffoberfläche hin. Sie vernetzen nicht nur untereinander, sondern auch mit OH-Gruppen, die auf den Mineraloberflächen des Baustoffs angeordnet sind. Auf diese Weise entsteht eine sehr feste Verbindung zwischen Polysiloxan und Mineraloberfläche. Die chemischen Abläufe sind schematisch in Bild 36 dargestellt. Einen Polysiloxanfilm auf Tonmineralplättchen im Porenraum zeigt Bild 37.

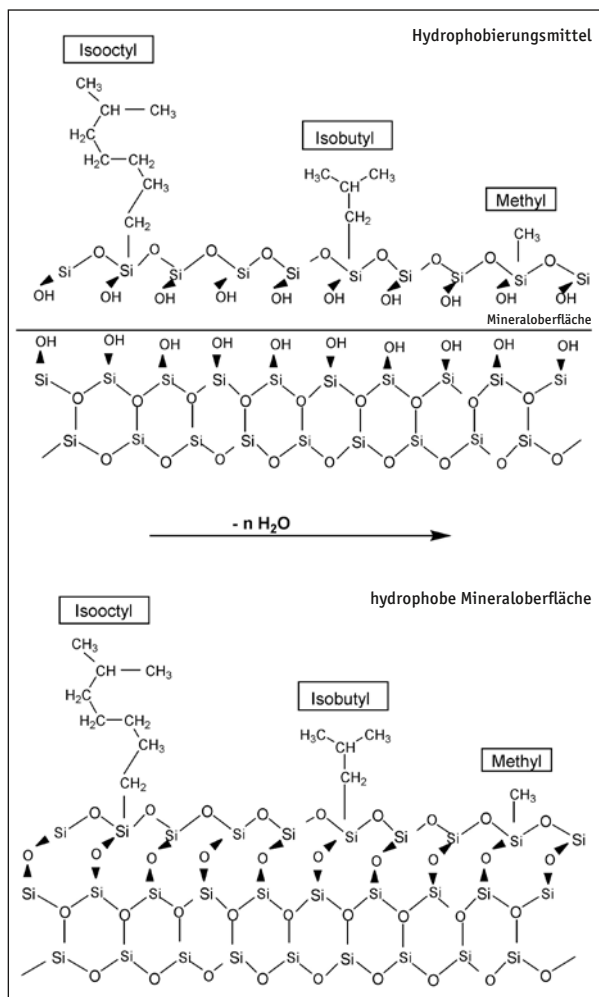


Bild 36: Mechanismus der Anbindung von Siloxanen auf Mineraloberflächen

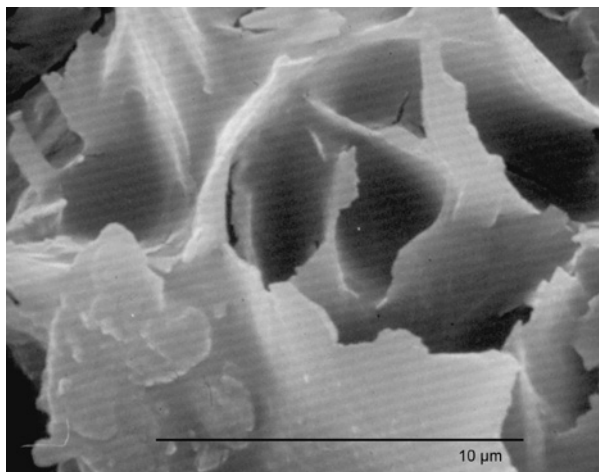


Bild 37: Polysiloxanfilm auf Tonmineralplättchen im Porenraum eines Sandsteins

Über die Art der Alkylgruppen, die an den Trialkoxysiloxanen gebunden sind, finden sich in den Datenblättern der Herstellerfirmen fast nie Angaben. Vorherrschend scheinen gegenwärtig Isooctylgruppen zu sein. Die Funktionsweise längerer Alkylgruppen besteht darin, dass diese die für Hydrolyse empfindlichen Siloxanbindungen –Si–O–Si– vor saurem oder alkalischem Angriff schützen und auf diese Weise die Lebensdauer verlängern. Die Alkalibeständigkeit ist beim Einsatz auf Mörtel, Putz oder Beton wichtig, da diese eine hohe Alkalität ($\text{pH} = 12$) aufweisen. Methylsiloxane waren in der Anfangsphase in den 1950er- und 1960er-Jahren die ersten Produkte. Heute werden sie wegen ihrer mangelnden Alkalibeständigkeit kaum mehr eingesetzt.

E3.5 Steinreinigung – Materialien und Methoden

Es wird ein Überblick gegeben nicht nur über die heute überwiegend üblichen Verfahren, sondern auch über ältere, in der Denkmalpflege nur noch seltener angewendete Verfahren. Wiedergegeben werden nur die Summenformeln, wenn es sich um einfache Moleküle handelt. Komplizierte Molekülstrukturen werden nicht dargestellt, da sie nur für Chemiker informativ wären. Zudem hat jeder Hersteller seine eigenen Rezepturen, sodass die hier genannten Chemikalien nur beispielhaften Charakter haben können.

- **Chemische Reiniger**
Saure Reiniger benötigt man zur Entfernung von Kalkschleiern, Zementschleiern und Mörtelresten. Die Inhaltsstoffe sind Phosphorsäure H_3PO_4 , Citronensäure Monohydrat $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Amidosulfonsäure $\text{SO}_2\text{-OH-NH}_2$ allein oder in Mischungen.
- **Schmutzlöser**
Darunter versteht man Reiniger, die fett-, öl- und rußhaltige Ablagerungen entfernen. Sie beinhalten neben ätzenden Komponenten wie Ammoniumbifluorid NH_4HF_2 vor allem Mischungen der verschiedensten Lösungsmittel, Reiniger und Tenside wie Butylglycol, Butoxyethoxyethanol, Polyglycolether, Alkylbenzolsulfonsäure, Dinatriummetasilikat-Pentahydrat und den Komplexbildner für Ca-Ionen Tetranatriummethylen-diamintetraacetat. Die Vielfalt der Inhaltsstoffe ist auf die komplexe Zusammensetzung der Schmutzablagerungen abgestimmt, wobei die enthaltenen ionischen und nichtionischen Tenside zusammen mit alkalischen und sauren Reinigern jeweils spezifisch bestimmte Schmutzkomponenten auflösen sollen.
- **Abbeizer**
Sie dienen zur Entfernung von alten Farbresten und Graffiti. Auch hier herrschen unterschiedliche Tenside vor sowie Ester und Salze der Bernsteinsäure oder Derivate der Maleinsäure.

- Peel-Off-Pasten

Diese Pasten gehören zu den synthetischen Kautschuken. Sie werden auf die zu reinigende Fläche aufgetragen und nach dem Aushärten abgezogen. Dadurch wird der auflagernde Schmutz abgerissen. Es versteht sich, dass diese Methode nur auf stabilen Oberflächen verwendet werden kann. Möglich sind Styrol-Butadien, Styrolacrylat, Reinacrylat und Vinylacetat Kautschuke. Die Peel-Off-Pasten enthalten Füllstoffe, z. B. ZnO (wirkt auch bakterizid), Polymerisationsbeschleuniger (z. B. Zink(dibutyl)dithiocarbamat) und alkalische Zusätze wie z. B. Ammoniak NH_3 zur Verbesserung des Reinigungseffekts. Im Handel ist eine Vielzahl verschiedener Peel-Off-Pasten erhältlich.

- Bakterizide und Fungizide

Sie beinhalten eine zweifache Funktion, die Reinigung von biologischen Schichten sowie die Vermeidung einer schnellen Wiederbesiedlung von Mikroorganismen. Benzisothiazol ist ein Fungizid, das auch modernen Farbensystemen zugesetzt wird. Benzalkoniumchlorid hat desinfizierende und konservierende Wirkung gegen Bakterien, Algen, Pilze und Hefen.

- Trockene und nasse Strahlverfahren

Seit vielen Jahren sind Strahlverfahren in größerem und kleinerem Maßstab im Einsatz. Entscheidend für Erfolg und Schadensrisiko sind die Größe der Düse, der Druck und das Strahlgut.

Für den restauratorischen Bereich gibt es die Mikrosandstrahler, die mit feinsten Düsen arbeiten und bei denen sich der Druck direkt vor Ort einstellen lässt. Als Strahlmittel finden Feinsande, Korund-, Calcit-, Granat-Granulat Verwendung. Die Flächenleistung ist gering, was bei der Schwierigkeit der Reinigungsaufgabe jedoch erwünscht ist (Bild 38).



Bild 38:

Mikropartikelstrahlreinigung
an der Farbschicht auf einer
gotischen Skulptur

Für größere Flächen sind größere Düsen und große Druckaggregate vonnöten. Gegenüber der geradlinigen Venturidüse hat sich die Rotedüse durchgesetzt, bei welcher der Partikelstrahl in einem Winkel schräg auf die Oberfläche trifft. Die Geräte erlauben eine trockene und eine nasse Anwendung. Als Strahlmittel kommen in Frage: Sande, Schlacken-, Granat-, Calcitgranulat und andere Stoffe (Bild 39).



Bild 39: Partikelstrahldüse für große Flächenleistung

Zu den Strahlverfahren zählt auch das Trockeneis-Strahlverfahren. Trockeneis ist auf -40 °C gekühltes Kohlendioxid CO_2 . Es muss auf dieser Temperatur gehalten werden, damit die Trockeneiskörnchen nicht verkleben. Der Reinigungseffekt besteht zum einen in der Impaktwirkung des Partikels, zum anderen in einem thermischen Schock, der zur Abspaltung der Schmutzablagerungen beiträgt. Der Vorteil liegt darin, dass das Strahlgut rückstandsfrei verdunstet. Bild 40 zeigt ein Gerät zum Trockeneisstrahlen.



Bild 40: Gerät für Trockeneisstrahlen

- Laserreinigung

Die Laserreinigung hat sich seit vielen Jahren auch für Großobjekte durchgesetzt. Der Reinigungseffekt ist überzeugend, vor allem, weil die Grundsubstanz nicht angegriffen wird, wenn die Bedienung vorschriftsmäßig vorgenommen wird.

Die ersten Reinigungslaser waren die NdYAG Laser, deren Laser erzeugender Kristall ein NeodymYttriumAluminiumGranat ist. Sie erfordern ein umfangreiches und schwergewichtiges Equipment, das nur mühsam auf Gerüste gehoben werden konnte. Es besteht aus Generator und Kühlaggregat (Bild 41).



Bild 41: Equipment aus Generator und Kühlaggregat (im Hintergrund) für einen NdYAG Laser



Bild 42: Strichfokus eines Rucksacklasers

Heute werden sogenannte Rucksacklaser verwendet, die wie ein kleines Paket von wenigen Kilogramm Gewicht auf dem Rücken getragen werden können. Es handelt sich um Diodenlaser, die mit Luft gekühlt werden. So entfällt das große Kühlaggregat der Granatlaser. Der Laser wird entlang einer Linie geführt, wie auf Bild 42 sichtbar ist.

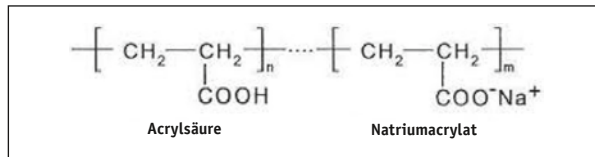
E3.6 Entsalzungskompressen

Eine Entsalzung von Skulpturen kann im Wasserbad vorgenommen werden, wenn es der Zustand der Figur erlaubt. Bei Mauerwerk ist das logischerweise nicht möglich. Die bestgeeignete Methode zur Reduzierung der Salzkonzentration im Gestein ist die Entsalzung mittels Kompressen.

Kompressen bestehen aus einer oder mehreren Komponenten, die mit entionisiertem Wasser angemacht werden müssen. Eine gute Darstellung des Verfahrens findet sich in www.salzwiki.de/index.php/Entsalzung_durch_Kompressen und WTA-Merkblatt 3-13-01 D:2003:

- Organische Stoffe mit hoher Wasseraufnahme und hohem Wasserrückhaltevermögen (Cellulose, Papierpulpe),
- Mineralische Komponenten mit hoher spezifischer Oberfläche und guten Adsorptionseigenschaften (Tonminerale wie Kaolin und Bentonit (= Gemisch aus Montmorillonit und Smectit), Superabsorber (z. B. Polymere aus Polyacrylsäure und Natrium-Polyacrylat)). Die Strukturformel ist in Bild 43 zu sehen.
- Inerte Füllstoffe mit der Eigenschaft, der Mischung Standfestigkeit zu verleihen, hohe Porosität und ein lockeres Gefüge zu erzeugen, die Verarbeitung zu erleichtern und das Schwinden zu minimieren: Quarzsand, Quarzmehl, HDK (hochdisperse Kieselsäure), Leichtzuschlag (Perlit)

Bild 43: Strukturformel
des Superabsorbers
Polyacrylsäure und
Natrium-Polyacrylat



Die Anwendung kann als nasse oder als trocknende Kompressse erfolgen. Vor dem Auftrag der Kompressse muss das zu entsalzende Objekt ausreichend genässt werden. Es wird auch vorgeschlagen, die Befeuchtung nicht nur von vorne, sondern vermittels Bohrungen hinter den Salzhorizont oder über die Fugen vorzunehmen.

Bei der nassen Kompressse wird diese mit einer Folie abgedeckt. Der Salztransport in die Kompressse erfolgt allein durch Diffusion der Salz Ionen gemäß dem Konzentrationsgradienten.

Bei der abtrocknenden Kompressse erzeugt die Verdunstung an der Oberfläche einen Kapillartransport an die Oberfläche. Am Verdunstungshorizont wird die Salzfracht der Lösung in der Kompressse abgelagert.

Für große Flächen sind Kompressen zu verwenden, welche mit Maschinen aufgespritzt werden können. Die Anwendungszeiten betragen mehrere Wochen. Die Applikationen müssen meist mehrfach wiederholt werden. Der Entsalzungserfolg ist planmäßig durch chemische Analysen der Salzgehalte in den Kompressen zu überprüfen. Da der Kapillartransport leistungsfähiger ist als der Diffusionstransport, sind von der trocknenden Kompressse eine schnellere Entsalzung und ein besserer Effekt zu erwarten.

Das Merkblatt WTA 3-13-01 D:2003 nennt folgende Kompressen:

Tabelle 3: Liste der Kompressen und ihre Eigenschaften

Kompresse Zusammensetzung	Vorteile	Nachteile
Reine Cellulose Fasern	<ul style="list-style-type: none"> • pH neutral • flexibel, gut anpassend, • hohe Wasseraufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Standfestigkeit • Gefahr von Schimmelbildung
Bentonit, Attapulgit, Kaolin rein oder mit Cellulose vermischt	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Wasserrückhaltevermögen • Bei Kaolin: neutrale Lösung, keine Alkalien mobilisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Hart bei hohem Tonmineralanteil • z. T. erhöhter pH-Wert • Gefahr von weißen Rückständen bei Kaolin
Tone allgemein	<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Wasserrückhaltevermögen 	<ul style="list-style-type: none"> • Extrem hart • z. T. erhöhter pH-Wert • lösliche Alkalien bedeuten zusätzlichen Salzeintrag
Papiere bzw. dessen Vorstufen, Cellulosen, Lignine, Holzfasern	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Wasseraufnahme 	<ul style="list-style-type: none"> • Bleichmittel und Farben können zu Verfärbungen führen.
Cellulose mit hohem Sandanteil	<ul style="list-style-type: none"> • Bei hochwertigen Sanden pH-neutral 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwankende Eigenschaften • Schwierig zu verarbeiten • Geringe Standfestigkeit
Tonmineral-Cellulose-Sandmischungen	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Standfestigkeit • Maschinell zu verarbeiten • Festigkeit und Schwindung durch Zusammensetzung regulierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Mischung kann zu fest oder zu schwer werden. • z. T. zu hoher pH-Wert
Tonmineral-Leichtzuschlag-Mischung, mit oder ohne Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Standfestigkeit • Maschinell zu verarbeiten • Geringes Schwinden • Geringe Dichte 	<ul style="list-style-type: none"> • z. T. erhöhter pH-Wert • kann je nach Mischung zu fest werden • Gefahr von weißen Rückständen bei Kaolin

E3.7 Farbsysteme für Fassungen auf Stein

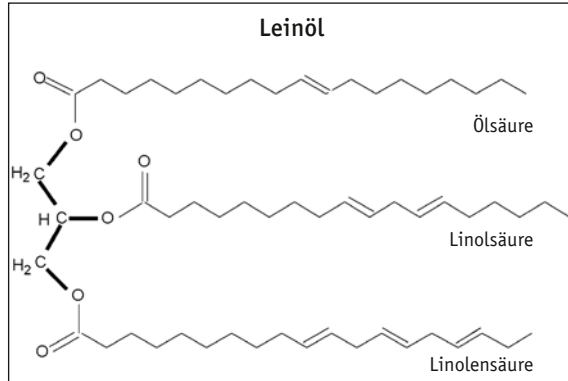
- Kalkfarbe

Baut auf $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Bindemittel und Füllstoffen wie Sand und Kreide auf. Von besonderer Bedeutung sind die speziellen Zusatzstoffe Kasein (historisch), Leinöl (historisch, in sehr geringen Mengen) und Kunststoffdispersion (modern). Kalkfarben sind im Freien bei Beregnung nicht beständig.

- Ölfarben

Leinöl ist der Grundstoff der Ölfarben. Die chemische Struktur von Leinöl wurde schon im Kapitel »Organische Bindemittel« besprochen (Bild 44). Als Farbfassung für Bildwerke im Freien hat die Leinöl-Bleiweiß-Farbe in der Vergangenheit »markt-beherrschend« Anwendung gefunden.

Bild 44: Chemische Struktur von Leinöl



Das Farbpigment Bleiweiß beschleunigt die Trocknung der Farbe. Skulpturen aus Sandstein, die mit Leinöl-Bleiweiß-Farbe gestrichen wurden, sollten meist Marmorskulpturen vortäuschen. Als neutrale Füllstoffe dienen Baryt und Kreide. Leinöl-Bleiweißfarben können sich schwarz verfärben. Verantwortlich dafür ist die Bildung von PbO_2 (Braunstein) aus Bleiweiß.

Bleiweiß-Leinöl-Farbe ist dampfdicht und sollte deshalb nur auf nicht saugfähigen Gesteinen angewendet werden. Wenn durch nicht zu vermeidende dünne Haarrisse Feuchtigkeit in das darunter liegende, saugfähige Gestein gelangt, geht die Verwitterung unter der Farbschicht weiter. Es entwickeln sich in Folge schwere Schäden an Gestein und Farbe.

In den 1990er-Jahren sind die zwei großen Figurengruppen vor dem Schloss Seehof bei Bamberg nach historischem Vorbild mit Leinöl-Bleiweiß-Farbe gefasst worden (Bild 45). Die Farbschicht musste bereits mehrfach vollständig überarbeitet werden.



Bild 45: Figurengruppe Zeus im Kampf mit den Giganten vor Schloss Seehof

- Tempera

Tempera ist eine Emulsion von einer wässrigen und einer öligen Phase.

Die wässrige Phase setzt sich zusammen aus einem oder mehreren der folgenden Stoffe: Leim, Kasein, Ei, Gummen (Gummi Arabicum), Stärke.

Die ölige Phase besteht aus einem oder mehreren der folgenden Stoffe: Leinöl, Mohnöl, Nussöl, Sonnenblumenöl und deren Standöle (vorvernetzte Form der genannten Öle), Alkydharze (Polyester, hergestellt durch Vernetzung aus den genannten Ölen), Harzen wie Kollophonium, Mastix oder Dammar.

Man unterscheidet zwischen wässriger Tempera (der wässrige Anteil überwiegt) und fetter Tempera (der ölige Anteil überwiegt).

Tempera ist dasjenige Farbsystem, welches nach der Grundierung zur Gestaltung der Oberflächen mit darstellerischen Feinheiten verwendet wurde.

In Bild 46 ist der Aufbau der Farbfassung auf dem Weltgerichtsportal von Sankt Sebald in Nürnberg gezeigt. Auf der Grundierung mit Leinöl-Mennige liegen zwei Farbschichten aus öliger Tempera.

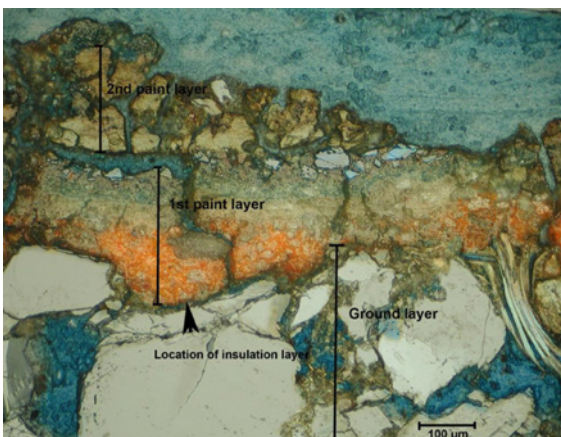


Bild 46: Malschichtaufbau am Weltgerichtsportal von Sankt Sebald in Nürnberg (Labor Drewello & Weißmann)

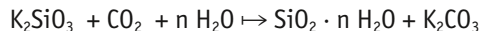
- Silikatfarben

Silikatfarben bauen auf Wasserglas K_2SiO_3 oder Na_2SiO_3 auf. Man unterscheidet zwischen den zweikomponentigen reinen Silikatfarben (»Purkristallat«) und den moderneren einkomponentigen Dispersions-Silikatfarben.

Die reinen Silikatfarben sind eine Entwicklung des Chemikers Keim (Keim'sche Silikatfarben) im 19. Jahrhundert. Die erste Komponente ist das reine Bindemittel Kaliumsilikat (Kaliumwasserglas), die zweite Komponente sind feine Füllstoffe wie Flussspat und Pigmente, die vor Anwendung zwölf Stunden in Wasserglaslösung »reifen« müssen. Die Verarbeitung von reinen Silikatfarben gestaltet sich deshalb zeitaufwendig und erfordert große Erfahrung. Der erste Anstrich verwendet das reine Wasserglas (»Fixativ«) zur Homogenisierung der Oberfläche, der zweite Anstrich ist der eigentliche Farbanstrich.

Die modernen Dispersions-Silikatfarben bestehen nur mehr aus einer, anwendungsfertigen Komponente. Die beigefügten Kunststoffdispersionen und zusätzliche Tenside verhindern die Entmischung, sodass die Verarbeitung wesentlich vereinfacht ist.

Die Gesamtreaktion von Wasserglas in den Silikatfarben wird gewöhnlich wie folgt aufgeschrieben



Demnach ist die Reaktion mit CO_2 aus der Luft für die Bildung des Farbbindemittels Kieselgel $SiO_2 \cdot n H_2O$ verantwortlich. Da der CO_2 -Gehalt in der Luft aber gering ist, würde die Abbindezeit von Silikatfarben sehr lang sein. Tatsächlich reagieren Silikatfarben aber spontan unter Bildung von Kieselgel $SiO_2 \cdot n H_2O$. Der Abbindeprozess muss deshalb anders verlaufen als es die chemische Gleichung anzeigt. Wie dieser Prozess tatsächlich abläuft, ist in der folgenden Bild 47 gezeigt.

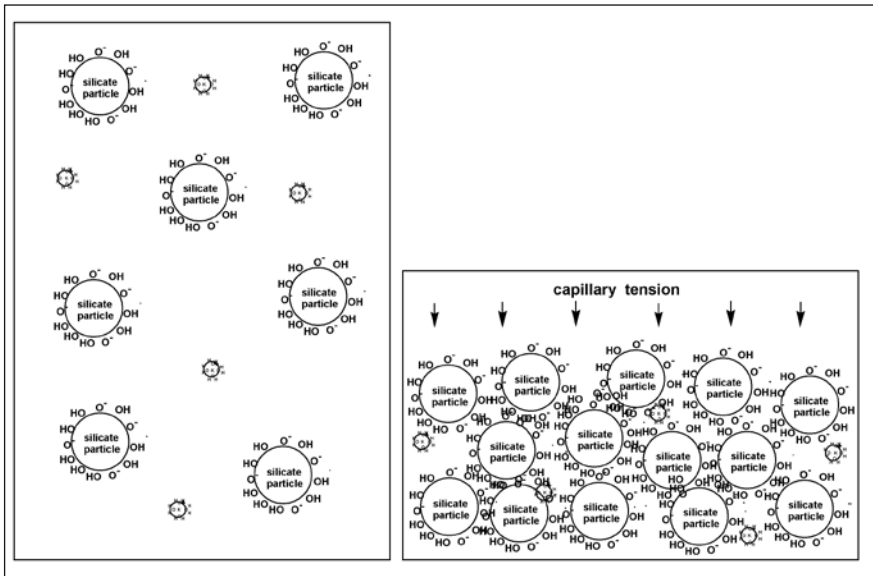


Bild 47: Abbindeprozess von Wasserglas

Die Wasserglaslösung ist eine kolloidale Lösung von kleinsten Teilchen von Silikatpartikeln, welche eine negative Oberflächenladung tragen. Wegen der gleichen Oberflächenladung stoßen sich die Silikatpartikel gegenseitig ab. Dazwischen bewegen sich die Kaliumionen, die mit ihrer positiven Ladung für den neutralen Ladungszustand der Lösung sorgen. Beide, Silikatpartikel und Kaliumionen, sind von Hydrathüllen umgeben. Wird nun diese kolloidale Lösung auf ein poröses Material aufgetragen und von diesem in den Porenraum gesaugt, dann wird schlagartig das Volumen der Lösung verdichtet. Die Hydrathüllen stoßen aneinander und vereinigen sich, die Silikatpartikel agglomerieren zu festem Kieselgel. Die Kaliumionen verbleiben über lange Zeit noch als $\text{K}(\text{OH})$ in den Gelporen und wandeln sich dann langsam zu K_2CO_3 um.

Dieses Modell ist in guter Übereinstimmung mit der praktischen Erfahrung. Silikatfarben reagieren spontan, ihre Eindringtiefe ist gering, das Kieselgel bleibt an der Oberfläche und in den ersten wenigen Millimetern der Gesteinsporen hängen und führt zu einer Versprödung der Oberfläche. Bild 48 zeigt ein Kieselgel, welches aus einer Silikatfarbe entstanden ist. Auffällig sind die kugeligen Gelaggregate. Dieses Gel hat eine völlig andere Erscheinungsform als das aus Kieselsäureester gebildete.

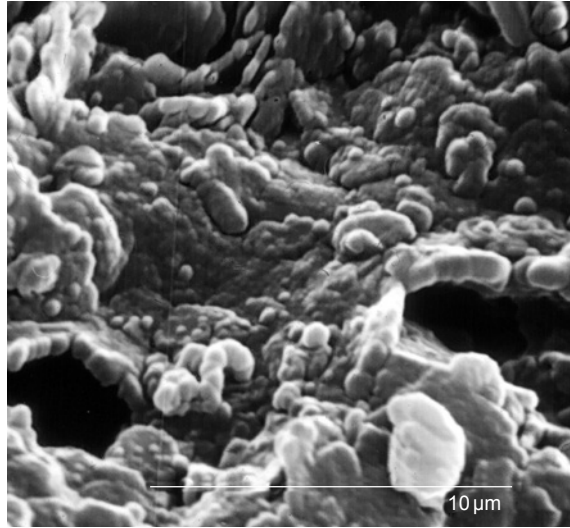


Bild 48: Kieselgel, gebildet aus einer Silikatfarbe

- Silikonharzemulsionsfarbe

Das Bindemittel der Silikonharzemulsionsfarben lässt sich als eine Silikonharzemulsion beschreiben, die durch nichtionische/anionische Tenside als Öl in Wasser Emulsion stabilisiert ist. Als Silikone sind vornehmlich Mischungen aus Silikonharzen und Polydimethylsiloxanen in Gebrauch. Weiterhin befinden sich Acrylatdispersionen in der Mischung. Aus diesen Grundstoffen werden verschiedene Farbsysteme rezeptiert, die durch folgende Bindemittel charakterisiert sein können:

- i) Silikonharzemulsion
- ii) Niedermolekulare Silikonharzemulsion
- iii) Siliziumorganisch vergütetes Copolymer.

Copolymere können alle möglichen organischen Verbindungen sein. Die Vergütung durch siliziumorganische Verbindungen deutet darauf hin, dass oligomere oder polymere Silikone mit vernetzungsfähigen organischen Resten wie Acrylat- oder anderen ungesättigten Kohlenwasserstoffketten enthalten sind.

Dazu kommen spezielle Verdünner, welche ähnliche oder gleiche Rezepturen aufweisen. Als Grundierung kann das reine Bindemittel oder ein Produkt aus Silikonat und Kaliumsilikat verwendet werden.

Die Füllstoffe sind feines Quarzmehl, Talkum und andere sowie zusätzlich Biozide zur Verminderung von biologischer Besiedlung.

Silikonharzemulsionsfarben stellen chemisch ein sehr komplexes System dar, über das in den Merkblättern nur allgemeine Informationen verbreitet werden. Für den Nicht-Spezialisten reichen diese in der Regel auch aus, da die genauen chemischen Bezeichnungen für ihn nicht relevant sind.

Für die Anwendung existieren halblasierende, lasierende, feinsandige und strukturierte Rezepturen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist sehr hoch, weil die hohe PVK (Pigment-Volumen-Konzentration) eine Filmbildung verhindert. Die Farben reagieren wasserabweisend, sodass schon die Grundierung hydrophob eingestellt sein kann. Moderne Farbsysteme dieser Art erreichen in der Farbwirkung die Qualität der Silikatfarben.

E3.8 Graffitienschutz

Vandalismus in Form von Graffiti ist eine große Gefahr für Denkmäler im Freien. Die Schmierereien sind nicht nur eine ästhetische Beeinträchtigung, ihre Entfernung stellt eine große Belastung für die Integrität der Oberfläche dar. Fast immer bleiben Farbspuren zurück, die tief in das Porengefüge eingedrungen sind.

Graffiti aus Sprühdosen sind überwiegend Autolacke mit dem Bindemittel Polyacrylharz zusammen mit einem Härter wie Polyisocyanat. In den Dosen ist das Harz bereits polymerisiert und braucht nur noch zu trocknen. Die Treibmittel Propan oder Butan bewirken, dass die Dosen unter Druck stehen.

Die Antigraffiti Schutzsysteme bauen auf hydrophoben Stoffen auf. Meist sind es Mischungen von Paraffinwachsen und Alkyl-Alkoxysilanen, die eine semipermeable Schicht auf der Oberfläche ausbreiten. Präzisere Angaben zur Zusammensetzung fehlen in den Datenblättern.

Alkyl-Alkoxysilane stimmen chemisch mit den üblichen Hydrophobierungsmitteln überein. Die Alkylgruppe ist für die Schutzwirkung verantwortlich. Sie verhindert, dass sich der Lack mit der Steinoberfläche verbindet. Die Alkylgruppen bestehen aus linearen oder verzweigten Kohlenstoffketten wie Oktan oder Iso-Oktan, die direkt an das zentrale Si-Atom gebunden sind. Besonders wirksam sind fluorierte Kohlenwasserstoffe, bei denen das H-Atom durch Fluor ersetzt ist. Diese Stoffe sind nicht nur wasserabweisend, sondern auch ölabweisend (oleophob).

Die Antigraffiti-Schutzschichten verursachen oft einen wachsartigen, unnatürlichen Glanz. Mit der Zeit bauen sie sich ab und verlieren ihre Wirksamkeit. Man findet oft die Unterscheidung zwischen temporären und permanenten Schutzsystemen. Reine Wachsschichten besitzen natürlich nur eine temporäre Schutzwirkung, Acrylat-Polysiloxan-Schichten gelten als permanente Schutzaufträge, die Mischungen Wachs-Acrylat-Polysiloxan stehen dazwischen. Die Übergänge sind also fließend. Nicht nur die Wachskomponente wird durch UV-Strahlung und Ozon angegriffen; auch die Polysiloxane sind gegenüber dem Angriff von UV-Strahlung und Ozon nicht dauerhaft resistent. Das hat zur Konsequenz, dass der Graffitienschutz alle paar Jahre erneuert werden muss.

E4 Risikoziffer – Umweltschäden an Skulpturen aus Marmor und Sandstein erfassen und objektiv bewerten

Inhalt

E4.1 **Einleitung** 73

E4.2 **Berechnung der Risikoziffer** 74

E4.3 **Messergebnisse** 74

E4.4 **Interpretation** 75

E4 Risikoziffer – Umweltschäden an Skulpturen aus Marmor und Sandstein erfassen und objektiv bewerten

E4.1 Einleitung

Konservierungsarbeiten an Skulpturen aus Marmor oder Sandstein werden in einem Diskurs zwischen Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachter entschieden. Die in Fachgutachten vorliegenden Ergebnisse bilden die Grundlage zur Entscheidungsfindung. Dabei werden die überwiegend messtechnisch gewonnenen Befunde in eine sprachliche Form umgesetzt, die sich subjektiver Formulierungen wie »gering/stark in Mitleidenschaft gezogen« oder »wenig/höchst gefährdet« bedient. Auf diese Weise geht der messtechnische, objektive Befund der Zustandserfassung verloren und wird durch eine subjektive Bewertung ersetzt.

Das Ziel der Risikoziffer vor diesem Hintergrund ist, die subjektive Bewertung durch eine möglichst objektive und quantitative Bewertung zu ersetzen. Dies geschieht durch die konsequente Nutzung der in den Fachgutachten vorliegenden, messtechnisch erfassten Befunde.

Inhaltlich baut das Konzept der Risikoziffer auf der Definition des Begriffs Risiko auf, der aus dem Versicherungswesen abgeleitet ist:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit } W \cdot \text{Schadensschwere } S$$

$$R = W \cdot S$$

In Analogie dazu wird die Risikoziffer in der Restaurierung definiert als das Produkt einer Messwertzahl und einer Bewertungszahl:

$$R(i) = M(i) \cdot B(i)$$

Die **Messwertzahl** $M(i)$ drückt den Messwert eines Parameters (i) in Form einer dimensionslosen Zahl aus. Diese wird entweder durch Differenz und Normierung auf einen Ausgangszustand des Materials berechnet oder drückt einen absoluten Kennwert in Form einer Zahl zwischen Null und Eins aus.

Die **Bewertungszahl** $B(i)$ gibt an, als wie wirkmächtig der betreffende Parameter (i) für die Verwitterung und die Schadensgefährdung einzustufen ist. Die Bewertungszahl $B(i)$ ist vorgegeben und wird nicht verändert. Sie kann zwischen den Zahlen Null und Zehn variieren. Ihr Zahlenwert ist durch Beratung mit den erfahrenen Mitgliedern des Fachbeirats festgelegt worden.

E4.2 Berechnung der Risiko­ziffer

Für die Berechnung der Gesamt-Risiko­ziffer einer Skulptur werden 104 verschiedene Parameter (i) eingesetzt. Für jeden dieser Parameter wird eine gesonderte Risiko­ziffer $R(i)$ berechnet. Die 104 Risikoparameter sind in 10 Excel Datenblättern sortiert, die nach Themengebieten geordnet sind:

1. Objektinformation,
2. kunsthistorische Bewertung,
3. Restaurierungsgeschichte,
4. Umwelt/ Exogene Risikofaktoren,
5. Naturstein/ Endogene Risikofaktoren, getrennt für Marmor und Sandstein,
6. Gefahr durch Menschen/ Vandalismus,
7. mechanische Schäden/ Materialverlust,
8. Veränderungen der Oberfläche,
9. Ultraschall­diagnostik,
10. Gesamtbewertung: Gesamt-Risiko­ziffer.

Im Rechenprozess wird zunächst für jedes Datenblatt eine Risiko­ziffer $R(\text{Datenblatt})$ gebildet. Durch die Normierung auf das Höchst­risiko ist diese Risiko­ziffer immer eine Zahl zwischen Null und Eins. Für die Gesamtbewertung werden die einzelnen Risiko­ziffern der Datenblätter addiert und anschließend der Mittelwert gebildet. Dieser stellt letztendlich die Gesamt-Risiko­ziffer $R(\text{ges})$ für das betreffende Objekt dar und ist ebenfalls eine Zahl zwischen 0 und 1. Der Wert 0 bedeutet kein Risiko, 1 Höchst­risiko.

Durch die rein rechnerische Umsetzung der Messwerte stellt die Risiko­ziffer eine objektive und quantitative Beurteilung des Schadenszustands und der Schadens­gefährdung dar. Zusätzlich abgeleitete Höchst­risiko­ziffern geben Hinweise auf besondere Gefahrenpunkte, die ein sofortiges Eingreifen erfordern.

E4.3 Messergebnisse

Inhaltlich bemisst die Risiko­ziffer den durch die Verwitterung in der Vergangenheit bis heute eingetretenen Schaden und gibt einen Ausblick auf die künftige Schadens­bedrohung. Sie findet Anwendung bei folgenden Fragen:

- Objektive Zustandsbeurteilung,
- Methode für Monitoring,
- Ausweisung von Gefahrenpunkten durch Hochrisiko­ziffer,
- Abbildung einer Rangfolge im Skulpturenkollektiv,
- Simulation der Risikominderung durch Translozieren von Freiaufstellung in ein Depot.

Im DBU-Projekt AZ 33 162/01-45 »Risikoziffer – Umweltschäden an Denkmälern aus Marmor- und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten« war die Anwendung der Risikoziffer auf Marmor- und Sandsteinobjekte vorgesehen. Für ausgewählte Skulpturen und Grabsteine wurde die Gesamt-Risikoziffer $R(\text{ges})$ ermittelt (siehe vordere Innenklappe des Bucheinbands).

In Bild 49 sind die Zahlenwerte der Gesamt-Risikoziffern $R(\text{ges})$ grafisch als Säulendiagramm dargestellt.

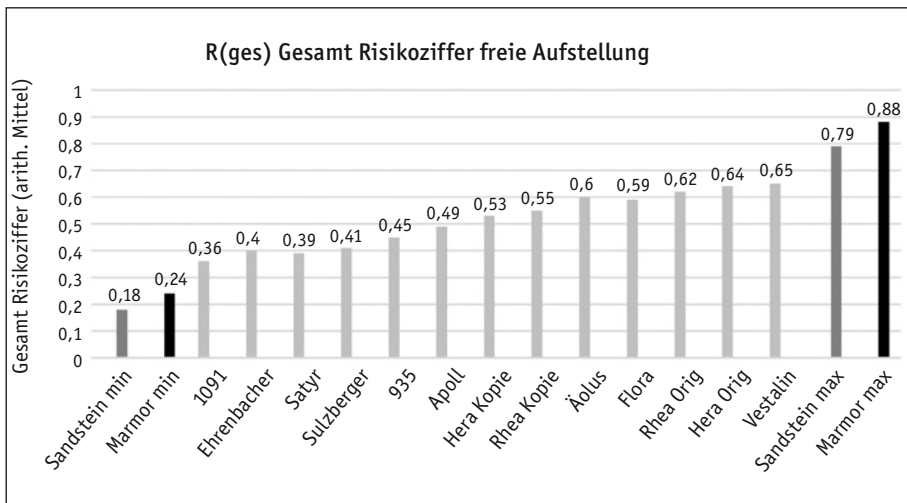


Bild 49: Gesamt-Risikoziffern $R(\text{ges})$ der untersuchten Objekte Apoll, Vestalin, Satyr (Schlosspark Sanssouci, Potsdam); Hera, Rhea (Barockgarten Großsedlitz bei Dresden); Äolus, Flora (Schlosspark Nymphenburg); Grabsteine Nr. 935, Nr. 109, Ehrenbacher, Sulzberger (Jüdischer Friedhof, Baiersdorf/Erlangen). (Siehe auch vordere Innenklappe des Bucheinbands.)

E4.4 Interpretation

Einige der Skulpturen wie die Vestalin oder die Originalfiguren von Hera und Kybele weisen starke Schäden auf. Ihre Risikoziffer sollte deshalb nahe beim Maximum $R(\text{ges})=1,0$ liegen. In Anbetracht der sichtbaren Schäden erscheinen jedoch die ermittelten Risikoziffern $R(\text{ges})=0,64$ bis $0,65$ als zu gering. Man muss jedoch berücksichtigen, dass die subjektive personengebundene Einschätzung auf die Schadensschwerpunkte fokussiert und dabei die anderen Einflussfaktoren wie das Klima außer Acht lässt. Die Einschätzung durch die Risikoziffer ist deshalb integraler und objektiver.

Ganz entscheidend ist die Erkenntnis, dass aus grundsätzlichen Zusammenhängen die Risikoziffer nie die Endwerte null oder eins erreichen kann, weil auch keines der Datenblätter die Endwerte null oder eins annehmen kann. So ist es zwar theoretisch möglich, dass die Risikoziffer für die Ultraschalldiagnostik den Wert eins erreicht,

wenn der Marmor in idealem Ausgangszustand ist und sehr hohe Ultraschallgeschwindigkeiten zeigt. Sie kann aber auf der anderen Seite nicht den Wert null annehmen, weil dann die Ultraschallgeschwindigkeit an allen Stellen der Skulptur so niedrig sein müsste, dass die Skulptur gar nicht mehr existieren würde.

Unter Zugrundelegung bestimmter Annahmen für die Grenzwerte der Einzelfaktoren auf den Datenblättern resultieren für Marmor und Sandstein folgende Grenzwerte:

- Marmor: $R(\text{ges})$ minimal = 0,24, $R(\text{ges})$ maximal = 0,88.
- Sandstein: $R(\text{ges})$ minimal = 0,18, $R(\text{ges})$ maximal = 0,79

Legt man diese Grenzwerte zu Grunde, dann verringern sich die Abstände zwischen den berechneten Risikozyffern und den theoretischen Grenzwerten. Hat eine Marmorskulptur zum Beispiel eine berechnete Risikozyffer $R(\text{ges}) = 0,6$, dann beträgt der Abstand zum Maximalwert nicht 0,4 ($1,0 - 0,6$), sondern nur noch 0,28 ($0,88 - 0,6$). Die berechneten Risikozyffern $R(\text{ges})$ nähern sich damit den personalen Einschätzungen an.

Zusammenfassend lässt sich aus den Gesamt-Risikozyffern $R(\text{ges})$ eine allgemeine Einstufung der Schadensgefährdung ableiten:

- Für Marmor:
0,24 bis 0,44 = wenig gefährdet, 0,45 bis 0,63 = gefährdet; 0,64 bis 0,88 = hoch gefährdet.
- Für Sandstein:
0,18 bis 0,40 = wenig gefährdet, 0,41 bis 0,62 = gefährdet; 0,63 bis 0,79 = hoch gefährdet.

Wie weiter oben ausgeführt, werden im System Risikozyffer 104 Parameter verwendet. Die Frage ist, wie viele dieser Parameter in die Berechnung einfließen müssen, damit die berechnete Risikozyffer eine verlässliche Aussage zulässt. Eine Antwort auf diese Frage im Sinne einer genau festgelegten Zahl kann nicht gegeben werden, weil nicht an allen Figuren immer die gleiche Anzahl von Untersuchungen möglich sind. Es wird deshalb verlangt, dass alle zugänglichen Messwerte hinsichtlich Umwelt, Materialeigenschaften und Schadenserfassung erzeugt, umgeformt und eingetragen werden. Eine Risikozyffer bei Marmorskulpturen, die nicht auch Ultraschallmessungen einschließt, ist zum Beispiel ohne Aussagekraft.

Eine andere Frage ist, welche Unterschiede in der Gesamt-Risikozyffer auf einen signifikanten Unterschied verweisen. Um dies zu beantworten muss man sich überlegen, dass in die Mittelwertbildung bei der Berechnung von $R(\text{ges})$ die Zahl 7 als Divisor eingeht. Eine Differenz von $R(\text{ges}) = 0,1$ macht entweder in einem Datenblatt einen höheren Wert von 0,7 aus oder sie rührt aus kleineren Differenzen bei mehreren Parametern her. Das bedeutet, dass schon kleine Unterschiede von 0,01 auf gravierende Mängel bei einem oder mehreren Parametern hinweisen können. Was die jeweilige Ursache ist, muss durch genaue Betrachtung der Einzeldaten herausgefunden werden.

Der Forschungsbericht zu dem DBU-Projekt AZ 33 162/45 ist in der Reihe Forschungen des Instituts für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte Nr. 12 (2018) erschienen. Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wird für die großzügige Förderung sehr gedankt.

Leitfaden Steinkonservierung

1 Erste Sitzung der Projektleitung ***

Inhalt

1.1	Zusammensetzung und Aufgaben der Projektleitung	***	83
1.1.1	Einführung		83
1.1.2	Aufgaben der Projektleitung		83
1.1.3	Mitglieder der Projektleitung		84
1.1.3.1	Vorsitzender	***	84
1.1.3.2	Ständige Mitglieder	***	85
1.1.3.3	Wechselnde Mitglieder	**	85
1.1.3.4	Koordinator	***	86
1.1.3.5	Fachbeirat	***	86
1.1.4	Konkrete Vorschläge an die Projektleitung		86
1.1.4.1	Vorbereitung und Ablauf der Sitzungen		87
1.1.4.2	Ablauf des Vorhabens	***	87
1.1.5	Projektverfolgung	**	88
1.1.5.1	Netz-, Balken- und Geschwindigkeitsplan	**	88
1.1.5.2	Überwachung mit Hilfe des Geldflusses	***	91
1.1.5.3	Sicherstellen der Finanzierung	**	91
1.1.6	Dokumentation	*	91
1.2	Inhalt und Ergebnisse der ersten Sitzung	***	91
1.2.1	Allgemeine Zielvorgaben		91
1.2.2	Kriterien der Denkmalpflege	***	92
1.2.3	Praktische Beschlüsse: Koordinator, Projektant	***	92
1.2.4	Projektierung als gesonderter Auftrag	***	93
1.2.5	Erste Aufträge und Termine	***	94

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

1 Erste Sitzung der Projektleitung

1.1 Zusammensetzung und Aufgaben der Projektleitung

1.1.1 Einführung

Jede Maßnahme zur Steinkonservierung stellt ein sehr komplexes Aufgabengebiet dar, in dem zahlreiche Fachdisziplinen und Personen koordiniert werden müssen, damit die einzelnen Arbeiten sinnvoll ineinander greifen und in der richtigen Reihenfolge durchgeführt werden können. Sie benötigt aus diesem Grund eine leistungsfähige Projektleitung. Bevor nun die fachlichen Aufgaben der Steinkonservierung behandelt werden, soll zum Anfang das nicht minder wichtige Thema »Projektleitung« besprochen werden, deren reibungsloses Funktionieren für den Erfolg jeder Maßnahme ebenso entscheidend ist wie die gründliche Untersuchung und die Durchführung der Arbeiten selbst.

Aus der zahlreichen Literatur zu diesem Thema sei an dieser Stelle auf WEEBER (1994) hingewiesen.

1.1.2 Aufgaben der Projektleitung

Die Projektleitung soll den Ablauf eines Vorhabens lenken und überwachen. Ihre Aufgaben bestehen darin, die zu vergebenden Aufträge genau zu definieren, sich im Verlauf der Durchführung für das Erreichen der vereinbarten Ziele einzusetzen und den Ablauf einem regelmäßigen Soll-Ist-Vergleich zu unterziehen.

Häufig erreicht aus nicht immer nachvollziehbaren Gründen die Zahl der beteiligten Personen ein solches Ausmaß, dass ein konstruktives Arbeiten kaum mehr möglich ist. Viel wichtiger als die bloße Zahl sind die Fachkompetenz der Mitglieder und deren unbedingter Wille, das Projekt erfolgreich zu führen. Diese eigentlich selbstverständliche Voraussetzung wird aber durchaus nicht immer angetroffen. Sehr häufig wird bewusst oder unbewusst übersehen, die Ziele des Vorhabens genau zu definieren, sodass in der Projektleitung unterschiedliche, zum Teil sich widersprechende Ziele verfolgt werden.

Die Projektleitung definiert die Aufgabenstellung. Aus ihr leiten sich die Planungsgrundlagen für die einzelnen Bauabschnitte, der Zeitplan, der Kostenplan und der Finanzierungsplan ab. Diese Vorgaben müssen zu Beginn eines Projektes vollständig vorhanden sein, damit ein koordinierter Beginn und eine Erfolgskontrolle möglich sind. Aus der Aufgabenverteilung erkennt man, dass dem Vorsitzenden und dem Koordinator für das Gelingen des Projekts eine überragende Bedeutung zukommt.

Beide sollten sich einem zügigen Fortschritt des Vorhabens verpflichtet fühlen. Um eine gedeihliche Zusammenarbeit zu gewährleisten, sollten gegebenenfalls auftretende unterschwellige Widerstände von der Projektleitung erkannt und deutlich angesprochen werden, um sie in offener Diskussion auszuräumen. Da spätere Korrekturen nur schlecht möglich sind, ist diese Aufgabe gerade für den Beginn eines Vorhabens außerordentlich ernst zu nehmen. Vorhaben, die mit dem Satz »Nun fangen wir erst einmal an« begonnen werden, werden keinen Erfolg haben, da Aufgaben und Ziele nicht verbindlich festgelegt sind.

Damit effektive Arbeit geleistet werden kann, ist eine möglichst kleine Projektleitung anzustreben, deren Mitglieder bereit sein müssen, ihre Interessen offen und mit Kompromissbereitschaft zu vertreten. Obwohl natürlich keine starren Regeln festgelegt werden können, hat sich eine Zahl von vier bis sieben Personen als günstig erwiesen. Größere Gruppen sind in der Regel viel zu schwerfällig. Die Mehrzahl der Teilnehmer nimmt dann ohne konstruktive Beiträge schweigend an den Sitzungen teil.

1.1.3 Mitglieder der Projektleitung

Eine Projektleitung besteht aus vier verschiedenen Arten von Mitgliedern mit jeweils unterschiedlichen Aufgaben:

- Vorsitzender
- ständige Mitglieder
- wechselnde Mitglieder
- Koordinator (z. B. Architekt).

Aufbau und Zusammensetzung der Projektleitung sind Bild 50 zu entnehmen.

1.1.3.1 Vorsitzender

Vorsitzender sollte der Eigentümer bzw. Bauherr des Objektes selbst sein oder eine von ihm beauftragte Person des Vertrauens. Dem Vorsitzenden obliegt die Gesamtleitung des Projekts; er zeichnet die zu vergebenden Aufträge. Als allgemeiner Hinweis könnte gelten, diejenige Person als Vorsitzenden zu bestimmen, die das größte Interesse daran hat, das Vorhaben zügig und erfolgreich voranzubringen. Der Koordinator und die ständigen Mitglieder unterstützen den Vorsitzenden bei Fachfragen, da nicht vorausgesetzt werden kann, dass er selbst Experte in Fragen der Steinrestaurierung ist.

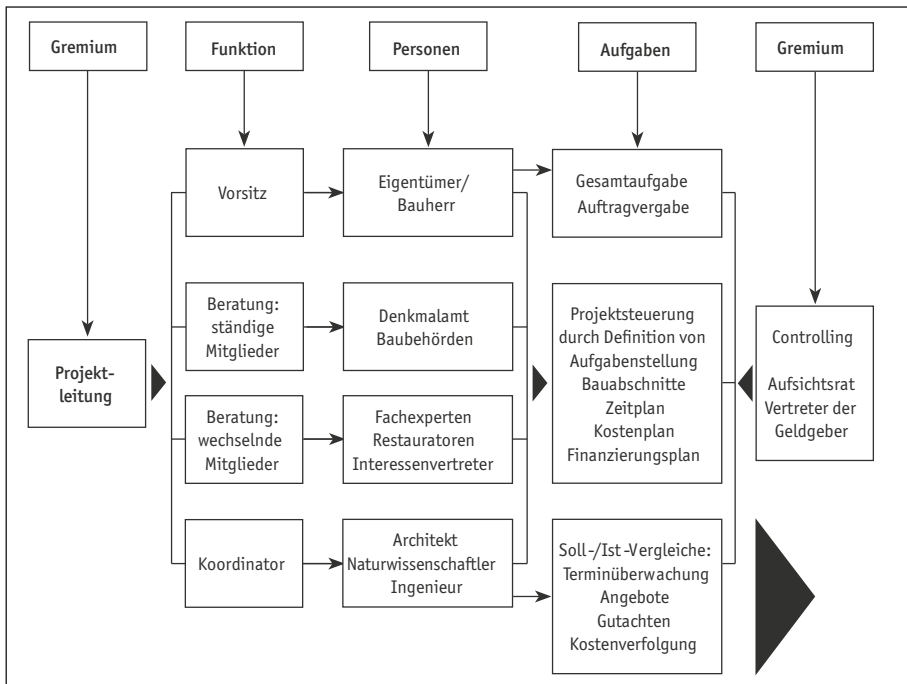


Bild 50: Zusammensetzung und Aufgaben der Projektleitung

1.1.3.2 Ständige Mitglieder

Zu diesem Personenkreis zählen z. B. die Vertreter der Fachbehörden wie Denkmalämter und Untere Denkmalschutzbehörden, die einen gesetzlichen Auftrag zu erfüllen haben. Da sie die fachlichen und finanziellen Interessen des Staates vertreten, darf bei ihnen ein Interesse an einer genauen Definition der Ziele und am zügigen Fortgang der Arbeiten vorausgesetzt werden.

1.1.3.3 Wechselnde Mitglieder

Diese Personengruppe setzt sich z. B. aus den Experten der verschiedenen Fachdisziplinen und den Restauratoren bzw. Steinmetzen zusammen. Sie nehmen nicht an allen Sitzungen teil. Sie vertreten den externen Sachverstand, d. h. sie sind zu bestimmten Spezialfragen zu hören, welche für die Aufgabenbeschreibung und die Ziele des Projektes maßgebend sind.

Die Sitzungen der engeren Projektleitung sind durch externe Experten zu erweitern, wenn fachliche Fragen besprochen werden müssen, die ansonsten nicht geklärt werden könnten. Dieser Personenkreis ist der Projektleitung »nachgeordnet« und besitzt beratende Funktion (vgl. Bild 50). Er soll im Verlauf eines Projekts die eingehenden Berichte auswerten und der Projektleitung beschlussfähige Entscheidungsgrund-

lagen vorlegen. Es ist keineswegs angebracht, den gesamten Kreis der externen Experten zu jeder Sitzung einzuladen. Es sollten immer nur diejenigen Personen präsent sein, deren Anwesenheit aufgrund ihres Fachwissens dringend benötigt wird. Da große Gesprächskreise äußerst träge sind, wird von größeren Gremien als 20 Personen strikt abgeraten.

1.1.3.4 Koordinator

Unter dem Koordinator ist der »Geschäftsführer« des Projekts zu verstehen. Die Aufgabe kann von einem Architekten, einem Gutachter aus dem Bereich der Natur- oder Ingenieurwissenschaften oder auch einem erfahrenen Restaurator wahrgenommen werden. Im Regelfall steht diese Person in einem Vertragsverhältnis zum Bauherrn. Bei ihm laufen die Fäden der Projektüberwachung zusammen. Zu seinen Aufgaben zählen die verschiedenen Soll-Ist-Vergleiche wie Terminüberwachung, Formulierung von Ausschreibungstexten, Einholung von Angeboten und Gutachten, Kostenverfolgung etc.

1.1.3.5 Fachbeirat

In manchen Fällen wird es angeraten sein, für das Controlling der Projektleitung einen Fachbeirat einzusetzen, welcher bei der Formulierung der Ziele berät und den Fortgang der Arbeiten kritisch begleitet. Aus fachlicher Sicht hat der Fachbeirat darüber zu wachen, dass der Stand des Wissens und der Technik berücksichtigt wird. Sollten Probleme auftreten, die von den Projektmitgliedern nicht gelöst werden können, hilft der Fachbeirat mit seinem externen Sachverstand. Aus finanzieller Sicht wird ein Fachbeirat besonders dann benötigt, wenn der Vorsitzende der Projektleitung nicht auch Bauherr oder Finanzierungsträger des Projekts ist. Dann könnte die Gefahr bestehen, dass der im Grunde nicht unmittelbar beteiligte Vorsitzende, der selbst keine eigenen fachlichen oder finanziellen Interessen zu vertreten hat, die Zügel zu sehr schleifen lässt. Im Fachbeirat sollten deshalb sowohl Vertreter der Geldgeberseite als auch externe Experten für Fachfragen vertreten sein.

1.1.4 Konkrete Vorschläge an die Projektleitung

Obwohl über Baumanagement, Projektleitung und Erfolgskontrolle schon sehr viel geschrieben worden ist, seien hier trotzdem einige wichtige Punkte genannt, an denen die Projektleitung die Qualität ihrer eigenen Arbeit überprüfen könnte:

1.1.4.1 Vorbereitung und Ablauf der Sitzungen

- Werden die Einladungen mit Unterlagen mindestens drei Wochen vor der Sitzung versendet?
- Gibt es eine Tagesordnung? Wird sie im Verlauf der Sitzung eingehalten?
- Gibt es zu Beginn einen Beschlussbericht?
- Sind die Tagesordnungspunkte mit Beschlussvorlagen vorbereitet?
- Wird das Protokoll spätestens vier Wochen nach der Sitzung verschickt?
- Sind die Termine mindestens ein Jahr im Voraus festgelegt?
- Beträgt die Dauer der Sitzungen maximal sechs Stunden oder länger?
- Ist ein geeigneter Verteiler festgelegt?

Der Verteiler sollte nur diejenigen Personen umfassen, die wirklich mit dem Objekt befasst sind. Sozusagen »zur Sicherheit« sollten keine Mitteilungen verschickt werden, die allein dem Zweck dienen sollen, nur am Rand involvierte Personen nicht zu kränken.

1.1.4.2 Ablauf des Vorhabens

Um zu jedem Zeitpunkt den Ablauf des Vorhabens überblicken zu können, sollten die in den folgenden Fragen aufgeworfenen Sachverhalte geklärt werden:

Wie werden die erbrachten Leistungen überwacht?

- Wird die termingerechte Lieferung von Leistungen eingehalten? Bestehen Regulationsmechanismen, diese Leistungen einzufordern?
- Wurden Aufgabenstellungen, Ziele und das Arbeitsprogramm mehrfach geändert?
- Erfolgt diese Änderungen stets aufgrund von Beschlüssen der Projektleitung?
- Wurden die Maßnahmen mit den zu Beginn des Projektes vorgeschlagenen Methoden ausgeführt?
- Erfolgte die Konzeptänderung durch Beschluss der Projektleitung?
- Wurden die neuen Methoden auf die gleiche Weise einer Prüfung unterzogen, wie die zuerst geplanten?
- Gibt es hierzu Beschlüsse der Projektleitung?
- Gibt es zu allen Punkten des Untersuchungsprogramms Abschlussberichte?

Aus dieser kurzen Aufzählung geht hervor, dass es sich bei den zu prüfenden Punkten eigentlich um Selbstverständlichkeiten handelt, die aber bei Weitem nicht immer eingehalten werden. Die Bereitschaft, Rechenschaft über die geleistete Arbeit zu geben, ist mitunter sehr gering ausgeprägt. Da ein Gesamtvorhaben immer nur so gut sein kann wie die Arbeit der Projektleitung, sollten die genannten Kriterien sehr ernst genommen werden.

1.1.5 Projektverfolgung

Die Mittel der Projektverfolgung, die hier empfohlen werden können, sind nicht neu; sie sind aber dennoch sehr wirkungsvoll, wenn sie mit Konsequenz angewendet werden.

- Netzplan
- Balkenplan (Aktivitäten-Zeit-Diagramm)
- Geschwindigkeitsplan (Volumen-Zeit-Diagramm).

1.1.5.1 Netz-, Balken- und Geschwindigkeitsplan

Aus einem Netzplan lässt sich die zeitliche Abfolge der einzelnen Schritte einer Maßnahme erkennen. Aus dem Balkenplan sind die Abfolge und die Dauer der Einzelmaßnahmen einfach abzulesen. Mit Hilfe eines Balkenplanes kann auch ein zeitlicher Soll-Ist-Vergleich angestellt werden. Bei komplexeren Vorhaben sollte man versuchen, einen Geschwindigkeitsplan aufzustellen (siehe Bild 51). Der Vorteil dieser Art von Plänen besteht darin, dass man aus der Entwicklung der einzelnen Abschnitte sehr gut sehen kann, ob es zu terminlichen Kollisionen kommen wird. Allerdings ist es bei restauratorischen Aufgaben nicht ganz einfach, Geschwindigkeitspläne aufzustellen, da die einzelnen Arbeitsschritte nicht als Flächen- oder Volumengrößen dargestellt werden können. Trotzdem sollte es aber möglich sein, bei einiger Erfahrung auch für Instandsetzungsmaßnahmen von Natursteinbauwerken Geschwindigkeitspläne aufzustellen.

Wird bei einem komplexeren Vorhaben kein Geschwindigkeitsplan aufgestellt, so ist in jedem Fall unerlässlich, sich die zeitliche Abfolge der Maßnahmen bis ins kleinste Detail mit Hilfe eines Balkenplans zu überlegen. Sehr häufig werden nämlich nicht mehr gutzumachende Fehler begangen, indem zeitlich nachrangige Arbeiten vorgezogen werden, die dann vollendete Tatsachen schaffen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen Balken- oder Geschwindigkeitsplan mit dem Kostenplan zu hinterlegen, wodurch man ein zusätzliches, übersichtliches Kontrollinstrument in der Hand hat (siehe Bild 51).

Im Gegensatz zu früher verlangen Fördermittelgeber heute bereits bei der Beantragung detaillierte Planungen zum Zeitablauf und Mittelabruf. Sie sehen darin ein berechtigtes und wirkungsvolles Instrument der Steuerung und Kontrolle. Insbesondere bei der Europäischen Union müssen die Vorhaben in möglichst genauen Details geplant und nach »Deliverables« und »Milestones« gegliedert sein. Als Antragsteller sollte man sich immer bewusst sein, dass eine präzise Planung keine Schikane darstellt, sondern sowohl dem Geldgeber als auch dem Projektbetreiber größtmögliche Sicherheit vor peinlichen Fehlschlägen garantiert. Bild 52 zeigt ein Beispiel eines recht genau geplanten Untersuchungsprogramms, das in zahlreiche Einzelbausteine unterteilt ist.

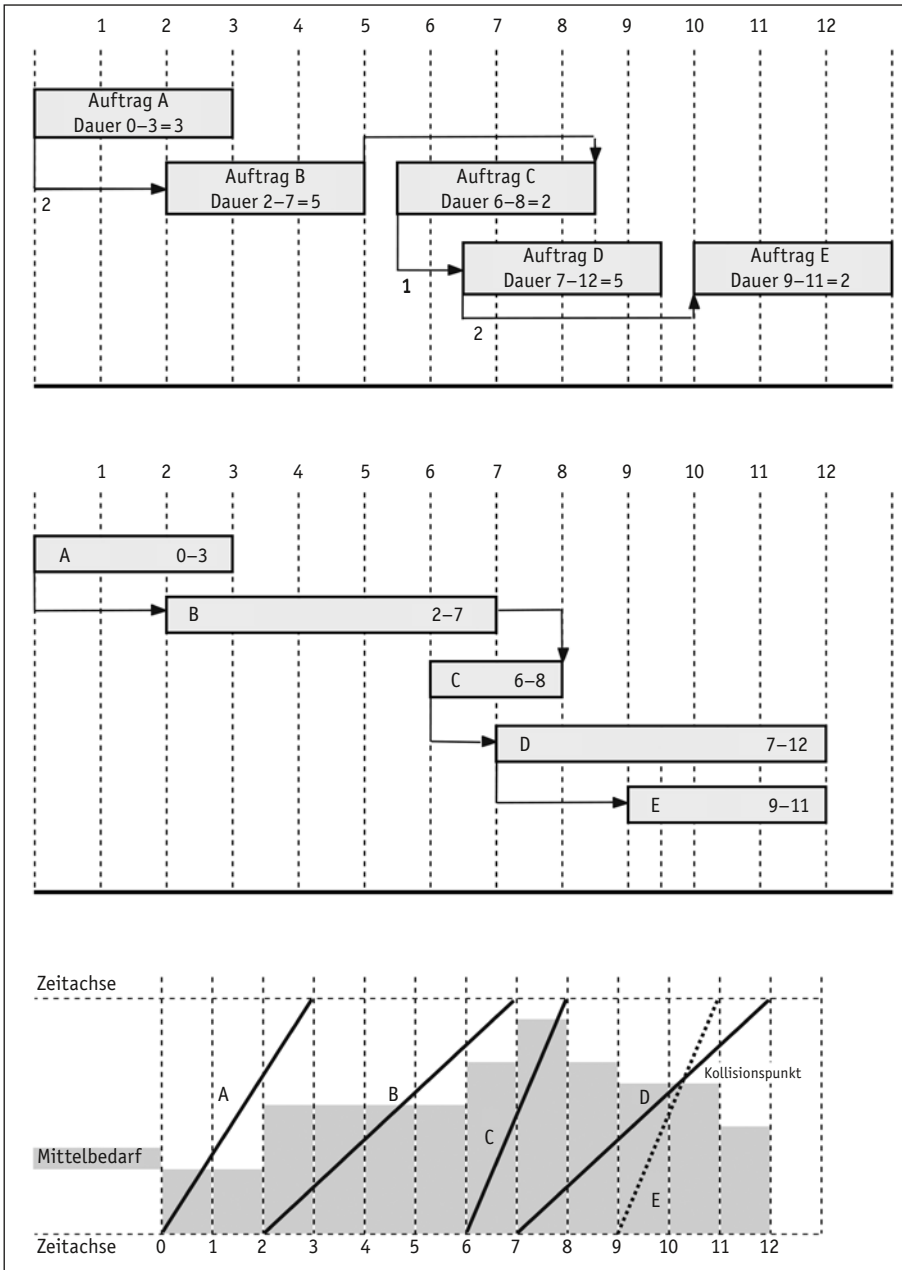


Bild 51: Beispiele für Netz-, Balken- und Geschwindigkeitsplan, hinterlegt mit Kostenplan [in Anlehnung an WEEBER (1994)]

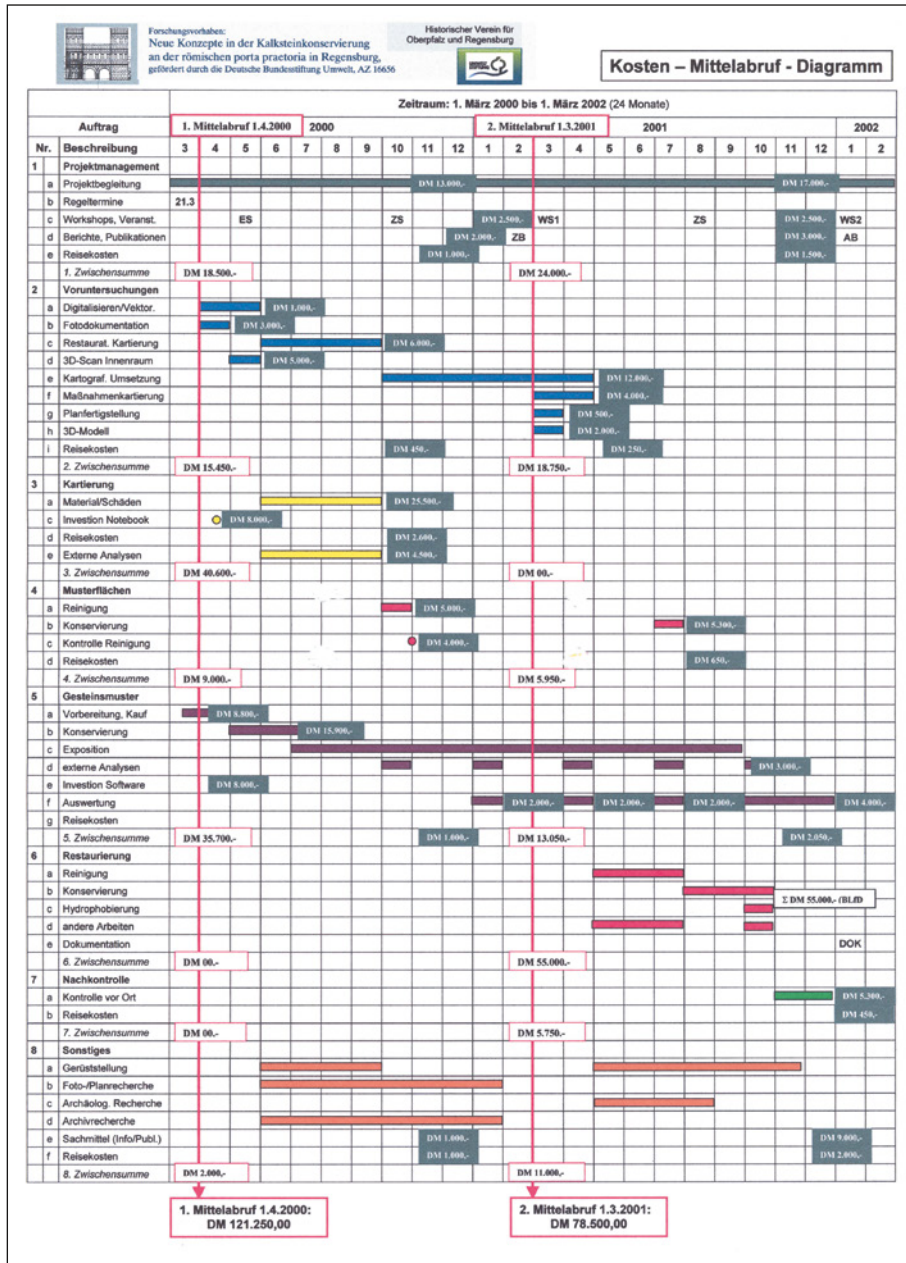


Bild 52: Beispiel für Planung eines Untersuchungsprogramms an der Porta Prätoria Regensburg [DREWELLO et al. (2002)]

1.1.5.2 Überwachung mit Hilfe des Geldflusses

Ein sehr nützliches Instrument zur Überwachung ist der Mittelabfluss. Es ist anzustreben, dass die Abweichungen vom Finanzierungsplan sich in einem Rahmen von 20 % bewegen. Treten größere Abweichungen auf, die auf zeitliche Verzögerungen zurückzuführen sind, so muss unter allen Umständen die Planung korrigiert werden.

1.1.5.3 Sicherstellen der Finanzierung

Qualitativ hochwertige Arbeit lässt sich natürlich nur erreichen, wenn eine langfristige und solide Finanzierung gesichert ist. Als Mindestforderung hat zu gelten, dass die Finanzierung für den Zeitraum gesichert sein muss, in dem ein vertretbarer Teilabschluss erreichbar ist. Zu häufig bleiben begonnene Projekte mitten in der Arbeit auf der Strecke liegen, mit der Folge, dass bei einer späteren Wiederaufnahme neu begonnen werden muss. Kontraproduktiv sind in aller Regel Aktivitäten, die begonnen werden, weil bewilligte Mittel noch vor Jahresende verbraucht werden müssen. Zum Glück wird diese Regulierung aber heute nicht mehr so strikt gehandhabt, sodass die Übertragung von Geldmitteln in das nächste Jahr problemlos auf Antrag genehmigt wird.

1.1.6 Dokumentation

Ein besonderes Augenmerk muss die Projektleitung auch auf die Vollendung der Dokumentation legen. Dies betrifft nicht nur den Gesamtabschluss, sondern auch die Teilabschlüsse aller Aufträge und Bauabschnitte. Dies zu überwachen liegt im besonderen Aufgabenbereich des Koordinators. Ein bewährtes Mittel, Arbeitsberichte einzufordern, besteht darin, die letzte Rate eines Auftrags erst dann auszuzahlen, wenn der Abschlussbericht vorliegt. Von Seiten des Bauherrn sollte ein Archiv eingerichtet werden, damit die Bauunterlagen dort zentral gelagert werden, wo sie später wieder zugänglich sind.

1.2 Inhalt und Ergebnisse der ersten Sitzung

1.2.1 Allgemeine Zielvorgaben

In der ersten Sitzung sollen die Restaurierungsziele ausführlich diskutiert und so weit wie möglich eingegrenzt werden. Sicher wird dies in vielen Fällen noch nicht befriedigend gelingen, da unter Umständen entscheidende Vorkenntnisse fehlen, die erst im Laufe der Untersuchungen zu Tage treten. Auf jeden Fall wird es aber möglich sein, den Weg festzulegen, auf dem man zu einer Definition der Ziele gelangen kann.

Aus diesem Grund dürfen die Mitglieder der Projektleitung nicht unvorbereitet zur ersten Sitzung erscheinen. Es müssen zumindest theoretische Zielvorstellungen existieren, die sich beispielsweise von folgenden grundsätzlichen Überlegungen herleiten lassen:

- Welche geschichtliche Bedeutung hat das Denkmal oder Gebäude?
- Wie ist das Denkmal oder Gebäude als Dokument in seiner Umgebung einzuordnen?
- Welche Bedeutung besitzt es für religiöse oder kulturelle Zwecke?
- Wie war die bisherige Nutzung?
- Wie soll die künftige Nutzung sein oder wie könnte sie aussehen?
- Ist eine statische Gefährdung gegeben?
- Ist die Öffentlichkeit durch herabstürzende Teile gefährdet?
- Wie ist der Zustand des Gesteins oder anderer Materialien augenscheinlich einzuschätzen?
- Liegen Mängel vor, die erkennbar auf mangelnden Unterhalt zurückzuführen sind, z. B. Schäden am Dach und an der Regenableitung etc.?

Über die verschiedenen Aspekte des Denkmalwerts hat RIEGL (1903) grundlegende und bis heute gültige Überlegungen angestellt. Siehe hierzu den Abschnitt »Risiko-ziffer« im Einführungskapitel.

1.2.2 Kriterien der Denkmalpflege

Aus der Beantwortung dieser Fragen lässt sich in vielen Fällen bereits eine Generallinie für die zu treffenden Maßnahmen entwickeln.

- Soll oder kann der Schwerpunkt der Maßnahmen auf der Seite der Konservierung – auf der Erhaltung des jetzigen Zustands – liegen?
- Sind Reparaturen und Ergänzungen in größerem Umfang erforderlich, um die Funktion zu gewährleisten, sodass der Schwerpunkt der Maßnahmen auf der Seite der Restaurierung liegen muss?

Es ist kaum möglich, diese Grundsatzfragen beim »Umgang« mit einem Denkmal in all ihren Facetten auch nur annähernd erschöpfend darzustellen, sodass an dieser Stelle nur wenige Hinweise genügen sollen. Zur Vorbereitung der ersten Sitzung der Projektleitung sei deshalb jedem die Lektüre von »Denkmalpflege heute« [PETZET (1993)] angeraten.

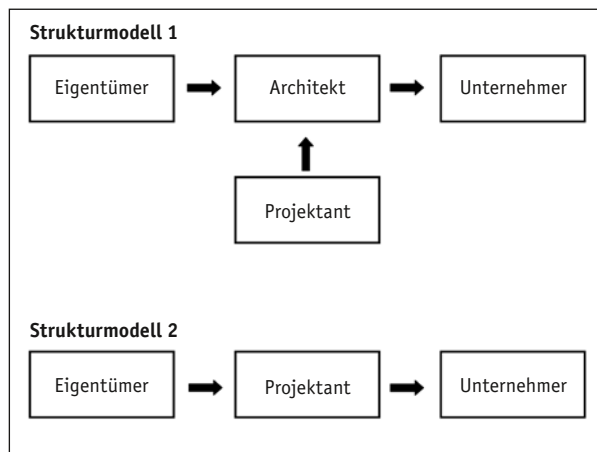
1.2.3 Praktische Beschlüsse: Koordinator, Projektant

In praktischer Hinsicht hat die Projektleitung auf ihrer ersten Sitzung die generelle Struktur zu beschließen, nach der das Projekt ablaufen soll. Dazu gehört auch eine Entscheidung darüber, wer mit der Aufgabe des Koordinators betraut werden soll.

Je nach Art und Umfang des Projekts könnte ein Architekt, ein Bauingenieur, Naturwissenschaftler oder Restaurator geeignet sein.

Bei umfangreichen Vorhaben wäre zu überlegen, den Koordinator durch einen Projektanten (Fachbauleitung) zu entlasten oder zu ersetzen, um die Sachkompetenz der Projektsteuerung zu erhöhen. Diese Aufgabe könnte von privatwirtschaftlichen physikalisch-chemischen Labors, Ingenieurbüros (zum Beispiel solchen, die aus dem SFB 315 hervorgegangen sind), den aus den Leitstellen hervorgegangenen Instituten in Sachsen, Sachsen-Anhalt oder Niedersachsen oder von Arbeitsgemeinschaften solcher Labors mit Restauratoren übernommen werden. Ein Projektant könnte z. B. einen oder mehrere Aufträge des Komplexes »Voruntersuchungen« übernehmen, Leistungsverzeichnisse ausarbeiten und später die ausführenden Firmen einweisen sowie den Bauablauf überwachen. Bild 53 zeigt zwei verschiedene Möglichkeiten der Projektstrukturierung.

Bild 53: Möglichkeiten der Projektstrukturierung unter Einbeziehung eines Projektanten (Fachbauleitung)



1.2.4 Projektierung als gesonderter Auftrag

Wird ein Projektant mit den Projektierungsaufgaben betraut, dann sollte sich die Projektleitung darüber im Klaren sein, dass damit ein Teil der Verantwortung zunächst in private Hände übergeben und gleichsam eine vorgezogene Entscheidungsebene eingefügt wird. Es muss deshalb ausgeschlossen werden, dass sich der Projektant später an der Ausschreibung für die Durchführung der Maßnahmen beteiligt, um den Wettbewerb nicht zu verzerren. Stattdessen muss er für seinen Aufwand angemessen finanziell entschädigt werden, d. h. die Projektierung des Vorhabens ist als ein gesonderter Auftrag abzuwickeln.

Eine gute Projektierung wird sich spätestens dann auszahlen, wenn damit erreicht wird, dass die anbietenden Firmen durch präzise Ausschreibungsunterlagen gezwungen sind, in allen Punkten nachprüfbar und vergleichbare Angebote abzuliefern.

Weiß doch jeder Baupraktiker ein Lied davon zu singen, dass unzureichende und nicht vergleichbare Angebote häufig zur Beauftragung ungeeigneter Firmen und später möglicherweise zu Nachforderungen führen. Dagegen sollten alle Möglichkeiten genützt werden, qualifizierten Angeboten eine reelle Markchance zu geben. Das preiswürdigste Angebot, nicht das billigste soll den Zuschlag erhalten. Gerade staatliche Bauträger haben in dieser Hinsicht eine vollkommen unbegründete Angst vor der Vergabeprüfung.

1.2.5 Erste Aufträge und Termine

Am Ende der ersten Sitzung der Projektleitung muss der Weg vorgezeichnet sein, wie und wann die ersten konkreten Schritte eingeleitet werden, damit das Projekt zunächst mit der Einholung von Angeboten und im weiteren Verlauf dann mit der Vergabe von Aufträgen beginnen kann. Da dieser Leitfaden jedoch keine Anleitung für die korrekte Durchführung von Ausschreibungen und Auftragsvergabe sein will und kann, sei hier nur an einschlägige Bestimmungen der VOB und DIN erinnert. Sie sind im Anhang umfangreich dargestellt. Erlaubt sei noch der Hinweis, dass die Verwendung des Leitfadens bei der Planung und Durchführung des Projekts zur Pflicht gemacht werden könnte. Auch die im Leitfaden aufgestellten Rahmenbedingungen für die Qualitätssicherung können in das Leistungsverzeichnis übernommen werden.

Im Folgenden werden nun anhand der Struktur dieses Leitfadens die einzelnen, zu einer Steinkonservierungsmaßnahme gehörenden Arbeitsschritte besprochen.

2 Objektidentifikation ***

Inhalt

2.1	Allgemeines		97
2.2	Pläne	***	97
2.3	Orientierungssystem	***	99
2.4	Projektarchiv	***	100

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

2 Objektidentifikation

2.1 Allgemeines

Die Objektidentifikation steht am Anfang des Projekts und stellt das Fundament dar, auf dem alle künftigen Arbeiten aufbauen. Der Koordinator selbst, ein beauftragter Architekt, Bauforscher oder Restaurator sollten den Auftrag ausführen. Der beauftragte Fachmann muss ausreichend Zeit haben, ausführliche Begehungen vornehmen zu können, um sich mit dem Objekt vertraut zu machen. Genaues Beobachten und konzentriertes Aufnehmen sollten im Mittelpunkt der ersten Objektbegehungen stehen. Es ist gar nicht erwünscht, gleich beim ersten Mal alles verstanden zu haben. Jedes Denkmal vermittelt so viele, nur ihm eigentümliche Aspekte, die sich nur durch Zeit und Geduld erschließen, und die alle verstanden sein wollen, damit später nicht ein persönliches Standardrezept, sondern die Eigenart des Denkmals selbst das Denken und Handeln bestimmt.

Die Beschreibung des Objekts soll als Einführung dienen und darauf ausgelegt sein, das Objekt zu gliedern, sodass daraus ein Gerüst für die Planung der nun beginnenden Arbeiten entwickelt werden kann. Die Objektdarstellung enthält z. B. die wichtigsten Maße, eine Beschreibung der Architektur des Gesamtobjekts sowie seiner Bauteile und Bauformen. Die kunsthistorische Würdigung und ein Abriss der Baugeschichte sind wichtige Bestandteile dieser Beschreibung, ohne dass hier der gründlichen archivarischen Erforschung bereits vorgegriffen werden soll. Im Regelfall werden solche Unterlagen zumindest in Teilen bereits vorliegen, sodass man auf frühere Publikationen zurückgreifen kann, die dann jedoch auf ihre Richtigkeit hin geprüft und im Bedarfsfall ergänzt werden müssen.

2.2 Pläne

Qualitativ hochwertige Pläne sind für die Planung und Dokumentation von Stein-konservierungsmaßnahmen eine unerlässliche Voraussetzung. In den Akten ist deshalb zunächst nachzuforschen, ob bereits Pläne vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall, ist dafür zu sorgen, dass steingerechte Fassadenpläne rechtzeitig fertig gestellt sind. Bereits in dieser Phase muss man darauf achten, dass das Planmaterial über die bloße Abbildung der Oberfläche hinausgeht und die Fassade auch in der Tiefe – also im Konstruktionsprinzip – erfasst wird. Dies wird am zweckmäßigsten mittels traditionellem Handaufmaß durch Ansichten, Schnitte und Detailskizzen erreicht.

Ist die Zugänglichkeit des Objekts eingeschränkt, oder ist nur ein kurzes Zeitfenster für das Messen vor Ort vorhanden, sind riesige Flächen zu bewältigen oder ist der Bau stark strukturiert und ornamentiert, sind berührungslose Aufnahmeverfahren wie Foto-Entzerrung, Photogrammetrie, Laserscan und andere Verfahren das probate

Mittel. Der 3-D-Laserscan ist mittlerweile aufgrund der starken Rechnerleistungen so weit entwickelt, dass ganze Gebäude, ja ganze Stadtteile dreidimensional erfasst und als Modell dargestellt werden können. Welche Methode zum Einsatz kommen soll, ist sorgfältig unter den Gesichtspunkten der Aussagekraft und der Kosten-Nutzen-Analyse abzuwägen. Fotografische Verfahren kommen bei Bogenkonstruktionen oder starken Vor- und Rücksprüngen schnell an die Grenzen der maßstäblichen Darstellung. Dies kann ein 3-D-Laserscan zwar leisten, allerdings wird auch hier die Oberfläche nur abgebildet und nicht hinsichtlich Fugen und Konstruktion interpretiert. Bei all diesen Methoden sind deshalb zusätzliche Schritte sinnvoll und notwendig. Dazu gehören die Elemente des klassischen Aufmaßes wie die Maßkontrolle, die Verifikation der Oberfläche hinsichtlich des Fugenbildes und der Oberflächenbearbeitung sowie vor allem die Darstellung des Bau-Innenlebens in Form von Schnittzeichnungen. Die Schnittzeichnung sollte bei keiner Bauaufnahme fehlen (siehe auch 6.2.2.4). Denn sie kombiniert die Erkenntnisse der verschiedenen Messmethoden, der Befunde vor Ort und der bauhistorischen Archivunterlagen in einem einzigen Dokument. Das kann so keine andere Planunterlage leisten!

Müssen Fassadenpläne neu erstellt werden, ist ein ausreichend bemessener zeitlicher Vorlauf zu berücksichtigen, der mit ungefähr einem Jahr, bei großen Objekten durchaus auch länger, anzusetzen ist. Die Photogrammetrie, basierend auf Stereo-Fotopaaren ist in den letzten Jahren von den digital arbeitenden Systemen weitgehend verdrängt worden. Mit modernen, auf CAD-basierenden digitalen Bildverarbeitungssystemen können im Vergleich zur »klassischen« Photogrammetrie beträchtliche zeitliche und finanzielle Einsparungen ohne qualitative Einbußen erzielt werden. Digitale Bildverarbeitung bietet zudem den Vorteil, Kartierungen verschiedenster Art direkt auf den digitalen Planvorlagen erstellen und zur besseren Interpretation der Resultate verschiedene Layer übereinander projizieren zu können. Software für Planerstellung und Kartierung ist in verschiedenen Versionen im Handel erhältlich, wobei manche direkt an die Grundversion von CAD gebunden sind, andere jedoch unabhängig davon arbeiten. Auch 3-D-Laserscans können in zweidimensionale Pläne umgesetzt werden, welche als Orthobilder den Vorteil haben, alle Details verformungsgerecht wiederzugeben (siehe hierzu auch Arbeitsschritt 6.2 »Bauforschung«). Bild 54 zeigt ein Orthofoto eines Fassadenabschnitts aus dem Zwinger in Dresden mit der Kartierung des Gesteinsbestandes und der geplanten Maßnahmen. Es basiert auf einem kompletten 3-D-Modell des Zwingers, das für die Planung umfassender Restaurierungen in den letzten Jahren angefertigt wurde. Handelt es sich bei dem zu untersuchenden Objekt um ein Einzeldenkmal, so gilt für die Bereitstellung von Planunterlagen sinngemäß das Gleiche wie für Fassadenpläne.

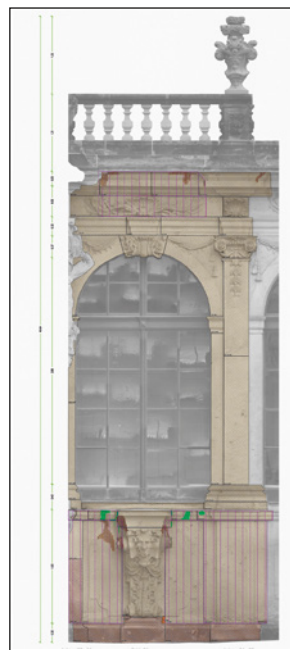


Bild 54: Orthofoto eines Fassadenabschnitts aus dem Dresdner Zwinger mit Kartierung des Gesteinsbestandes und der geplanten Maßnahmen
(Quelle: comceptm Dipl.-Ing. Michael Hauck)

Es soll nicht verschwiegen werden, dass die modernen digitalen Aufnahme- und Reproduktionsverfahren manche Gefahren bergen. Sie sehen oft »wissenschaftlicher« aus als sie in Wirklichkeit sind. Ein Architekturplan ist immer nur so gut wie sein Bearbeiter! Dieser muss die Architektur verstehen, um Fugen und Bauteile in Linien umsetzen zu können. Reine Fotopläne erfüllen eine solche Forderung oftmals nicht. Ein Restaurator oder Naturwissenschaftler wird den Plänen normalerweise glauben und sie nicht hinterfragen. Deshalb ist es sinnvoll, gerade bei komplexen Bauten einen versierten Architekten oder Bauforscher einzubinden, der die Planunterlagen überprüft und gegebenenfalls im Sinne des oben beschriebenen Handaufmaßes ergänzt. Aus diesem Grund verweisen verantwortungsvolle Wissenschaftler, die mit den modernen digitalen Methoden arbeiten, auch immer wieder darauf, dass bei aller Technik immer noch die direkte Begutachtung am Objekt unerlässlich ist. Zur Vermessungstechnik und den verschiedenen Aufnahmeverfahren gibt es zahlreiche Literatur, vgl. u. a. WEFERLING et al. (2001, 2007); BRUSCHKE (2005).

2.3 Orientierungssystem

Eines der wichtigsten Ziele dieses Auftrages ist die Erstellung eines Orientierungssystems für das gesamte Objekt. In diesem Orientierungssystem müssen alle Bauteile, später in der detaillierten Ausarbeitung auch alle Werksteine, eindeutig und widerspruchsfrei bezeichnet sein. Alte, bereits bestehende Orientierungssysteme sind zu prüfen und, wenn möglich, anzupassen. Als Vorbild eines Orientierungs-

systems können z. B. die von den Dombauhütten verwendeten Systeme dienen. Hier werden im Regelfall die Joche und Strebepfeiler umlaufend nummeriert. An jedem Strebepfeiler bzw. Joch erhalten dann die Quader des Mauerwerks von unten beginnend nach Steinlage und Position in der Reihe eine fortlaufende Nummer bis unter das Gesims. Auf diese Weise ist jeder Stein am Mauerwerk genau festgelegt und kann mit seinen Maßen erfasst werden. Allerdings gerät diese Methode an ihre Grenzen, wenn die Steinlagen nicht durchlaufend sind, sondern aufgrund technischer oder planerischer Ursachen verspringen.

Grundsätzlich bestehen natürlich mehrere Möglichkeiten, ein Orientierungssystem aufzubauen, sodass es vor allem auf dessen Übersichtlichkeit und Verständlichkeit ankommt. Die Wahl sollte deshalb immer auf eine Struktur fallen, in die man sich leicht einfinden und in der man sich später einfach und komfortabel »bewegen« kann. Man sollte deshalb eher ein anschauliches System bevorzugen, in welchem durchaus noch historische oder allgemein übliche Bezeichnungen enthalten sind. Wenig zweckmäßig erscheinen deshalb solche Orientierungssysteme, die nur auf abstrakten Koordinaten aufbauen, da man sich in ihnen nur durch regelrechtes Lernen zurechtfinden kann.

Bei Fassaden hat sich in der Praxis folgendes System am besten bewährt. Man orientiert sich strikt an den Gerüstlagen. Ebenerdig ist die Lage 0. Es folgt die Nummerierung beginnend mit Gerüstlage (GL) 1, 2, 3 usw. von unten nach oben. Die Fassaden-seiten werden nach den Himmelsrichtungen bezeichnet. Innerhalb der Gerüstlagen gibt es Positionsnummern: also Nord GL 7 Pos 12 oder kurz N/7/12. Die wichtigsten Bauteile erhalten in einem eigenen Übersichtsplan ihre fachspezifischen oder bauhistorischen Bezeichnungen (Nomenklatur). Das System sollte von der Befunderstellung und Schadenskartierung über die Ausführung bis hin zur Dokumentation beibehalten werden – vorausgesetzt, das Gerüst steht rechtzeitig, was prinzipiell immer die Grundvoraussetzung ist.

Ausführliche Erläuterungen zu den Fragen eines Orientierungssystems finden sich bei SCHMIDT (1993, 1994).

2.4 Projektarchiv

Als sehr fortschrittlich und praxistauglich hat sich in den letzten Jahren das »Digitale Dombauarchiv«, bzw. dessen Fortsetzung, das »MonArch«-Archivsystem, herausgestellt [FREITAG et al. (2005); FREITAG & SCHLIEDER (2009); DREWELLO et al. (2010)]. Diese Archivsysteme wurden bereits in der 2. Auflage als »in Bearbeitung« angekündigt. Mittlerweile sind sie bis zur Anwendungsreife gelangt und können in Gebrauch genommen werden. Ob und in welchem Umfang ein gesondertes Projektarchiv geführt werden soll, entscheidet sich sicher am Einzelfall. Es ist aber ratsam, schon bei kleineren Projekten auf die Hilfe dieser Systeme zurückzugreifen, insbesondere dann, wenn mehrere Gewerke und Bauabschnitte beteiligt sind. Man sollte bedenken,

dass ein gut angelegtes Archiv nicht nur für die Gegenwart, sondern vor allem für die Zukunft ausgerichtet ist und bei künftigen Projekten eine unschätzbar große Hilfe sein wird.

Das »Digitale Dombauarchiv« und »MonArch« bauen sehr anschaulich auf Grundriss- und Fassadenplänen auf, sodass man sich sofort problemlos orientieren kann. Zu jedem Fassadenelement oder Steinquader sind in einer verknüpften Datenbank alle im Archiv verfügbaren Informationen, schriftlichen Dokumente, Zustandsfotos u. s. w. abrufbar. Neue Erkenntnisse können problemlos eingetragen werden. Die Bearbeitungsmaske hat das in Bild 55 gezeigte Aussehen.

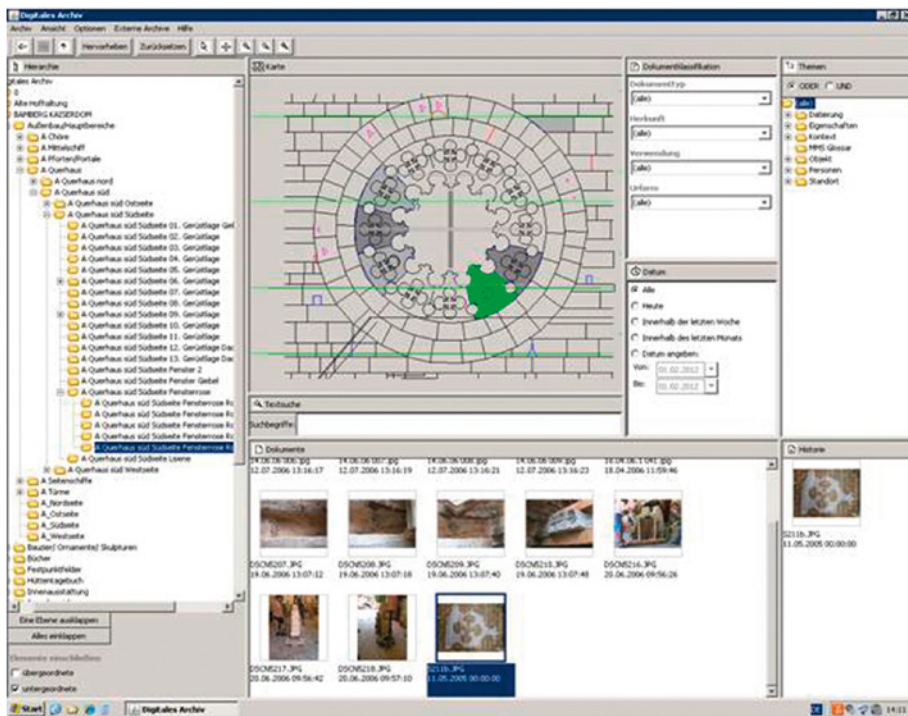


Bild 55: Die Bearbeitungsmaske des »MonArch«-Archivsystems (mit freundlicher Genehmigung Dombauhütte Bamberg)

»MonArch« benötigt natürlich wie jedes andere Archiv eine präzise Ordnungsstruktur, damit Schriftstücke (Protokolle, Aufträge, Rechnungen, etc.), Pläne, Fotos, Proben etc. widerspruchsfrei eingetragen werden können. Bereits aus der »Archivnummer« sollte ablesbar sein, zu welchem Objektteil das betreffende Dokument gehört und in welcher zeitlichen Abfolge es zu anderen Dokumenten steht.

Natürlich macht es einen Unterschied, ob man bei der Anlage eines Projektarchivs auf ein schon bestehendes Archiv zurückgreifen kann oder ob ein solches neu angelegt

werden muss. Ein neu anzulegendes Projektarchiv sollte deshalb für mindestens folgende Sparten angelegt werden:

- Dokumente zur Baugeschichte
- Literatur
- Planarchiv
- Fotoarchiv
- Probenarchiv
- aktueller Schriftverkehr.

Ein Projektarchiv erfüllt aber nur dann seinen Zweck, wenn es als zentrale Sammelstelle dient und tatsächlich alle Vorgänge, d. h. den gesamten Schriftverkehr, alle Pläne, Fotos, die komplette Probenliste und das vollständige Literaturverzeichnis enthält und sich an einem Ort befindet, der für alle Beteiligten leicht erreichbar ist. Zumindest für den Zeitraum des Projekts wäre deshalb im Normalfall das Objekt selbst der bestgeeignete Platz, in dem das Archiv unterbracht werden könnte. Nach Beendigung der Maßnahmen wäre dann dafür zu sorgen, dass der Bestand nicht auseinander gerissen wird, sondern als Einheit in einem größeren Archiv abgelegt wird.

Für das Probenarchiv sollte dringend eine fortlaufende Nummerierung eingeführt werden, damit allzu umfangreichen Wünschen nach erneuter Probenahme mit dem begründeten Argument entgegen getreten werden kann, es seien bereits hinreichend viele Proben mit gleicher Fragestellung entnommen worden. Das Probenarchiv sollte auch regelmäßig dahingehend überprüft werden, ob die versprochenen Berichte auch geliefert wurden. Ausstehende Berichte sind nachdrücklich einzufordern.

3 Archivarbeiten ***

Inhalt

3.1	Allgemeines	105
3.2	Quellen	106
3.3	Beispiele	108
3.4	Zusammenfassung	112

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

3 Archivarbeiten

3.1 Allgemeines

Archivarbeiten und Literaturstudien sind die notwendige Voraussetzung dafür, ein Objekt in seinem historischen Kontext zu begreifen und davon ausgehend die Restaurierungsziele so festzulegen, dass das Objekt als gewachsenes historisches Dokument auch für künftige Generationen erhalten bleibt. Die kunsthistorische Würdigung ist aus diesem Grund ein unverzichtbarer Bestandteil der vorbereitenden Maßnahmen. Sie muss den besonderen Wert des Denkmals im Kontext der künstlerischen und architektonischen Stilrichtungen herausarbeiten und auf seine Funktion als Teil eines Ensembles verweisen. In diesem Zusammenhang sei erneut auf die Wertskala von RIEGL (1903) hingewiesen.

Gute Archiv- und Literaturrecherchen sind langwierig und teuer. Aus Zeit- und Kostengründen verzichten private Auftraggeber und öffentliche Ämter deshalb gerne darauf. Sie gelten mitunter als weniger wichtig; ihre Bedeutung bei der Ableitung des Restaurierungsziels wird oft nicht gebührend anerkannt. Nicht selten werden zwar die Kosten für naturwissenschaftliche Untersuchungen, um die es in diesem Buch hauptsächlich geht, mehr oder minder bereitwillig übernommen, während man die Archivarbeiten eher als literarische Garnierung ansieht und daher stiefmütterlich behandelt. Ohne historische Erkenntnisse kann und darf aber kein Denkmal saniert werden. Sie liefern zahlreiche Informationen, die man am Monument selbst so nicht ablesen kann:

- Historische Grundlagen
- Kunsthistorische Würdigung und Einordnung
- Baugeschichte, Umbauten und frühere Restaurierungen
- Nutzungsgeschichte
- Pläne und Konstruktionen
- Früheres Aussehen auf Fotos und Gemälden
- Bautechnik, Materialien und deren Herkunft
- Alterungsverhalten des Denkmals, Schadensanhäufungen u. v. a. m.

Archivforschung ist die zerstörungsfreiste aller Untersuchungsmethoden. Bevor man am Bauwerk aufwändige und irreversible Erprobungen vornimmt, sollte der Fundus der Geschichte ausgeschöpft werden. Studien in Archiven und Bibliotheken erfordern viel Fachkompetenz. Man legt sie deshalb am besten in die Hände von versierten Kunst- oder Bauhistorikern, deren Einsatz sich, wie die Erfahrung lehrt, bezahlt macht. Von vornherein sollten deren Ergebnisse gezielt mit den Fragen und Befunden am Bau abgeglichen und die Recherchen ggf. erweitert werden.

3.2 Quellen

Der erste Schritt besteht in einer Sichtung der Literatur. Inzwischen findet sich vieles im Internet, für eine grundlegende Auswertung ist der Besuch der großen Fachbibliotheken nach wie vor unabdingbar. Im engen Austausch mit Architekt und Restaurator sollten die Archivstudien bedarfsgerecht eingengt oder ausgeweitet werden, um die gewünschten Archivalien aufzufinden. Nicht unterschätzen darf man den Wert alter Lexika, Fach- und Handbücher, die wertvolle Informationen zu Materialien und Bautechnik der entsprechenden Zeiten liefern können.

Die Recherche in den Archiven ist meist mühsam, da die Inventarisierungen vielerorts nicht abgeschlossen oder im Aufbau befindlich und somit nicht im Netz zugänglich sind. Neben den bekannten Stadt- und Landesarchiven sind u. a. die Archive der Bauämter, der Denkmalämter und der Kirchen besonders ergiebig. Im günstigsten Fall finden sich Unterlagen zu früheren Maßnahmen, wobei vor allem Ausschreibungen, Leistungsverzeichnisse und Abrechnungen viele Informationen liefern. Erst in jüngerer Zeit wurden und werden die Restaurierungen systematisch dokumentiert.

Bei Restaurierungsfragen sind alte Fotos, Gemälde und Zeichnungen von unschätzbarem Wert, besonders wenn man zeitliche Abfolgen verfügen kann, um beispielsweise den Verfall zu demonstrieren (vgl. hier Kap. 6.2.1). Ein Problem bereitet mitunter die Datierung und man darf den Fotos und Gemälden nicht immer trauen; hier ist die Einschätzung des kritischen Kunsthistorikers vonnöten. Die Fotos finden sich in Büchern, in den genannten Archiven und in den bekannten Fotodatenbanken wie z. B. im »Deutsches Dokumentationsarchiv Kunstgeschichte – Bildarchiv Foto Marburg«. Im Internet gibt es zahlreiche weitere und neuere Foto-Archive, deren systematische Durchforstung oft bisher unbekannte Aufnahmen liefert.

Von großem Wert sind die Informationen von Zeitzeugen, die man systematisch befragen sollte. Das können Heimatpfleger, Hausmeister oder Mesner sein, Handwerker oder Architekten, Mitarbeiter der Baubehörden oder Nachbarn und Anrainer. Manchmal fördern sie ungeahnte Schätze zu Tage, z. B. in Familien- und Fotoalben.

Konkret müssen die Archiv- und Literaturstudien die Baugeschichte, insbesondere einzelne Planungs- und Bauphasen erhellen, um beispielsweise konstruktive Besonderheiten, Materialwechsel oder sogar Schadensanhäufungen zu verstehen. Ebenso wichtig ist es, unterschiedliche Nutzungen im Verlauf der Geschichte herauszufinden. Auch aus diesen Informationen lassen sich wertvolle Hinweise auf bestimmte Schadensursachen ableiten. Andersherum lassen sich natürlich aus Materialwechseln oder anderen Befunden Änderungen in der Planung und im Bauablauf ablesen.

Archivalien müssen auch daraufhin untersucht werden, ob sich Hinweise auf die Herkunft der Gesteine finden lassen. Eine nützliche Quelle hierfür können Rechnungsbücher sein. So können unter Umständen aus den Aufzeichnungen nicht nur über die Lieferungen der Gesteine, sondern auch über Pigmente oder Anstrichmaterialien Auskünfte erhalten werden. Bei der Deutung von Gesteinsbezeichnungen

in alten Quellen ist aber Vorsicht geboten, denn oftmals wird der Verlade- oder Verschiffungsort als Herkunftsort genannt und nicht der Steinbruch. Archivalische Studien liefern nicht nur Informationen über die materielle Seite eines Denkmals; sie machen uns auch mit den sozialen Umständen zur Entstehung des Denkmals bekannt.

Besonders wichtig sind Archivstudien im Hinblick auf frühere Restaurierungen. Auch hier können Rechnungsbücher Aufschlüsse über die möglicherweise verwendeten Materialien geben. Sind alte Restaurierungsberichte vorhanden, lassen sich vielleicht auffällige Schadensanhäufungen oder besondere Schadensformen erklären. In diesem Zusammenhang erscheint der Hinweis wichtig, dass in der zweiten Hälfte des 19. Jh. und im Verlauf des 20. Jh. an nahezu jedem Denkmal Restaurierungen vorgenommen wurden. Da seit dem letzten Jahrhundert fast immer auch Chemikalien eingesetzt wurden, sind Informationen über diese Stoffe oft eine hilfreiche Erklärung für manche, zunächst unerklärliche Schäden. Auch ist der Frage nachzugehen, ob die damals eingebrachten Materialien unter Umständen negative Auswirkungen auf die jetzt geplanten Maßnahmen haben können. Mitunter haben frühere Konservierungsmittel zu einer Verdichtung des oberflächennahen Porenraums geführt, so dass die Applikation von neuen Konservierungsmitteln auf erhebliche Probleme stoßen kann.

Neben den Recherchen zu länger zurückliegenden Maßnahmen sind zunehmend auch die Dokumentationen erst vor 10 bis 20 Jahren durchgeführter Restaurierungen von Interesse. Gerade Baubehörden sind in dieser Hinsicht häufig sehr schlecht ausgestattet, weil sie ihre Akten nach kurzer Zeit schon in die Zentralarchive abgeben, wo sie nur mit ziemlichem Aufwand wieder gehoben werden können. Für die Recherche nach jüngeren Restaurierungsberichten gibt es in Deutschland zwei sehr gute Institute, bei denen man fündig werden kann:

Das Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau IRB in Stuttgart offeriert umfangreiche Datenbestände zur baulichen Denkmalpflege, die über die Datenbank RSWBplus aufgefunden werden können.

Das Hornemann Institut bei der HAWK in Hildesheim betreibt mit HERICARE eine große Datenbank mit mehr als 1000 Dokumentationen zu durchgeführten Restaurierungsmaßnahmen. Außerdem gibt es eine Datenbank mit FuE Berichten zu Förderprojekten (z. B. der DBU) und zu Bachelor- und Masterarbeiten aus dem Bereich der Konservierungswissenschaften. Weiterhin sind Tagungsberichte, Aufsätze und Bücher elektronisch verfügbar. Das Hornemann Institut bietet Online-Kurse zu verschiedensten Themen wie Dokumentation, Materialkunde und Ethik der Restaurierung an.

Hingewiesen sei auch auf die Forschungsdatenbank ARTthesen als Rechercheinstrument über abgeschlossene Studienarbeiten (www.artthesen.net/search).

Bei den Archivrecherchen müssen jedoch nicht immer die Maßnahmen zur Behebung von Schäden im Mittelpunkt stehen. Es gibt Steinfassaden, die seit Jahrhunderten bestehen und intakt sind. Mit Hilfe der Archivrecherche lässt sich gegebenenfalls die

Geschichte des Objekts rekonstruieren und moderne naturwissenschaftliche Untersuchungsmethoden ermöglichen es, die besonderen Eigenschaften der Materialien zu bestimmen. Sie können als Vorbild für neue Maßnahmen dienen und vor übereilten und falschen Eingriffen schützen.

3.3 Beispiele

An einem berühmten Museum von König Ludwig I. von Bayern (reg. 1825 bis 1848) sollen besondere Erkenntnisse, die sich aus der Archivrecherche ergeben, demonstriert werden.

Die Glyptothek in München entstand zwischen 1816 und 1830 und war der erste große gemeinsame Bau von Ludwig I. und seinem Architekten Leo v. Klenze. Die Fassade imitiert das Aussehen eines griechischen Tempels und besteht aus Untersberger Kalkstein. Die übrigen Seiten wurden verputzt und bemalt. Bisher war nicht bekannt, dass der Putz einst eine farbige Quaderung mit Ritzung aufwies, um eine Steinfassade vorzutäuschen (Bild 56 oben). Alte Fotos zeigen, wie die Fassung nach und nach verschwindet, bis sie in den 1930er-Jahren im Zuge der von den Nationalsozialisten initiierten Umgestaltung des Königsplatzes einem Einheitsputz weichen musste (Bild 56 unten). Da der Putz, wie die alten im Bauamt gelagerten Ausschreibungen belegen, nach den Kriegszerstörungen komplett erneuert wurde, kann dieser Befund in situ nicht mehr verifiziert werden. An versteckter Stelle und beiläufig erwähnt Klenze die Putzquaderung der Glyptothek in einem Brief an Ludwig vom 16. Mai 1829, und zwar bei den Arbeiten an der Allerheiligen-Hofkirche (GLASER II, 1 Dok.647). Überhaupt lohnt sich die Lektüre des bravourös edierten Briefverkehrs zwischen Ludwig und Klenze; für den Restaurator ist er ein regelrechter Born für technische Details, Materialien und Bauweise.

Den Eingang zur Rückseite der Glyptothek bildet ein mit Giebel, Konsolen und Faszien­gewänden geschmücktes Portal. Mit Hilfe der Materialanalyse ließ sich nicht zweifelsfrei klären, ob die Bauteile original oder nach dem Krieg erneuert sind. Auf Anregung seines Lehrers Döllgast fotografierte der Architekturstudent Oscar Poss um 1940 zahlreiche Münchner Bauten und auch die Münchner Glyptothek. Im Archiv der Glyptothek wurden einige seiner Fotoabzüge erst vor kurzem entdeckt. Die Vergleiche belegen, dass die Details beim Wiederaufbau nach dem Krieg geändert und vereinfacht erneuert wurden (Bild 57).



Bild 56: Glyptothek München. Oben: bauzeitliche Fassade mit deutlich erkennbarer Quaderung auf Putzflächen an der östlichen, rechten Gebäudeseite (Aufnahme: Franz Hanfstaengl 1855. Quelle: Stadtmuseum München). Unten: Umgestaltung des Königsplatzes während der NS-Zeit, Ostfassade eingerüstet (Aufnahme 1935. Quelle: Ullsteinbild)



Bild 57: Portal an Nordfassade der Glyptothek, links bauzeitlich (Aufnahme: Poss um 1940. Quelle: Hausarchiv Glyptothek), rechts in heutigem Zustand (Aufnahme: Pfanner 2017), wie es nach dem Krieg neu erstellt wurde. Änderungen sind eingekreist.

Im Innern war die Glyptothek einst reich mit Stuck, Inkrustationen und Malereien geschmückt. Nach den immensen Kriegszerstörungen entschied man sich unter der Leitung des Architekten Josef Wiedemann, den Putz komplett zu entfernen und die Wände ziegelsichtig zu lassen. Neuerdings wurden Risse im Scheitel der Gewölbe entdeckt (Bild 58 links). Sollten sie aktuell aufgetreten sein, bedeuten sie akute Gefahr für Besucher und Objekte, sodass unter Umständen das Museum geschlossen werden muss. Alte Fotos belegen jedoch, dass diese Risse schon seit Langem existieren und vielleicht sogar bauzeitlich sind (Bild 58 rechts), sodass etwaige Sicherungsmaßnahmen mit Bedacht angegangen werden können.



Bild 58: Innenraum der Glyptothek mit Ziegelgewölbe, links mit Riss im Scheitel auf einer aktuellen Aufnahme (Aufnahme: Pfanner 2017). Rechts derselbe Rissverlauf im Vorkriegszustand (Aufnahme: Poss um 1940. Quelle: Hausarchiv Glyptothek).



Bild 59: Sitzstufen (Krepis) an Nord-/Rückseite der Glyptothek. Zustand um 1940 mit auffallend hellen Stufen (Aufnahmen: Poss um 1940. Quelle: Hausarchiv Glyptothek).

Die Nordrampe der Glyptothek stellte die Bauforscher und Restauratoren vor ein Rätsel (Bild 59). Die hohen Sitzstufen vor dem Säulen-Porticus bestehen aus Muschelkalk, obwohl am Bau sonst nur Untersberger und Kalktuff vorkommen und Klenze bei Treppen normalerweise Sandstein verwendete. Zudem ist der Einsatz von Muschelkalk um 1820 ungewöhnlich, da in München und deutschlandweit Muschelkalk gemeinhin erst ab dem ausgehenden 19. Jahrhundert mit dem Transportmittel Eisenbahn Verbreitung findet. Die Stufen mussten aber original sein, da die riesigen Säulen auf ihnen lasten. Eine Kombination verschiedener Archivquellen mit der

Bauforschung vor Ort lieferte die Erklärung. Otto Reis erwähnt in seinem vorzüglichen Führer über die Gesteine der Münchner Bauten von 1935, dass die Stufen der hinteren Eingangshalle aus Schilfsandstein sind [Reis (1935), S. 116]. Auf einem Foto um 1940 steht ein Schubkarren auf einer frisch gekiesten Fläche, und die besagten Stufen sind hell und wie neu. Wurden sie etwa doch ausgetauscht und sehen wir den Abschluss der Arbeiten? Eine nochmalige Befundung vor Ort brachte die Erkenntnis: Die neuen Stufen aus Muschelkalk sind raffiniert ausgeklinkt und unter die Säulenplinthen geschoben, sodass es so aussieht, als ob sie schon immer zum Bau gehörten.

3.4 Zusammenfassung

Die Archivstudien haben zwei wesentliche Ziele zum Inhalt. Die kunstgeschichtliche Würdigung will das Wesen des Denkmals herausfiltern, damit durch die geplanten Maßnahmen seine geschichtliche Aussagekraft nicht eingeschränkt wird. Die materialkundliche Seite der Archivstudien soll die Kenntnis über die zur Bauzeit und bei späteren Restaurierungen verwendeten Materialien vermitteln, sodass einerseits Umbauphasen, auffällige Häufungen von Schäden und mögliche negative Auswirkungen auf die geplante Verwendung von Konservierungsmitteln erkannt und abgeschätzt werden können und andererseits besonders standfeste und bewährte Fassadenbereiche als Referenz und Vorbild dienen können.

Mit fortschreitender Digitalisierung hat man es in der Archivrecherche vermehrt mit elektronischen Dokumenten zu tun. Die Denkmalpflege und die meisten Bauämter beschreiten in dieser Hinsicht einen doppelten Weg, indem sie den Bericht in gedruckter und in elektronischer Form verlangen. Auf diese Weise ist eine zweifache Sicherheit gegeben, denn es ist nach wie vor sehr zweifelhaft, ob die elektronischen Datenträger die Dauerhaftigkeit analoger Dokumentationstechniken besitzen. Gerade bei Denkmälern muss aber verlangt werden, dass Dokumentationen eine lange Lebensdauer haben, sodass die Denkmalgeschichte auch nach Generationen noch erkennbar ist. Der Restaurator ist deshalb gezwungen, sich stets mit der neuesten Hard- und Software zu versorgen, um alle Pläne und Texte lesen zu können.

4 Mauerwerk und Statik *

Inhalt

4.1	Allgemeines	115
4.2	Stein und Statik: einige Grundregeln	115
4.2.1	Stein und Druck	115
4.2.2	Stein und Dübel	116
4.2.3	Stein wie Stahlbeton	119
4.2.4	Steine im Mauerverband	120
4.3	Konstruktives und verformungsgerechtes Aufmaß und Sondierungen *	121
4.4	Erfassung der Lasten	* 121
4.5	Baugrund	* 121
4.6	Mauerkrone und Mauerfuß	122
4.7	Hinweise auf weitere Informationen	124
4.8	Zusammenfassung	126

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

4 Mauerwerk und Statik

4.1 Allgemeines

Jedes Natursteingebäude stellt ein komplexes statisches System dar, bei dem vom Fundament bis zum Dach alle Einzelelemente aufeinander bezogen sind. Verformungen und Risse geben deshalb wichtige Hinweise auf Mängel oder das Versagen bestimmter Bauteile. Die Untersuchungen müssen klären, ob die beobachteten Risse oder Deformationen bereits zur Ruhe gekommen oder noch aktiv sind, sodass sie eine Bedrohung für die Standsicherheit und die Steinsubstanz darstellen können. In vielen Fällen wird es sich als sehr schwierig erweisen, die Anforderungen moderner Sicherheitsvorschriften mit den berechtigten Wünschen der Denkmalpflege in Einklang zu bringen. Umso wichtiger sind fundierte Voruntersuchungen, um überhaupt erst die Grundlage zu schaffen, im offenen Dialog individuell auf das Denkmal zugeschnittene Lösungen herausarbeiten zu können.

Die Statik gilt bei vielen Naturwissenschaftlern, Architekten und Restauratoren als eine Art Geheimwissenschaft, die man zwar nicht versteht, der man sich aber unweigerlich beugen muss. Dabei können durch falsche und übergroße statische Eingriffe die ausgefeiltesten Konservierungsbemühungen zunichte gemacht werden. Die Restaurierungsgeschichte ist voller Beispiele davon. Es sollte jedoch immer so sein, dass der Denkmalschützer zuerst seine Vorgaben formuliert und der Statiker dann versucht, diese umzusetzen – und nicht umgekehrt.

4.2 Stein und Statik: einige Grundregeln

Das Thema ist zu vielschichtig, um es an dieser Stelle auch nur annähernd abhandeln zu können. Im Folgenden werden vorab einige grundsätzliche Hinweise zum Tragverhalten von Stein, Fugen, Mauerwerk und deren Zusammenspiel gegeben, wie sie in der Praxis der Steinrestaurierung und -konservierung immer wieder auftauchen. Sie können dem Restaurator, also einem »Laien im Fach Statik«, als kleine Handhabe in der Diskussion und Konzeptfindung dienen, ohne dass er dabei in die Fachkompetenz des Spezialisten eingreift.

4.2.1 Stein und Druck

Naturstein hat eine herausragende physikalische Eigenschaft, nämlich die, dass er immensen Druck aufnehmen kann. Wird er jedoch auf Biegung belastet und treten somit Zugkräfte auf, kommt es zu Verformungen, Rissen und schließlich zum Bruch. Bild 60 veranschaulicht dies: Auf einem Steinblock von 30 × 30 cm mit einer Länge

von 100 cm könnte man 3 000 t auflasten, bis es zu einer Stauchung von lediglich 1 mm führt. Anders ausgedrückt entspräche das 11 700 Blöcken, die aufgeschichtet eine Höhe von 3,5 km ergäben. Überspannt derselbe Block 1 m und wird er in der Mitte belastet, so bricht er schon bei einer Auflast von 15 t.

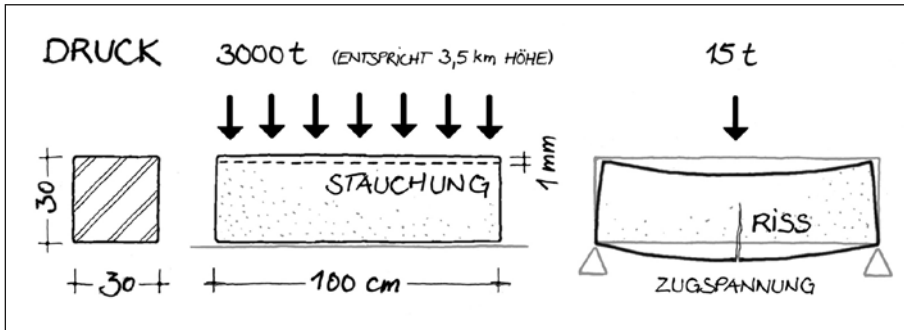


Bild 60: Links: Naturstein kann immense Druckkräfte aufnehmen, ohne dass er sich merklich verformt. Rechts: Bei einer Biegebelastung führen die Zugspannungen jedoch schnell zu Rissen und zum Bruch (Zeichnung: ARGE Pfanner, T. Bunk).

Historische Bauwerke machten sich diese Materialeigenschaften des Steins aufgrund Jahrhunderte langer Erfahrungen konsequent zu Nutze. Seien es die Pyramiden der Ägypter, bei denen das Konstruktionsprinzip ausschließlich auf senkrechte Druckbelastung hin ausgerichtet ist, was die einfachste, aber beständigste Steinbauweise ist. Seien es die dorischen Tempel der Griechen, bei denen das Hauptgewicht vertikal auf den Kapitellen und Säulen lastet, während die Interkolumnien (Säulenabstände) möglichst gering gehalten wurden, um die Spannweite des horizontalen Architravs, des statischen Schwachpunkts, zu verringern. Oder seien es schließlich die Bogenkonstruktionen der Römer, bei denen die Gewölbeüberbrückung ausschließlich auf dem Prinzip der Druckbelastung beruht.

4.2.2 Stein und Dübel

Die eigentlich selbstverständlichen Materialeigenschaften des Natursteins finden in der Bau- und Restaurierungspraxis oftmals zu wenig Beachtung, da man die Zusammenhänge nicht herstellt. Am deutlichsten tritt das beim Verdübeln bzw. Vernadeln zutage. Nach wie vor ist es gängige Praxis, einen gebrochenen oder losen Stein oder ein zu sicherndes Bauteil mit einem eingeklebten oder vermörtelten Metallstab zu sichern. Dieser Dübel liegt mehr oder minder lose und inaktiv im Stein. Er reagiert erst, wenn es zur Bewegung kommt und es eigentlich zu spät ist. Denn dann sind schon Zugspannungen entstanden, die zu den bekannten Schäden wie Rissen, Abplatzungen und Abscherungen führen (Bild 61). Zudem ist dieses System irreversibel.

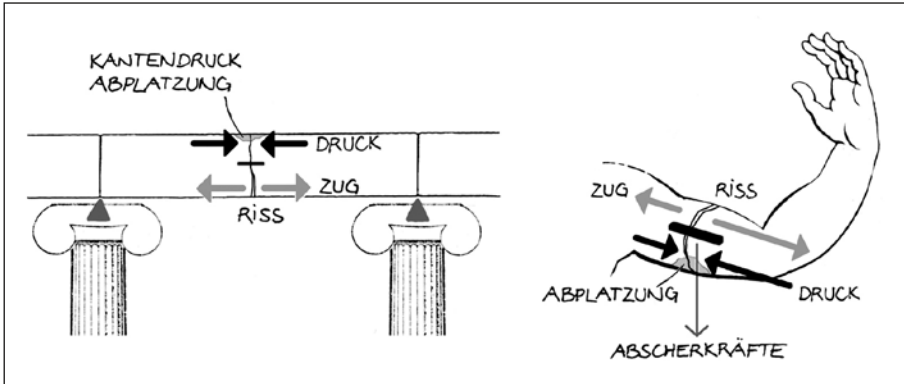


Bild 61: Verbindung gebrochener Teile mit Hilfe eines Dübels. Diese Art der Kraftübertragung führt zu Scherkräften und damit zu Rissen und Kantenabplatzungen. Die Metaldübel werden meist in Kitt, mineralischem Mörtel oder Epoxidharz gebettet, sind kaum zu lösen und damit irreversibel (Zeichnung: ARGE Pfanner, T. Bunk).

Dabei ist die Lösung einfach. Der Dübel wird nicht spannungslos eingemörtelt, sondern von vorneherein aktiviert, d. h. angezogen und mit einer Vorspannung versehen. Das funktioniert in nahezu allen Situationen, wie es Bild 62 am Beispiel einer frei stehenden Vase zeigt. Da die Befestigung verschraubt ist, lässt sie sich relativ leicht lösen und erfüllt ein wichtiges Kriterium der modernen Denkmalpflege. Was das für die Befestigungen von Vierungen und Ergänzungen bedeutet, wird in Kapitel 11.3 und 11.7 behandelt.

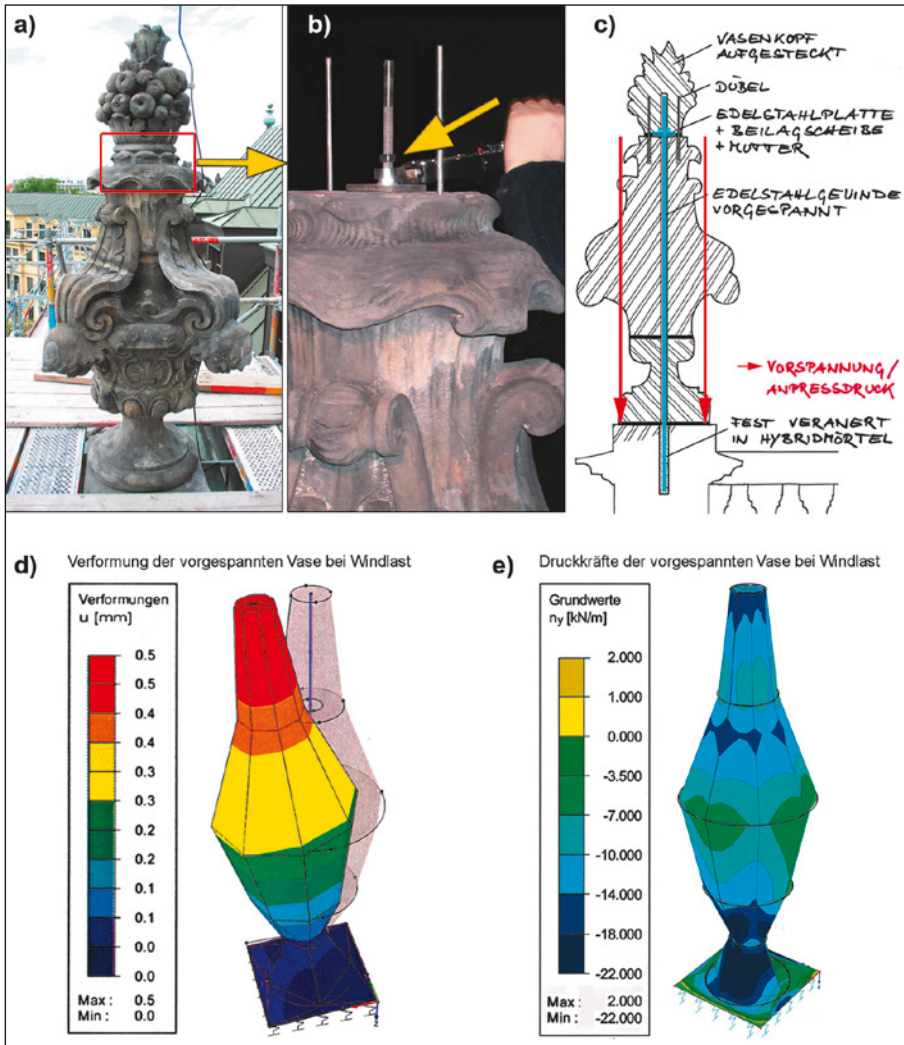


Bild 62: Befestigung einer monumentalen Vase mit Vorspannung (München, Alte Börse, Attika): a) Ansicht – b) Detail der oberen Vorspannung mit Metallplatte und Mutter – c) Vertikalschnitt. Die im Unterbau fest verankerte Gewindestange verspannt die Vasenteile sowohl miteinander als auch nach unten. – d) und e) RFEM-Modelle der vorgespannten Vase. Bei Windlast verformt sie sich im Gesamten sehr wenig (bei herkömmlicher Verdübelung entstehen aufgrund der separaten Bauteile schädliche Bewegungen in den Fugen), da die ungünstigen Zugkräfte überdrückt werden (ARGE Pfanner, J. Pfanner, L. Reichenbach).

4.2.3 Stein wie Stahlbeton

Das Prinzip der Vorspannung wirkt auf den Naturstein wie ein Wundermittel. Denn dadurch werden seine negativen Eigenschaften – die geringe Aufnahme von Zugspannungen – in seine positiven Eigenschaften – die hohe Aufnahme von Druckbelastungen – umgewandelt. Mit der Methode lassen sich neue Bauteile von vorneherein optimieren und alte Bauteile ertüchtigen oder dauerhaft sanieren. Der Naturstein funktioniert dann ähnlich wie Stahlbeton, der ja bekanntlich aufgrund seiner Eisenarmierung große Zugspannungen aufnehmen kann – man denke an die weit gespannten Geschossdecken.

Eine gebrochene oder zu schwache Treppenstufe muss demnach nicht ausgetauscht oder ausgebaut werden, sondern es genügt eine Durchbohrung der Länge nach, und zwar im Bereich der unteren Zugzone, und die Vorspannung mit einer Gewindestange (Bild 63).

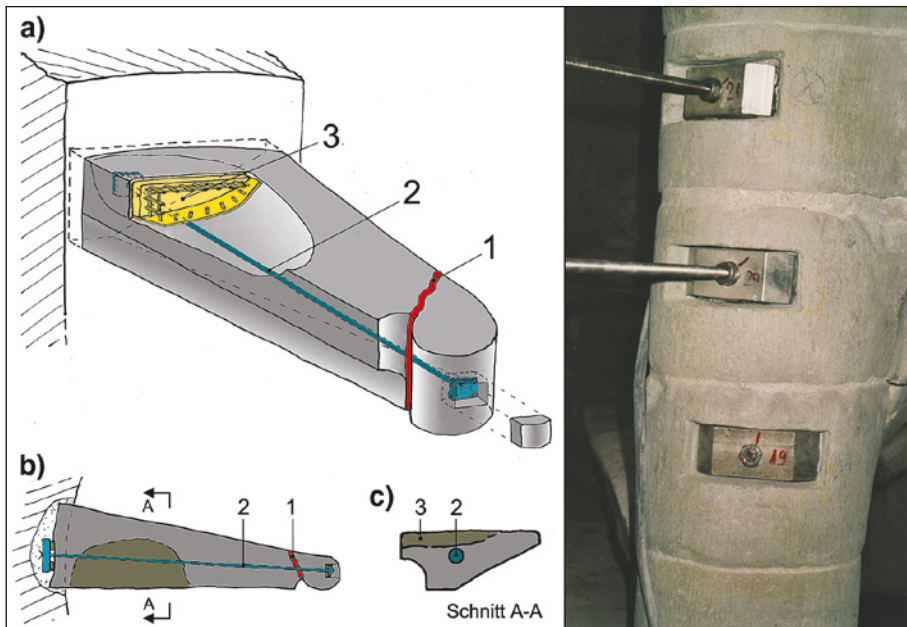


Bild 63: Götzis (Vorarlberg), Junker-Jonas-Schlössle (16. Jh.). Die historische Spindeltreppe aus Sandstein sollte, da sie als notwendiger Fluchtweg diente und nicht mehr tragfähig war, ausgebaut und erneuert werden. Mittels Vorspannung und mit relativ geringen Eingriffen wurde sie stabilisiert: a) Schaubild – b) Draufsicht – c) Schnitt. 1: Riss 2: Zugstange 3: Auffütterung mit Saniermörtel. Rechts: Einbau von Edelstahlzugstangen mit Widerlager (ARGE Pfanner, L. Reichenbach, J. Pfanner).

4.2.4 Steine im Mauerverband

Denkmalfleger sind von Haus aus gegen den Austausch von Originalsubstanz. Das System eines Mauer- oder Gewölbeverbandes liefert ihnen aus statischer Sicht dafür gute Argumente. Wird nämlich ein Stein aus dem Verbund gelöst, finden sofort Druckumlagerungen statt und die Kräfte suchen sich einen neuen Weg. Das bedeutet für einen alten Bau Zweierlei: Zum einen können durch die neuen Kräfteverhältnisse neue Schäden wie Risse, Spannungsspitzen, Kantenabplatzungen und Ähnliches mehr entstehen, zum anderen wird die leere Stelle nie mehr Druck aufnehmen, aus dem einfachen Grund, weil hier keine Lasten mehr vorhanden sind. Folglich werden ein neu eingesetzter Stein oder eine Vierung mehr oder minder lose im Gefüge liegen. Auch Verfugungen, Injektionen oder sogenannte Quellschichten werden diesen Druck nicht wieder aufbauen können, zumal sie beim Abbinden meist schrumpfen und die Lasten schon umgelagert sind. Bestenfalls kann man versuchen, mit aufwändigen hydraulischen Methoden o. Ä. während des Ausbaus das Kräfteverhältnis im Gleichgewicht zu halten. Der neue Stein würde nur dann wieder Kraft aufnehmen, wenn sich die Umgebungssteine entsprechend stauchen ließen, was ihrer Zerstörung entspräche (Bild 64). Das Verständnis für dieses Zusammenspiel der Kräfte soll beim Umgang mit Steinaustausch und der Erneuerung von Fugen immer präsent sein (siehe Kapitel 11.1.3 und 11.1.6).

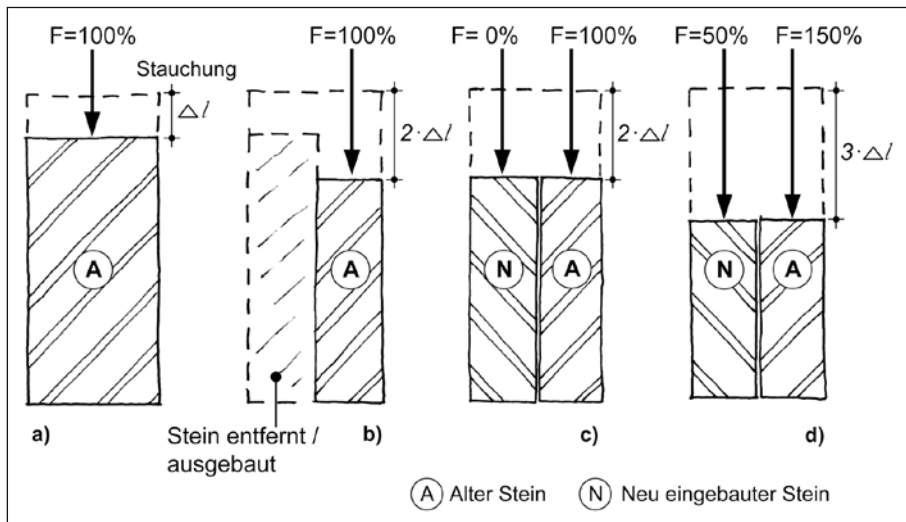


Bild 64: Systemskizzen zu Kräfteverhältnis, Lastumlagerung und Stauchung beim Austausch von Steinen. a) Der vorhandene alte Stein wird unter Last (F) um die Strecke Δl gestaucht. b) Wird die Hälfte des Steines entfernt, muss der verbliebene Stein (A) die gesamte Last aufnehmen und wird um die doppelte Länge gestaucht. c) Wird ein neuer Stein (N) eingesetzt, dann übernimmt er keine Last. d) Sollte er Last übernehmen (»Wunschdenken«), dann müsste der alte Stein um $3 \Delta l$ gestaucht werden, was einer Bestandszerstörung gleich käme (Zeichnung: M. Hartmann, J. Pfanner).

4.3 Konstruktives und verformungsgerechtes Aufmaß und Sondierungen

Die Anamnese und Diagnose historischer Bauten muss einem strengen Arbeitskanon folgen, wenn sie die Kluft zwischen denkmalverträglichen Therapiemaßnahmen und heutigen Sicherheitsnachweisen überbrücken soll. Am Anfang steht die Erfassung des Zustands. Das Gebäude muss verformungsgerecht aufgenommen werden. Neigungen und Rissverläufe sind zu zeichnen und zu messen. Die zeitliche Änderung von Deformationen und Rissen ist über längere Zeit messtechnisch zu beobachten. Sondierungen oder zerstörungsfreie Methoden sind anzuwenden, um die Stärke und den Aufbau (Einschaligkeit, Mehrschaligkeit, überhängende Lasten und Volumina) des Mauerwerks zu erkunden, was dann in einer Schnittzeichnung mündet. Damit ein Bauforschungsplan auch für den Ingenieur und Statiker nützlich wird, müssen die Maße aller Bauteile nicht nur flächig, sondern auch in der dritten Dimension erfasst werden. Der Auftraggeber sollte nicht vergessen, diesen häufig übersehenen Teil einer Bauaufnahme mit zu beauftragen.

4.4 Erfassung der Lasten

Im nächsten Schritt müssen die Lasten ermittelt werden. Die Eigengewichte der Bauteile, die Lasten aus Dächern oder Fassadenaufbauten wie Architrave, Ziergiebel, Attiken etc. sind auf der Grundlage der Maßpläne und Volumina zu berechnen. Verkehrslasten aus Personen und Fahrzeugen wirken nicht nur vertikal, sondern in Form von Holmdruck und Anpralllasten auch horizontal. Wind-, Schnee- und Eislasten sind vom Standort abhängig, nämlich der Höhe über dem Meeresspiegel, der Bauwerkshöhe und den offiziell festgelegten Wind- und Schneelastzonen.

Zwängungen aus gleichmäßigen und ungleichmäßigen Temperaturänderungen sowie gegebenenfalls aus Feuchteänderungen können manchmal sogar die für die Bemessung bestimmenden Größen sein. Glocken oder andere Lärm- und Schwingungsquellen sind in der Lage, schädliche Resonanzschwingungen hervorzurufen und bedürfen besonderer Untersuchungen. Alle Bauzustände müssen lückenlos untersucht werden. So sind in Abhängigkeit vom Standort auch Erdbebenlasten zu berücksichtigen, die speziell bei massiven Bauteilen enorme Kräfte hervorrufen können. Normen regeln die Größe der anzusetzenden Lasten sowie die zugehörigen Sicherheitsbeiwerte für die Bemessung der Bauteile. Bei deren Anwendung ist neben Sachverstand, gerade bei historischen Bauten, immer viel Fingerspitzengefühl gefragt.

4.5 Baugrund

Viele Schäden haben ihren Ursprung im Baugrund. Gründungen auf ungeeigneten Böden können extreme Auswirkungen haben. Veränderungen im Grundwasser führen

zu Setzungen, Pfahlgründungen verrotten und brechen ein. Bergbau verursacht in manchen Gegenden Setzungen im Meterbereich an der Erdoberfläche, welche in Einzelfällen messtechnisch über viele Jahrzehnte beobachtet und ausgewertet wurden [PFEFFERKORN (1994b)]. Bei flachen Gründungen kann die Frostverwitterung zur Zerrüttung der Fundamentgesteine geführt haben. Im Einzugsbereich aufsteigender Feuchte und Salzbelastung wird oft eine beträchtliche Verringerung des Querschnitts und damit Einschränkung der Standsicherheit beobachtet. Ergeben sich aus der Bauaufnahme Hinweise auf Baugrundschäden, so soll auf jeden Fall ein Baugrundingenieur eingeschaltet werden, weil dieses Spezialgebiet eine besondere Qualifikation erfordert, die von einem Restaurator nicht erwartet werden kann. Ein solcher Experte ist in der Lage, die Rissverläufe in einem Mauerwerk richtig zu interpretieren und ein Untersuchungsprogramm zur Identifikation und Behebung der Ursachen einzuleiten.

4.6 Mauerkrone und Mauerfuß

Mauerkrone und Mauerfuß sind bekannte Problemzonen der Instandsetzung und Instandhaltung bei frei stehenden Umfassungsmauern und bei Ruinen. Die Oberseiten von Umfassungsmauern hat man in früherer Zeit häufig durch Abdeckungen mit schräg aufgesetzten Ziegeln, Dachziegeln oder mit dreieckig geformten Steinen, der sogenannten Bischofsmütze (siehe Bild 65) geschützt. Vernachlässigt man diese Bauteile, dann werden die Mauern von zwei Seiten her geschädigt, nämlich von oben durch Regenwasser und von unten durch Grundfeuchte im Bereich des Mauerfußes.



Bild 65: Umfassungsmauer Schloss Seehof mit Steinabdeckung, sogenannte Bischofsmütze. Die durch Ablaufwasser und Grundfeuchte verursachten Schäden überlappen sich in der Mitte der Mauer.

Die Mauerkronen von ruinösen Gebäuden oder Burgen sind durch die Zerstörung der Dächer schutzlos dem Einfluss von Regen und Schnee ausgesetzt, sodass die obersten Steinlagen häufig stark beschädigt oder bereits abgefallen sind. Gräser und Bäume haben sich angesiedelt und durchdringen mit ihren Wurzeln die Fugen. Weil die

Mörtel ebenfalls zerstört sind, besteht die Gefahr, dass weitere Werksteine herabfallen und Personen verletzen.

In fast allen Fällen gesellt sich zur Feuchtebelastung auch eine hohe Kontamination mit Salzen, die durch ihre hygroskopischen Eigenschaften für eine dauerhaft hohe Durchfeuchtung Anlass geben. Jede Instandsetzung muss deshalb zum Ziel haben, den Salzgehalt der Mauer zu reduzieren und den Nachschub über das Erdreich möglichst zu unterbinden. Weil Salze immer in dem Material mit den besseren Feuchtetransporteigenschaften konzentriert sind, ist es gewöhnlich der Fugenmörtel, der von Salz infiziert ist und so gut wie möglich entfernt werden muss. Man sollte aber die damit einhergehenden statischen Konsequenzen der Lastumlagerung (siehe Kapitel 11.1.6) im Auge behalten. Werden, wie es in früheren Zeiten oft der Fall war, die Fugen mit sperrendem Zementmörtel repariert, dann kehren sich die Verhältnisse um und der Salztransport erfasst die Werksteine bzw. Ziegel. Bei der nächsten Instandsetzung wird es dann unumgänglich sein, die geschädigten Werksteine auszubauen und zu ersetzen, wobei die oben im Kapitel 4.2.4 geschilderten grundsätzlichen Vorbehalte gegenüber partiellem Steinaustausch immer zu berücksichtigen sind.

Für die Mauerkrone bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Instandsetzung an [AURAS & SIEDEL (2007)]. In einem ersten Schritt wird es erforderlich sein, die geschädigten Steinlagen abzutragen und neu mit möglichst lokalem Gestein wieder aufzumauern. Die Grenzlinie zum originalen Mauerwerk ist durch den Übergang zwischen neu und alt gut zu erkennen. Die Abdeckung soll sicherstellen, dass Regenwasser und Tauwasser nicht von oben in die Mauer eindringen kann. Gleichzeitig muss ein gewisser Überstand vorhanden sein, sodass das Regenwasser nicht direkt über die Mauer abfließt und dort wieder zu Schäden führt.

Bei einer Abdeckung der Mauerkrone mit Werksteinen werden an den Verbindungsmörtel sehr hohe Anforderungen gestellt. Zementmörtel wären zwar einerseits hinreichend dicht, andererseits jedoch bilden sich aufgrund der thermischen Belastungen sehr schnell Risse, durch die Sickerwasser eindringen kann. In der Folge lösen sich Mörtel und Steine recht bald vom Untergrund ab. Der Mörtel muss deshalb einen geringen E-Modul, einen geringen w-Wert und eine hohe Reißdehnung aufweisen. In der Praxis werden solche Eigenschaften nicht mit rein mineralischen Mörteln zu erreichen sein, sodass die Zugabe von Kunststoffdispersionen unvermeidlich sein dürfte. AURAS & SIEDEL (2007) formulieren für die kapillare Saugfähigkeit der Mörtel folgende Anforderungen:

- vertikale Wände: w-Wert größer/gleich dem w-Wert des Mauersteins
- horizontale, geneigte wasserführende Flächen: w-Wert kleiner/gleich dem w-Wert des Mauersteins.
- stark feuchte- und/oder salzbelastete Sockel bzw. Mauerwerk mit Erdberührung: w-Wert größer/gleich dem w-Wert des Mauersteins

Zum Schutz der Mauerkrone können auch andere Lösungen in Betracht gezogen werden wie kleine Schutzdächer in Giebelform oder Metallauflagen, sofern diese

Lösungen stilistisch vertretbar sind. In naturnaher Umgebung kann auch eine Begrünung mit Grasboden oder Sukkulenten ausgeführt werden, wobei als Trennschicht zum Mauerwerk ein Geotextil unterlegt werden muss.

Am Mauersockel ergeben sich besondere Schwierigkeiten, wenn die Mauer auf der Rückseite direkt an das Erdreich anschließt. Um den rückseitigen Eintritt von Wasser zu verhindern, wäre eine Drainage in Verbindung mit einer Vertikalisolierung in Betracht zu ziehen, wenn diese Lösung nicht aus technischen oder Kostengründen ausscheidet. Entwässerungsröhre zur Außenseite helfen meist nur minimal, weil der Einzugsbereich der Röhre im Erdreich zu klein ist und nur sehr wenig Wasser abgeleitet wird. Oftmals bewähren sich Lehmputzungen, die einer langsamen Trockenlegung und allmählichen Stabilisierung durchaus förderlich sein können.

Am Mauersockel sollten keine dichten Sockelputze verwendet werden, weil diese den Feuchtetransport nach außen unterbinden und es zu massiven Schäden im dahinter und darüber liegenden Mauerwerk kommt. Sanierputzartige Mörtel erreichen eine längere Lebensdauer, wenn die Feuchte- und Salzbelastung eher gering ist. Der Sinn dieser Mörteltypen liegt ja darin, die Durchfeuchtung nach vorne nicht sichtbar erscheinen zu lassen, sodass die Verdunstung im Mörtel an der Grenze zwischen Grundputz und Oberputz erfolgt. Ist hier die Belastung mit Salz zu hoch, kommt es auch bei diesen salzresistenten Mörteln zu Beschädigungen. Bei Übersättigung blättern solche Putze nicht nur partiell ab, sondern zerbrechen gerne in großen Schollen, was zu Schäden an der originalen Mauerfläche und gar zur Personengefährdung führen kann.

Das Beispiel von Mauerkrone und Mauerfuß bei Ruinen und frei stehenden Mauern zeigt, dass die Problematik immer mit Feuchte und Durchfeuchtung zu tun hat. Das Thema ist natürlich komplexer. Es betrifft auch Spritzwasser, mangelhafte Austrocknung durch Verschattung oder Bewuchs, fehlende Gesims- und Fensterbankabdeckungen (siehe Kapitel 11.1.11), defekte Rohre und Rinnen usw. Bei bewohnten Gebäuden kommt die Frage nach Kondensat und Taupunkt ins Spiel, nicht zuletzt im Zusammenhang mit den modernen Wärmeschutzverordnungen und den damit einhergehenden Dämmungen. Bei alten Gebäuden, die gegebenenfalls jahrhundertlang funktionierten, greifen solche neuen Maßnahmen immer in das bauphysikalische Gleichgewicht ein und können zu ungeahnten Komplikationen führen.

4.7 Hinweise auf weitere Informationen

Es kann hier nicht der Platz sein, in die statische Untersuchung und die Sicherung von Mauern, Gewölben oder Türmen einzudringen. Auch auf die Problematik verschiedener, unverträglicher Mörtelarten, auf die Frage der rechnerischen Bewertung von Stein-Mörtel-Verbänden und auf die Schwierigkeiten bei der Berechnung von statischen Sicherheiten kann hier nicht eingegangen werden. Die Möglichkeiten der Injektion in Mauerwerk und Böden können nur namentlich erwähnt werden. Es möge

der Hinweis genügen, dass die wichtigsten Angaben über Untersuchungen und Berechnungen der Tragfähigkeit und Standsicherheit von Mauerwerk in der DIN EN 1996 (früher DIN 1053) enthalten sind.

Nicht vergessen werden sollte, dass Brände die Steine eines Mauerwerks so stark geschädigt haben können, dass sie in Folge von Gefügezerrüttung und Rissbildung im Inneren nur noch ein Bruchteil ihrer ursprünglichen Belastbarkeit besitzen. Selbst Hydrophobierungen können zu diesem Schadensbild führen, wenn durch Risse in Fugenflanken (die praktisch nie ausgeschlossen werden können) viel Feuchtigkeit eindringt, nicht mehr nach außen verdunstet und es zu entsprechenden Frostschäden kommt. Gerade bei Ziegelmauerwerk führt dies nicht selten zur Totalzerstörung der historischen, niedrig gebrannten Backsteine und der Fugen [PFANNER (2009)].

Aufgrund der absoluten Vorrangigkeit, welche die Fragen der statischen Sicherheit besitzen, wird dringend geraten, bei allen Maßnahmen, welche in die Standsicherheit eines Mauerwerks eingreifen könnten, ein kompetentes Ingenieurbüro (Statiker) einzuschalten, um die erforderlichen Messungen und Berechnungen ausführen zu lassen. Bei dem zu führenden Nachweis, z. B. der Standsicherheit, sollte nicht allein der gegenwärtige Zustand betrachtet werden. Die Untersuchungen sollten immer auch auf die Ursache-Wirkungs-Beziehungen ausgedehnt werden, damit Informationen zur Dauerhaftigkeit und Nutzungsdauer in Erfahrung gebracht werden können.

Die behutsame Instandsetzung historischer Gebäude haben vor allem PIEPER (1983), der SFB 315 unter der Leitung von WENZEL und im BMBF-Projekt die Arbeitsgruppe von ROSTÁSY durch wesentliche Untersuchungen und beispielhafte praktische Umsetzungen gefördert. Als weiterführende Publikationen seien das Sonderheft der BMBF-Verbundforschung »Geotechnik in der Denkmalpflege« GUDEHUS (1993), die ebenfalls im Rahmen der BMBF-Förderung entstandenen Arbeiten von WARNECKE (1995) und WARNECKE, ROSTÁSY & BUDELMANN (1995) sowie die Jahresberichte des SFB 315 genannt, in denen sich u. a. folgende Artikel zum Thema finden: WENZEL (1987); MAUS (1988); ECKERT (1991); GUDEHUS (1992), SFB 315 (1995, 1996). Auch auf das Heft des Landesinstituts für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung NRW über Gründungsschäden an historischen Bauwerken wird verwiesen [MÜLLER & GÜLCKER (1990)].

Ausführliche Zusammenstellungen zur Problematik von historischem Mauerwerk und den zur Verfügung stehenden zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden finden sich bei BINDA & ANZANI (1997); NAPPI & COTE (1997). Zum Zusammenspiel von Stein und Statik und den damit verbundenen Problem der Verdübelungen und dem Vorteil der Vorspannungen siehe PFANNER (2005); PFANNER (2010).

4.8 Zusammenfassung

Wegen der zentralen Bedeutung der Mauerwerk-Statik-Problematik für den Bestand des Denkmals muss in jedem Fall vorsorglich ein Statiker eingeschaltet werden. Es sei allerdings dringend geraten, eine Person hinzuzuziehen, die einschlägige Erfahrungen mit Naturstein und altem Mauerwerk besitzt, da bei einem historischen Bau niemals die gleichen Maßstäbe wie bei einem Neubau angesetzt werden dürfen. Häufig gestaltet sich das zu einer Gratwanderung zwischen bauaufsichtlichen Bestimmungen und denkmalgerechten Anforderungen. Die statischen Sicherungsmaßnahmen haben grundsätzlich dem Charakter der historischen Bausubstanz Rechnung zu tragen. Sie sollen schonend und zurückhaltend denkmalverträglich sein und das unvermeidliche Mindestmaß nicht überschreiten. Der Bericht des Gutachters muss deshalb klar die unverzichtbaren Ziele der Sicherungsmaßnahmen umreißen und, wenn irgendwie möglich, Alternativen samt Lösungswegen aufzeigen. Der Restaurator sollte sich nicht scheuen, auch als »statistischer Dilettant« die Konzepte zu hinterfragen und gegebenenfalls zusammen mit dem Statiker nach denkmalgerechteren Lösungen zu suchen.

5 Hydrogeologie ***

Inhalt

5.1	Allgemeines		129
5.2	Transportpfade für das Wasser im Boden.....	***	130
5.3	Salze im Boden.....	***	130
5.4	Hydrogeologische Messungen	***	131
5.5	Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen		132

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

5 Hydrogeologie

5.1 Allgemeines

Häufig haben Feuchteschäden am aufgehenden Mauerwerk ihre Ursache im Baugrund. Die Fundamente stehen mit dem Erdreich in Verbindung, von dem sie Feuchtigkeit und Salze aufnehmen und weitertransportieren. Immer dann, wenn an einem Objekt Feuchte-/Salzschäden in der Sockelzone zu beobachten sind, oder wenn an der Innenseite von erdberührenden Wänden Feuchteflecken und Abplatzungen auftreten, gewinnen Sondierungen des Baugrundes und der näheren Umgebung eine große Bedeutung.

Drückendes Wasser an Stützmauern macht sich durch starke Absandungen oder Abplatzungen bemerkbar. Der Erddruck kann zu Ausbeulungen des Mauerwerks und dessen statischer Gefährdung führen. Drückendes Wasser auf der Hangseite hat seine Ursache in den besonderen geologischen Verhältnissen des Erdreichs. Eine wassersperrende Schicht verhindert das Versickern des Oberflächenwassers, wodurch dieses in der porösen darüber liegenden Schicht an die Stützmauer geführt wird. Zur Klärung der Sachlage sind Sondierungen des Bodens oder in größerem Maßstab die geologische Karte gefragt.

Im Allgemeinen sind die Probleme der »aufsteigenden Feuchte« in der Weise zu verstehen, dass die Feuchteaufnahme in den unteren, feuchten Wandbereichen die Verdunstung übertrifft. Neben dem von unten kommenden Feuchtestrom wird es deshalb immer auch zusätzliche Feuchtequellen geben, sodass nie mit einer einzigen Ursache zu rechnen ist. Den aus dem umgebenden Erdreich kommenden Feuchtestrom darf man sich nicht wie den Flüssigkeitsfaden in einer Glaskapillare vorstellen, obwohl von vielen Bausachverständigen die Kapillargesetze für die Erklärung von »aufsteigender Feuchte« bemüht werden. Richtiger ist die Vorstellung eines Wasserdampf- und Oberflächendiffusionsstroms, der nach oben in die Verdunstungszone gerichtet ist.

Ein besonderer Einflussfaktor in dieser Hinsicht ist natürlich auch die Hygroskopizität der im Mauerwerk vorhandenen Salze. Sie führen in vielen Fällen dazu, dass sich das Klima im Porenraum vom Außenklima abkoppelt, sodass trotz trockener Umgebungsluft flüssiges Wasser im Porenraum überdauern kann. Beim Bau vieler historischer Gebäude wurden bereits alte Ziegel in Zweitverwendung benützt. Waren diese bereits mit Salzen belastet, so treten uns heute an Stellen, die uns unverständlich sind, nasse Flecken entgegen.

5.2 Transportpfade für das Wasser im Boden

Die Suche nach der Herkunft der Grundfeuchte ist zugleich die Suche nach undurchlässigen Stauhorizonten im Boden. Nur selten wird das durchfeuchtete Mauerwerk dem Gutachter die Freude machen, mit »den Füßen« im Grundwasser zu stehen, um ihm die Arbeit zu erleichtern. Viel häufiger sind gestörte oder stark wechselnde Lagerungsverhältnisse anzutreffen, welche die Interpretation erschweren, auf welche Weise die Bodenfeuchte an das Mauerwerk herantransportiert wird. In diesen Fällen muss dann z. B. die Suche nach räumlich begrenzten tonhaltigen Lagen aufgenommen werden, welche als Stauhorizonte wirken und das Oberflächenwasser lateral an das Mauerwerk heranführen.

Über dem Grundwasserlevel befindet sich der Kapillarwassersaum, der etliches über dem Grundwasserlevel liegen kann. Im diesem Bereich herrschen ebenfalls hohe Wassergehalte, da die Kapillaren voll mit Wasser gefüllt sind, auch wenn kein frei bewegliches Wasser vorhanden ist. Besitzt das Gestein des Mauerwerks einen hinreichenden Kapillarzug, so kann die Feuchtigkeit vom Erdreich in das Mauerwerk übertreten und dieses stark durchfeuchten.

Ebenso sind Kulturhorizonte, die meist stark verdichtet sind, oder alte Gräben und Kanäle zu beachten, die in gleicher Weise als Transportpfade für Oberflächenwasser in Betracht kommen. Trifft dies zu, so sind als Feuchtequellen in erster Linie temporäre oder jahreszeitliche Ereignisse wie starke Regenfälle oder Schneeschmelzen zu berücksichtigen, welche den Feuchtegehalt im Boden stark ansteigen lassen. Nicht immer sind die Oberflächenwässer aber natürlicher Herkunft. In vielen Fällen sind schlichte, »hausgemachte« Fehler wie undichte Kanalrohre, Brunnen, Regenableitung und verstopfte Drainagen die Ursache, was immer als erstes geprüft werden muss.

5.3 Salze im Boden

Um die erhöhten Salzkonzentrationen in einem Feuchte-Salz-geschädigten Mauerwerk zu erklären, ist es nicht unbedingt Voraussetzung, dass die entsprechenden Ionenarten in dem angrenzenden Boden ebenfalls in erhöhtem Maße vorhanden sind. Man sollte sich bei dieser Frage vor Augen führen, dass der Konzentrationsprozess der Salze im Mauerwerk möglicherweise bereits Jahrhunderte alt ist, sodass geringste Gehalte im Boden ausreichend waren, die im Mauerwerk gefundenen Konzentrationen herbeizuführen.

5.4 Hydrogeologische Messungen

Hydrogeologische Untersuchungen sollten immer mit einer geologischen Betrachtung des näheren Umfeldes beginnen, die bei Bedarf durch eine geologische Detailkartierung zu ergänzen wäre. Solche Kartierungen stützen sich in einfachen Fällen auf Bohrstocksondierungen, mit denen man in günstigen Fällen Tiefen von 2 bis 3 m erreichen kann. Darüber hinaus sind Bohrungen erforderlich, um Bodenprofile erstellen zu können. Bei größeren Projekten sollten Pegel in die Bohrlöcher eingesetzt werden, um die Wassermenge und, sofern erforderlich, die Fließrichtung ableiten zu können. In einem nächsten Schritt wären die Durchlässigkeiten der Schichten zu bestimmen, um die Stauhorizonte aufzufinden (DIN 18130). Weiterhin stellt die chemische Analytik der Bodenwässer ein wichtiges Hilfsmittel dar, über ihre Verweilzeiten und damit ihre Herkunft Rückschlüsse anzustellen. Haben diese eine lange Verweilzeit im Boden, sind also von weit her transportiert, dann sind sie durch Sulfat, im anderen Fall, bei kurzer Verweildauer und geringer Transportentfernung, durch Hydrogencarbonat bestimmt. Die chemische Analyse hilft damit ganz entscheidend bei der Spurensuche nach der Herkunft der Wässer.

Darüber hinaus kann es erforderlich werden, Grundwasserbilanzen aufzustellen, bei denen in einem umgrenzten Areal Niederschlag, Verdunstung und abfließendes Wasser berücksichtigt werden, um abzuschätzen, ob Grund- bzw. Oberflächenwasser an das Mauerwerk herangeführt wird. Für weitere Informationen wird in diesem Zusammenhang auf die Untersuchungen von BRAUNS & VOGEL (1993) und den umfangreichen Bericht zum Zisterzienserinnenkloster Kirchheim am Ries von WEISS (1996) hingewiesen. Aus diesem Bericht stammt auch Bild 66, welches die hydrogeologischen Verhältnisse erläutert.

Zunächst als Vorbereitung für die Tiefensondierung kann der Schichtaufbau im Umfeld eines Objektes durch Georadar ausgelotet werden, wobei sich unter günstigen Voraussetzungen einzelne Bodenhorizonte, Mauern oder Gräben detektieren lassen. Überblickskartierungen mit Georadar sind eine gute Hilfe, Schürfgräben und Bohrsondierungen gezielt platzieren zu können. Liegen die fraglichen Strukturen nicht zu tief, so kann auch die Geomagnetik eingesetzt werden.

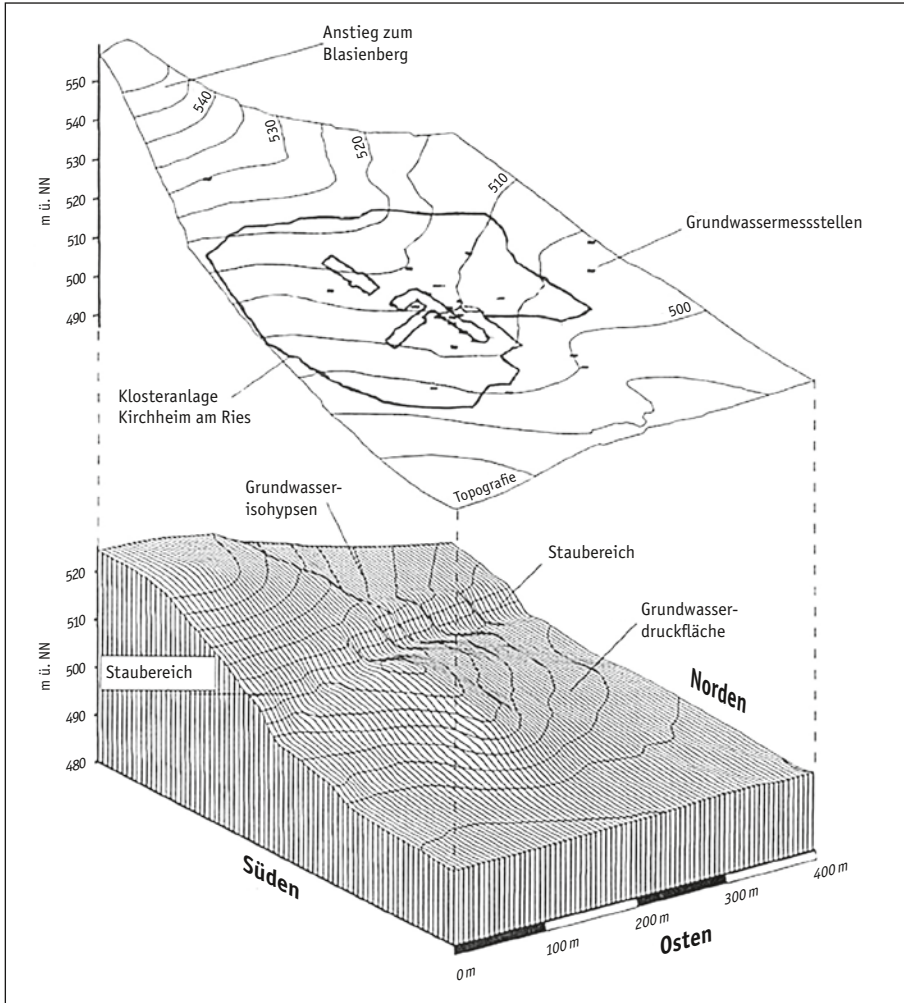


Bild 66: Grundwasserdruckfläche in der Umgebung von Kloster Kirchheim/Ries [BRAUNS & VOGEL (1993); WEISS (1996)]

5.5 Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen

Allgemein gültige Ratschläge für den Ablauf eines Untersuchungsprogramms lassen sich verständlicherweise nicht machen, da jeweils nur im Einzelfall richtig entschieden werden kann. Orientierungshilfen gibt die DIN ISO 22475. Wichtig erscheint jedoch, vor dem Einschalten einer umfangreichen Untersuchungsmaschinerie alle trivialen Schadensursachen wirklich ausgeschlossen zu haben. Dazu gehören beispielsweise undichte oder blind im Boden endende Regenfallrohre und nicht funktionstüchtige Sickergräben oder Drainagen. Gerade in diesem Punkt ist häufig größte Skepsis angebracht. Interessante Hinweise darauf, wie in vergleichbaren

Problemfällen Lösungen angegangen wurden, finden sich in der schon erwähnten Publikation zum Workshop »Geotechnik in der Denkmalpflege« [GÜDEHUS (1993)].

Hydrogeologische Untersuchungen sollen herausarbeiten, ob eine maßgebliche Feuchteeinwirkung aus dem Untergrund vorliegt, ob es sich um Grund- oder Oberflächenwässer handelt, ob diese vom näheren oder vom fernerer Einzugsbereich des Gebäudes stammen, und in welcher Weise der Nachschub unterbunden werden kann. In diesem Zusammenhang hat der Bericht Vorschläge darüber zu machen, inwieweit eine Drainage (DIN 4095) verbunden mit einer Vertikalisolierung geeignet ist, das Feuchteproblem zu lösen, oder ob begleitende Maßnahmen wie ein Tieferlegen des Bodenniveaus angebracht sind. Eine bloße Kiesschüttung ohne aktive Wasserableitung ist grundsätzlich problematisch, weil sie zu einer noch intensiveren Durchfeuchtung der Grundmauern beitragen kann. Werden solch einschneidende Vorschläge wie ein Umleiten oder Absenken des Grundwassers erwogen, darf zudem der Einfluss auf die Tragfähigkeit der Erdschichten nicht außer Acht gelassen werden. Sollten im angrenzenden Erdreich hohe Salzkontaminationen vorliegen, so ist eine Abschätzung darüber anzustellen, ob durch ein Abgraben des Erdreichs die Gefährdung des Mauerwerks durch Salze vermindert werden kann. Bei derartigen Eingriffen ist jedoch zu bedenken, dass die Standsicherheit des Mauerwerks in Mitleidenschaft gezogen werden kann. Die Freilegung des Gebäudesockels darf immer nur in kleinen Abschnitten erfolgen. Bei allen Planungen sollte man im Gedächtnis behalten, dass Kondensat im Innenraum für permanent hohe Feuchtegehalte im Mauerwerk verantwortlich sein kann. Gegen solche Einflüsse sind Maßnahmen im umgebenden Erdreich natürlich ohne Effekt. Jede der genannten Maßnahmen wird jedoch nicht zu einem schnellen Erfolg führen, da die Probleme der Feuchte- und Salzbelastung über Jahrzehnte, vielleicht sogar Jahrhunderte entstanden sind und sich nicht binnen Jahresfrist lösen lassen.

6 Bestandsaufnahme ***

Inhalt

6.1	Beschreibung der Materialien	***	137
6.1.1	Allgemeines.		137
6.1.2	Beschreibung der Materialien und deren Kartierung.	***	137
6.1.3	Ziele		138
6.2	Bauforschung	*	138
6.2.1	Allgemeines.		138
6.2.2	Methoden von Aufmaß und Planerstellung.	*	139
6.2.2.1	Verformungsgerechtes Handaufmaß.	*	140
6.2.2.2	Photogrammetrie	*	140
6.2.2.3	3-D-Techniken zur Vermessung von Objekten	*	141
6.2.2.4	Schnittzeichnungen	*	147
6.2.2.5	Foto-Entzerrung		151
6.2.2.6	Drohnen		151
6.2.3	Weitere Befunde: Inschriften, Steinmetzzeichen, Oberflächen- bearbeitung, Farbspuren	**	152
6.2.4	Ziele: Baualtersplan, Klärung der Konstruktion und Versetztechnik . . .	**	153
6.3	Zustand der Materialien	***	155
6.3.1	Allgemeine Anmerkungen		155
6.3.2	Kartierung der Natursteinschäden.	***	156
6.3.3	Kartierung der Fugenschäden	***	163
6.3.4	Ziel der Schadenskartierungen.		164
6.4	Untersuchungen zur Schadensdiagnose	***	165
6.4.1	Allgemeines.		165
6.4.2	Warum ein Probendokumentationssystem?	***	165
6.4.3	Welche Untersuchungen sind erforderlich?		167
6.4.4	Kennwerte des Feuchtetransports	***	167
6.4.5	Messung der Mauerwerksfeuchte	**	168
6.4.6	Salzbestimmung	**	169
6.4.7	Sorptionsisotherme	**	170
6.4.8	Festigkeitsmessungen	***	171
6.4.9	Schmutzkrusten	**	173
6.4.10	Biologische Besiedlung	*	174
6.4.11	Frühere Konservierungen.	**	175
6.4.12	Ziel des Auftrags: Zweite Schadensbewertung und Maßnahmen- vorschlag	***	175

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

6 Bestandsaufnahme

6.1 Beschreibung der Materialien

6.1.1 Allgemeines

Bei diesem Auftrag geht es zunächst nur um eine Kartierung der Materialien an dem betreffenden Objekt. Da im Mauerwerksverbund Natursteine und Fugenmörtel eine Einheit bilden, ist auch die Kartierung der Mörtel unter bauhistorischen und materialtechnischen Aspekten erforderlich. Voraussetzung für die Kartierung sind genaue Pläne, auf denen sich die einzelnen Quader an der Fassade genau zuordnen lassen, sowie Schnitte, welche die eigentliche Konstruktion des Mauerwerks mit ihren verschiedenen Materialien (z. B. einbindende Gesimse, Ziegelkerne, Blechabdeckungen etc.) darstellen.

6.1.2 Beschreibung der Materialien und deren Kartierung

Als erste Aufgabe steht an, die verschiedenen Natursteinvarietäten zu bestimmen, wofür unter Umständen Proben genommen werden müssen. Die Gesteine sind gemäß ihrer makroskopischen Eigenschaften zu beschreiben, d. h. hinsichtlich Farbe, Struktur, Textur etc., und sofern bekannt auch mit Namen oder geologischer Bezeichnung zu versehen (siehe Bild 67). Wer sich in der Gesteinsbestimmung nicht sicher zu Hause fühlt, kann die »Kleine Einführung in die Gesteinskunde« am Anfang dieses Leitfadens zu Rate ziehen.

Sind aufgrund der Archivalien die Herkunftsorte der Natursteine nicht bekannt, so ist es unter Umständen angebracht, die Suche nach den Originalsteinbrüchen im Rahmen dieses Auftrages durchführen zu lassen. In gleicher Weise sind die diversen Mörtelarten nach Farbe, Struktur, Zuschlag und Verarbeitung zu beschreiben und zu separieren. Der Fugenstrich und Struktur des Fugenmörtels können wichtige Hinweise zum Alter des Fugenmörtels geben. Um welche Mörtelarten es sich handelt, kann aus dem bloßen visuellen Befund meist nicht entschieden werden. Die nötige Mörtelanalyse liefert ein auf solche Fragen spezialisiertes Denkmalpflegelabor. Die Kartierung, die in erster Linie einen Überblick über die Verteilung der Materialien im Mauerwerk geben soll, sollte sich aber nach Möglichkeit auf optische Befunde beschränken und die petrographische Beschreibung der Gesteine bzw. Mörtel den späteren Untersuchungsphasen überlassen.

Selbstverständlich sind auch andere Materialien und deren Verbreitung wie flächige Überputzungen, Ziegelausbesserungen, Holzteile, Metallteile usw. zu beschreiben und zu kartieren.

6.1.3 Ziele

Als Ergebnis dieser Kartierungen soll die Verteilung der unterschiedlichen Materialien am Objekt vorliegen. Damit können unter Umständen zusätzliche Erkenntnisse zur Baugeschichte gewonnen und Erstaussagen zu Schäden gemacht werden. Die Kartierung ist ein wichtiges Dokument für die Zukunft, da aus ihr der heutige Bestand des Objektes hervorgeht.



Bild 67: Kartierung der Naturwerksteine am Westgiebel (Ausschnitt) der Klosterkirche Birkenfeld [SNETHLAGE et al. (1996); HERTLEIN (1991)]

6.2 Bauforschung

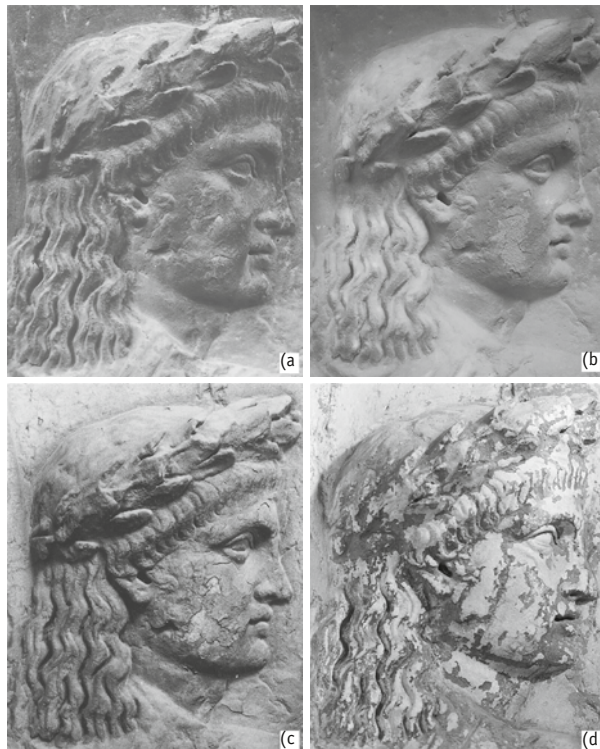
6.2.1 Allgemeines

Eine eingehende Erforschung der baulichen Gegebenheiten muss ohne Frage bei allen größeren Maßnahmen durchgeführt werden. Aber auch bei zunächst scheinbar unbedeutenden Objekten fördert eine gründliche Bauforschung oft völlig unerwartete Erkenntnisse zu Tage, welche deren Bedeutung erst im vollen Umfang entschlüsseln. Der große Wert der Bauforschung liegt vor allem darin, dass sie die verschiedenen Bau- und Nutzungsphasen im Verlauf der Geschichte offen legt und auf diese Weise unverzichtbare Grundlagen für das Erhaltungskonzept schafft. Jedes Bauteil, jeder Quader wird damit in einen Gesamtzusammenhang gestellt und erfährt dadurch seinen Wert als Zeuge der Baugeschichte. Meistens wird es sogar angebracht sein, die

Bauforschung, kombiniert mit der Archivrecherche (siehe Kapitel 3), vor die Kartierung der Materialien zu stellen, da diese Nachforschungen möglicherweise wichtige Hinweise zur Herkunft der Materialien und zum Monument an sich liefern. Gerade der Vergleich mit historischen Fotos ist – neben alten Plänen, Zeichnungen, Stichen und anderen Archivdokumenten – ein probates Mittel, um den Verfall von Gesteinen zu dokumentieren und die Ergebnisse jüngerer Konservierungsmaßnahmen zu beurteilen. So zeigen die Fotos des vom Kaiser Domitian (81–96 n. Chr.) erbauten Titusbogens in Rom den dramatischen Verfall der antiken Marmoroberfläche innerhalb von nur 70 Jahren bis hin zur nicht unumstrittenen neuen Restaurierung (Bild 68).

Bild 68: Rom, Titusbogen. Opferdiener (Camillus) auf dem berühmten Relief mit dem siebenarmigen Leuchter.

Nachdem die Marmoroberfläche über 1 900 Jahre lang nahezu intakt war, löst sie sich seit 1920 (a) über 1934 (b) bis zum Jahre 1979 (c) immer mehr auf. Die Restaurierung von 1990 (d) versucht, den Verfall zu stoppen, verändert aber merklich die typisch nuancierten und weich gerundeten Formen des sogenannten flavischen Barocks [CAIN et al. (2008), S. 248 Taf. 7].



6.2.2 Methoden von Aufmaß und Planerstellung

Die Darstellung der Ergebnisse aus der Bauforschung erfolgt – sofern der Bedeutung des Objekts oder den notwendigen Maßnahmen angemessen – in einem verformungsgerechten Aufmaß, welches die Maße des Objektes nicht einem Idealschema unterwirft, sondern den tatsächlichen Zustand der Bauelemente wiedergibt. Daneben liefern Schnitt-Zeichnungen, Schnitt-Skizzen und Detailschnitte die wertvollsten Ergebnisse. Auf sie sollte bei keiner Bauaufnahme und bei keiner bauhistorischen Untersuchung verzichtet werden. Als Nutzer der erstellten Pläne sollte man sich nicht von allzu schön aufbereiteten Plänen gefangen nehmen lassen, sondern die

Resultate immer kritisch hinterfragen. Die Dauerhaftigkeit, Archivierung und Lesbarkeit digitaler Pläne über Jahre hinaus ist ein eigenes Problem, auf das hier nur hingewiesen werden kann und das die gesamte digitale Dokumentation einschließlich Fotos betrifft.

6.2.2.1 Verformungsgerechtes Handaufmaß

Es gibt verschiedene Methoden, ein verformungsgerechtes Aufmaß zu erstellen, und man hat dabei zu entscheiden, mit welcher Methode man am besten zum gewünschten Ergebnis kommt – mit dem Handaufmaß unter Zuhilfenahme von Tachymetern (siehe Bild 69), der »klassischen« Photogrammetrie mit Stereokameras oder mit der digitalen Photogrammetrie, die eine Auswertung von fotografischen Dias erlaubt. Der klassisch ausgebildete Bauforscher wird dem Handaufmaß in vielen Fällen den Vorzug geben, weil damit, was ein unersetzlicher Vorteil ist, eine intensive Beschäftigung mit dem Bauwerk einhergeht, die weit über die abzubildende Oberfläche hinausgeht. Wie intensiv sich der Bauforscher mit dem Mauerwerk der Porta Prätoria auseinandergesetzt hat, ist daraus zu erkennen, dass auf jedem Quader die Beschaffenheit der Oberfläche nachgezeichnet ist. Festgehalten sind nicht nur Spuren der Werkzeuge, sondern auch strukturelle Charakteristika des Gesteins wie Einschlüsse, Löcher oder kleine Ausbrüche und Erhebungen.

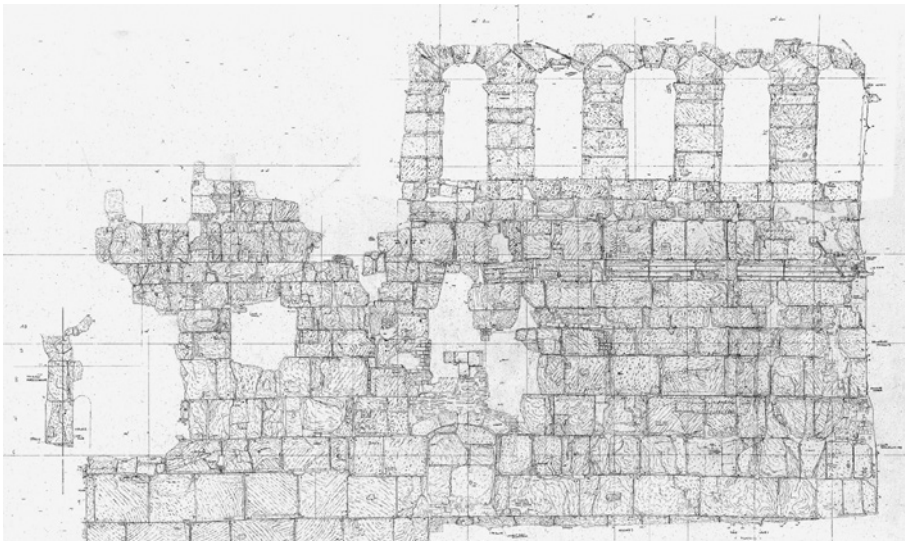


Bild 69: Formgerechtes Handaufmaß der Porta Prætoria in Regensburg [Plan: AUMÜLLER (2002)]

6.2.2.2 Photogrammetrie

Alle Methoden, auch die digitalen, erfordern einen hohen Zeitaufwand bei der Umsetzung, d. h. beim Zeichnen der Pläne. Die auf der Auswertung von Fotos basieren-

den photogrammetrischen Verfahren verlangen in fast allen Fällen die Nachkontrolle und Korrektur der Pläne am Objekt bzw. zumindest die gemeinsame Auswertung von Photogrammeter, Bauforscher und Restaurator, da viele Befunde auf den Fotos nicht ohne Weiteres interpretiert werden können. Aus diesem Grund hat jede Methode ihre Vor- und Nachteile, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll.

Mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie können verhältnismäßig einfach dreidimensionale Modelle mit Außen- und Innenansichten selbst von komplizierten Objekten hergestellt werden, z. B. mit dem an der RWTH Aachen entwickelten Programm PHIDIAS. Die in den 1990er-Jahren entwickelte Methode, die mit der Structure-from-Motion-Technik verwandt ist, entspricht jedoch heute nicht mehr dem Stand der Technik und ist mehr oder weniger vollständig von der 3-D-Vermessung mit dem Laser abgelöst worden.

6.2.2.3 3-D-Techniken zur Vermessung von Objekten

Schon seit vielen Jahren haben moderne 3-D-Techniken die klassischen Methoden für Aufmaß und Planerstellung, das Handaufmaß und die Photogrammetrie abgelöst. Diesen neuen Techniken liegt die elektronische Verarbeitung räumlicher Daten zu Grunde, die auf verschiedene Art erzeugt werden. Im Folgenden sollen diese neuen Techniken besprochen werden.

Structure from Motion SFM

Diese Art der Erstellung eines räumlichen Modells, die auch Mehrbild-Fotogrammetrie genannt wird, bedient sich einfacher fotografischer Aufnahmen des zu bearbeitenden Objekts. Sie wird vorzüglich bei Skulpturen angewendet. Der Bearbeiter umschreitet dabei das Objekt und fertigt zahlreiche Aufnahmen mit einer hochauflösenden Digitalkamera an, die sich zu mindestens 30 % überlappen sollten. Die Aufnahmen sollten auch alle Ansichten des Objekts erfassen, die in der Frontalansicht nicht sichtbar sind, also die Oberseiten von Kopf und Armen, Einschnitte in Gewandfalten u. s. w. Große Objekte müssen in zwei Ebenen aufgenommen werden.

Die Erstellung des 3-D-Modells erfolgt mit einer speziellen Software (Open Source Software Bundler). Diese erkennt die identischen Bildmerkmale auf benachbarten Aufnahmen und baut auf diese Weise eine räumliche Struktur auf. Das fertige Modell zeigt ein getreues Abbild der Oberfläche des Objekts.

Das Raummodell kann benutzt werden, um alle Arten von Befunden einzutragen und in räumlicher Darstellung zu betrachten. 2-D-Flächen können mit Hilfe entsprechender Kartiersoftware berechnet werden. Der Aufwand für die Berechnung von realen 3-D-Flächen erfordert einen wesentlich größeren Aufwand. Für diesen Zweck müssen die räumlichen Koordinaten von Kamera und Objektoberfläche integriert werden. Das bedeutet einen ziemlichen Rechenaufwand.

Um ein optisch ansprechendes Modell einer Skulptur zu erhalten, müssen die Beleuchtungsverhältnisse an allen Seiten möglichst gleich gut sein, weil sonst zu starke Helligkeitsunterschiede zum Beispiel zwischen Vorder- und Rückseite auftreten. Auch darf der Aufwand nicht unterschätzt werden, der bei komplizierten Skulpturen betrieben werden muss, um alle Extremitäten und Hinterschneidungen und Gewandfalten bildlich zu erfassen. Ist nämlich die fotografische Erfassung des Objekts lückenhaft, dann weist das Modell dort Fehlstellen auf, die keine Information enthalten.

Streifenlicht-Scanner

Bei dieser Methode wird das Objekt mit einem Streifenmuster bestrahlt, das aus einem normalen Beamer kommt. Trifft das Streifenmuster auf Unebenheiten einer Oberfläche, so werden die Streifen verzerrt. Technisch geht der Prozess so von staten, dass der Streifenlicht-Scanner über die Oberfläche wandert und gleichzeitig diese Wanderung mit der Verzerrung des Streifenbildes von zwei Kameras unter verschiedener Perspektive in Sekundenintervallen fotografiert wird. In Bild 70 ist der Messaufbau gezeigt.



Bild 70: Messaufbau eines Streifenlicht-Scanners. Links oben im Bild sind der Beamer und die zwei Kameras erkennbar.

Für die Rundum Belichtungen wird entweder die Figur gedreht oder Beamer und Kamera wandern um die Figur herum. Große Objekte müssen in zwei Ebenen aufgenommen werden, wozu ein stabiles, erschütterungsfreies Gerüst benötigt wird.

Die Auswertung und die Erzeugung des 3-D-Modells wird wieder mit einer speziellen Software vorgenommen. Die Technik erreicht eine hohe Genauigkeit $< 1\text{mm}$, je nach Abstand zwischen Scanner und Objekt. Es gelten ähnliche Vor- und Nachteile wie bei der Structure-from-Motion-Technik. Der Aufwand, bei einer komplizierten Skulptur alle frontal nicht sichtbaren Details zu erfassen, kann beträchtlich sein. Die Auf-

nahmen können nur bei hinreichender Dunkelheit, besser bei Nacht gemacht werden, weil bei Tageslicht das Streifenmuster nicht erkannt wird.

3-D-Laservermessung

Die Erstellung von 3-D-Modellen durch Laservermessung ist heute bekannter Stand der Technik. Mit Air-Borne-Lasern werden ganze Städte gescannt, die 3-D-Modelle mit gleichzeitig erstellten Bildern texturiert (belegt) und Benutzern zur Verfügung gestellt. In der Denkmalpflege spielen verschiedene Lasermethoden eine Rolle:

Terrestrischer Laser

Der Terrestrische Laser sitzt auf einem Stativ, dessen Position trigonometrisch genau vermessen wird. Auf dem Objekt befinden sich Messmarken, welche auf dem Laser-scan abgebildet sind. Deren Position ist ebenfalls trigonometrisch bestimmt. Der Laserstahl scannt in einem halben Kreisbogen von horizontal über vertikal bis horizontal das Objekt ab. Jedem Laserimpuls ist ein Winkel in x-y-Richtung beigemessen, der durch die Bewegung der Schrittmotoren vorgegeben ist. Zusätzlich findet, zum Beispiel durch das Impulslaufzeitverfahren, eine Entfernungsmessung zur Objekt-oberfläche statt. Damit ist jeder Punkt auf der Oberfläche räumlich definiert (Bild 71). Das Resultat einer Messung ist zunächst eine Punktwolke, aus der mit Hilfe einer speziellen Software ein 3-D-Modell errechnet werden kann.



Bild 71: Terrestrischer Scanner bei der Vermessung eines Bierkellers im Kellerwald Forchheim

Die Methode ist gut für große und weiträumige Objekte wie Kircheninnenräume geeignet. Wie bei allen anderen optischen Verfahren auch, müssen für abgeschattete Bereiche mehrfache Positionswechsel vorgenommen werden. Die Güte eines Scans erfährt man erst, wenn die Auswertung zu Hause auf dem Rechner abgeschlossen ist. Korrekturen sind dann nicht mehr möglich.

Handgeführter Laserscan

Die wohl beste Lösung für die Herstellung von 3-D-Modellen ist der handgeführte Laser. Der Bearbeiter führt den Laser langsam über die zu scannende Oberfläche. Auf dem Lasergehäuse befinden sich 9 Infrarotstrahler, deren Signale von drei Kameras empfangen werden, die auf einem sogenannten Kamerabalken fixiert sind. Damit ist die Lokalisierung des Lasers im Raum festgelegt. Die Kameras decken ein bestimmtes Raumvolumen ab, in dem der Scanner bewegt werden kann. Ist eine Oberfläche fertig abgescannt, muss entweder die Figur in eine neue Position gedreht oder der Kamerabalken umgesetzt werden. Bei größeren Skulpturen ist ein Gerüst erforderlich, um die höheren Partien mit dem Handstück erreichen zu können. Deshalb muss auch der Kamerabalken häufig auf ein Gerüst gestellt werden (Bild 72 und Bild 73).



Bild 72: Der handgeführte Laserscanner in Aktion



Bild 73: Handgeführter Scan vom Gerüst aus. Auch der Kamerabalken ist auf ein Gerüst gestellt.

Der große Vorteil dieser Methode ist, dass der Scan sofort verarbeitet wird und die gescannte Oberfläche unmittelbar auf dem Computerbildschirm sichtbar wird. Fehlstellen können deshalb gleich vor Ort nachgearbeitet werden. Ist die gesamte Figur gescannt, werden die einzelnen Teilscans zu Hause auf dem Computer zum fertigen 3-D-Modell zusammengefügt (»Matchen«). Wie beim Streifenlichtscanner darf das Tageslicht nicht zu hell sein, weil sonst die Infrarotsignale des Handstücks an den Kamerabalken nicht erkannt werden. Es ist deshalb vorzuziehen, in der Dämmerung oder im Dunkeln zu scannen.

Auch beim handgeführten Laser treten Schwierigkeiten mit dem Erfassen von engen Gewandfalten und Hinterschneidungen auf, weil das Handstück aufgrund seiner Größe nicht nah genug in die engen Räume geführt werden kann. Diese Fehlstellen müssen zum Beispiel mit Geomagic Studio nachgearbeitet werden, damit die Löcher geschlossen sind. Auf diese Weise wird ein komplettes 3-D-Modell generiert. Der Zeitaufwand für Matchen und Nachbearbeiten kann je nach Schwierigkeitsgrad beträchtlich sein. Für weitere Informationen siehe PFEUFFER (2018).

Das 3-D-Modell ist ausgezeichnet geeignet für die Kartierung von Verwitterungsphänomenen, wozu eine Software wie Geomagic Studio verwendet werden kann. Bild 74 zeigt den Apoll von den Neuen Kammern in Potsdam Sanssouci.



Bild 74: Apoll von den Neuen Kammern in Potsdam Sanssouci mit Kartierungen der Oberflächenrauheit

Das aus einem Laserscan generierte Objektmodell besitzt ein optisch wenig ansprechendes, flaves Aussehen, zeigt aber alle Details der Oberfläche. Deshalb belegt man die räumlichen 3-D-Modelle mit Abbildungen der realen Oberfläche, wobei man Orthofotos benötigt. Orthofotos sind Fotografien, welche an den Passpunkten des Laserscans ausgerichtet sind und entsprechend der Topografie des Objekts so korrigiert werden, dass sie auf das 3-D-Modell des Laserscans verzerrungsfrei aufgelegt werden können. (Laser-Farbscans sind zwar theoretisch machbar und möglich, haben in der Praxis aber noch keine Verbreitung gefunden). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Oberfläche des 3-D-Modells mit Fotos zu belegen, die zwar an den Passpunkten ausgerichtet, nicht jedoch als Orthofotos korrigiert sind. Schließlich kann man noch aus dem Laserscan sogenannte Orthobilder generieren, welche für eine erste Einzeichnung von Befunden sehr gut geeignet sind. Bild 75 zeigt das mit Laserscan erzeugte Modell des Bamberger Reiters ohne und mit texturierter Oberfläche.

In den vergangenen Jahren hat sich die 3-D-Vermessung mit Laserstrahlen zunehmend in der Praxis durchgesetzt, weil die Probleme der großen Datenmengen und der Zusammenfügung der Einzelscans kaum mehr Schwierigkeiten bereiten. Von Restauratoren wird das Structure-from-Motion Verfahren gern eingesetzt, weil der apparative und der Kostenaufwand gering sind. Lasermethoden sind deshalb vornehmlich Großprojekten vorbehalten.

Neben der Verwendung als Kartiergrundlage sind 3-D-Daten von Skulpturen für die Herstellung von Kopien von großem Vorteil. Aus den Daten können die Formen für Abgüsse generiert werden, ohne wie bisher die Oberfläche durch Silikonkautschukschichten zu strapazieren. Die 3-D-Daten können auch in 3-D-Fräsmaschinen und in 3-D-Drucker implementiert werden, um Modelle in verschiedenen Maßstäben zu erzeugen. Ob derart hergestellte Ornamente oder Skulpturen, deren Oberfläche vom Bildhauer bloß noch überarbeitet zu werden braucht, dem künstlerischen Ethos eines Bildhauers gerecht werden oder abzulehnen sind, kann hier nicht diskutiert werden.



Bild 75: Mittels Laser erzeugtes 3-D-Modell des Bamberger Reiters links ohne und rechts mit texturierter Oberfläche. (Nils Wetter, Universität Bamberg)

Neben der Erstellung von Plänen haben 3-D-Laserscans den unschätzbaren Vorteil, gleichzeitig den aktuellen Zustand des Objekts detailgenau zu dokumentieren, vgl. RESTAURO (2012). Veränderungen der Oberfläche können bis in Einzelheiten nachverfolgt werden. Die Genauigkeit eines Laserscans hängt von der Entfernung ab, aus der das Objekt gescannt wird. Sie liegt für Scandistanzen im Bereich von einem Meter bei ca. 0,3 mm. Für die Dokumentation von Skulpturen kommt meist ein Streifenlichtscanner zum Einsatz, dessen Genauigkeit die des Punktlasers noch übertrifft.

6.2.2.4 Schnittzeichnungen

Unabhängig davon, für welche Methode des verformungsgerechten Aufmaßes der Auftraggeber sich entscheidet, er sollte stets daran denken, dass das Ergebnis nicht nur die zweidimensionale Ansicht des Objektes zeigt, sofern statische Belange involviert sind. Wenn nämlich der Statiker seine Berechnungen anstellen will, benötigt er alle Materialquerschnitte, die man sich am besten gleich im Zuge der Bauforschung liefern lässt. Sehr häufig tritt diese Frage zum Beispiel bei Maßwerkfenstern auf, deren Streben millimetergenau in Breite und Tiefe vermessen werden müssen, um das Tragwerksmodell berechnen zu können. Hat man einen 3-D-Laserscan anfertigen lassen, stellt die Erzeugung von Querschnitten kein Problem dar, weil an jeder Stelle Schnitte angelegt und ausgemessen werden können. Bei den Schnitten geht es aber nicht nur um die Umrisse, sondern auch um das Innenleben der Bauteile. Insofern ist ein konstruktiver Schnitt vielleicht die aussagekräftigste aller Zeichendarstellungen. Denn hier fließen die Informationen der verschiedensten Quellen wie Handaufmaß, Fotos, Scans, Befundöffnungen, Archivrecherchen, historische Pläne usw. sowie deren Interpretationen zusammen. Ein Bauwerk kann man nicht verstehen, beurteilen und sanieren, wenn man nicht »hinter die Fassade« schaut.

Im Bauwesen definiert die DIN 1356 die Symbole der geschnittenen Bauteile und Materialien eindeutig (Bild 76). In der Bauforschung und der Restaurierungspraxis muss man sich nicht unbedingt daran halten, aber es ist im Sinne der Lesbarkeit, vor allem für Architekten und Bauingenieure, von Vorteil. Naturstein wird beispielsweise immer mit zwei parallelen Schraffurstrichen dargestellt.

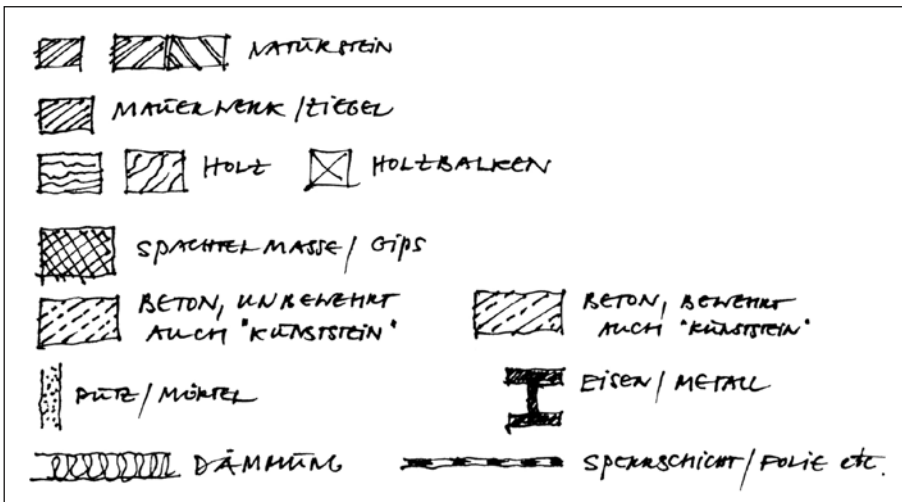


Bild 76: Symbole (Auswahl) für geschnittene Bauteile nach DIN 1356 (Zeichnung: M. Pfanner)

Vertikal- und Horizontalschnitte durch das gesamte Gebäude fördern das prinzipielle Verständnis für einen Bau. Beim Siegestor in München (Bild 77) sieht man auf einen

Blick, dass es nicht, wie es von außen den Anschein macht, aus massiven Natursteinblöcken besteht, sondern im Inneren aus Ziegelmauerwerk und großen Hohlräumen. Zudem offenbart sich die innen liegende Eisenkonstruktion, die als Innovation des 19. Jh. den Triumphbogen zusammenspannt.

Detailschnitte zeigen den konstruktiven Aufbau und die Kombination der verschiedenen Materialien in ausgewählten Bereichen (Bild 78). Sie sind bei komplexeren Monumenten unerlässlich und sollten gemäß Baufortschritt und Erkenntnisgewinn laufend ergänzt werden. Es ist darauf zu achten, dass jeder Plan (mindestens) folgende Angaben aufweist: Ort, Objekt, Datum, Plan-Verfasser, Plan-Nr., Art der Zeichnung (Ansicht, Schnitt usw.), Art des Aufmaßes (traditionelles Handaufmaß, Laserscan usw.), Bemaßung, Maßstab, Maßbalken, Nordpfeil, bei Bedarf Lageplan und Verweis auf weitere Pläne bzw. Lage der Schnittebenen. Werden die Pläne ergänzt, sind Datum und Plannummer, gegebenenfalls mit Index a, b, c zu ergänzen. Der Maßbalken sollte nie fehlen, denn bei Reproduktionen und Publikationen verändert sich meist der Maßstab und führt, falls er nicht berichtigt wird, den Benutzer des Plans in die Irre. Sehr sinnvoll und nützlich ist es, die Schnittzeichnungen mit Befundnummern oder erklärenden Beschriftungen zu versehen.

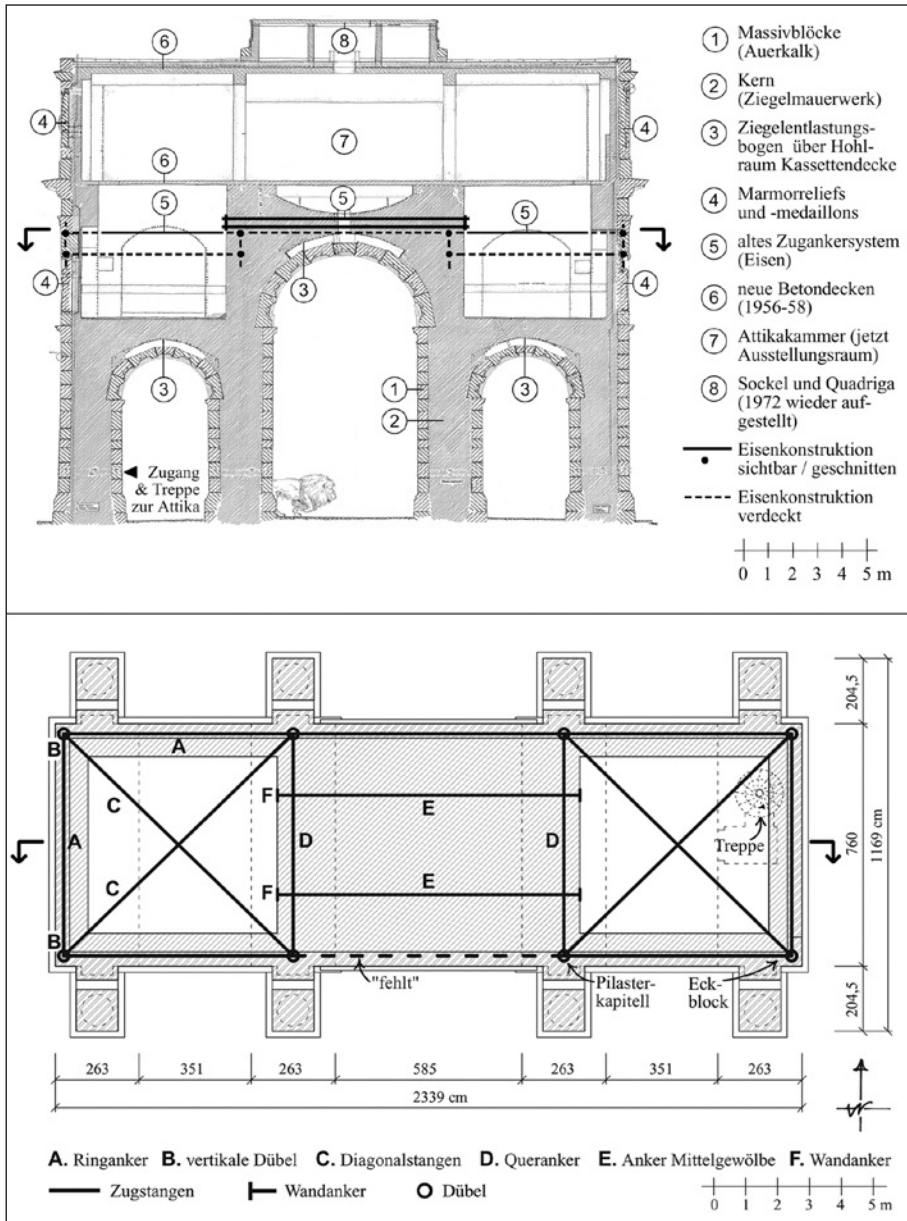


Bild 77: München, Siegestor. Vereinfachter Vertikalschnitt mit Blick nach Süden und Horizontalschnitt in Höhe der Kapitelle (ohne festen Maßstab), mit Einzeichnung der wichtigsten Bauteile und der inneren Zuganker (Zeichnung: L. Reichenbach; M. Pfanner).



150

6.2.2.5 Foto-Entzerrung

Ein probates Mittel, um schnell und kostengünstig Pläne und Kartierungsgrundlagen zu erstellen, ist die Foto-Entzerrung. Mit einer normalen Kamera fotografiert man vor Ort die Bereiche oder Objekte und nimmt einige typische und wichtige Maße. Mit Hilfe spezieller Programme lassen sich die Fotos am Computer entzerren und zu maßstabsgerechten Plänen zusammenfügen. Besonders geeignet sind u. a. einfachere Fassaden oder Fußböden (Bild 79). Die Entzerrung von Fotos findet dort ihre Grenzen, wo der Blickwinkel zu steil wird. Das entzerzte Bild hat dann nicht die Qualität eines rechtwinklig aufgenommenen Bildes.



Bild 79: Glyptothek München, S-Fassade. Links: Aufnahme mit normaler Kamera. Rechts: Gleicher Bereich als maßstäblicher Ansichtsplan aus mehreren entzerrten Fotos zusammengesetzt (Aufnahmen und Entzerrung: F. Winkler 2017).

6.2.2.6 Drohnen

Keine eigene Aufnahmeart, aber eine völlig andere Art des Zugangs stellen neuerdings Drohnen dar. Verglichen mit den klassischen Methoden kann eine solche »Befahrung« kurzfristig durchgeführt werden. Bis auf eine Reihe von Ausnahmen, geregelt durch die sogenannte Drohnenverordnung von 2017, ist bei vielen historischen Gebäuden ein Einsatz ohne Genehmigung möglich, eine Meldepflicht besteht aber immer. Es ergeben sich manche Vorteile: Selbst größere Gebäude lassen sich innerhalb eines Tages erfassen. Alle Fassadenflächen können in gleicher Qualität abgebildet werden. Eine umfassende Dokumentation vor und nach der Sanierung und

ohne störende Gerüste ist problemlos möglich. Die klassische Befahrung mit Hubsteiger ist dagegen meist aufwändiger, zeitintensiver und teurer.

Die Datenmengen sind enorm und bedürfen der Auswertung durch spezielle Software. In der Regel werden hierbei die luftgestützten, hochauflösenden Aufnahmen der Drohne mit den Messdaten eines vom Boden ausgeführten 3-D-Lasersans kombiniert. Die so gewonnenen Daten sind georeferenziert und ermöglichen eine verformungsgerechte Darstellung. Selbst Bereiche, welche vom Boden/Laser nicht erreicht werden, können dabei mittels des »Structure-from-Motion«-Prinzips ebenso dreidimensional erfasst werden, indem über den Querschnitt verteilte, stark überlappende Bilder aufgenommen werden. Neben einer ersten Beurteilung von Schäden lassen sich auf diese Art vorzügliche photogrammetrische Pläne gewinnen.

Durchgeführt werden solche Drohnenbefahrungen oft von spezialisierten Firmen, welche zuweilen auch an der Entwicklung der zur Auswertung benötigten Software beteiligt sind. Die Drohne wird am besten von zwei Leuten bedient. Einer ist für das Fliegen der Drohne zuständig, der andere bedient die Kamera (Bild 80).

Freilich kann die Drohnenbefahrung in der Steinsanierung die Autopsie nicht ersetzen. Um Schäden und Zustand richtig erfassen zu können, ist nach wie vor ein Befühlen und Abklopfen der Steine notwendig – von Probeentnahmen ganz zu schweigen. Das geschieht vom Hubsteiger oder vom Gerüst aus.



Bild 80: Drohnenbefahrung. Links: Einsatz über dem ehemaligen Kloster Thierhaupten. Rechts: Fernsteuerung mit Bildschirm, Planungsbüro Grassl (Aufnahmen: Pfanner 2019).

6.2.3 Weitere Befunde: Inschriften, Steinmetzzeichen, Oberflächenbearbeitung, Farbspuren

Inschriften, Steinmetzzeichen und nicht zuletzt die steinmetztechnischen Methoden der Oberflächenbearbeitung sind als wichtige historische Dokumente aufzunehmen und in das Aufmaß oder separate Pläne einzutragen. Beispiele für derartige Pläne finden sich in EICKELBERG et al. (1990). Einen guten Überblick zu Steinmetzzeichen und zu historischen Oberflächenbearbeitungen bieten FRIEDRICH (1932),

allgemein zu handwerklicher Werksteinbearbeitung [BERNHARD (1996), S. 51–61] und neuerdings das vorzügliche Buch von VÖLKLE (2016) zur Werkplanung und Steinbearbeitung im Mittelalter. Eine gezielte Analyse der Werkzeugspuren, vor allem aber der Fehler und Unfertigkeiten, erlauben Einblicke in Planung und Organisation der alten Steinmetzwerkstätten, wie man sie sonst kaum erhält [PFANNER (2015)]. Solche historischen Oberflächenbefunde werden eigens kartiert und dokumentiert und liefern die Grundlagen für die Ausweisung sogenannter Tabuzonen, welche bei der folgenden Konservierung mit besonderer Sorgfalt bedacht werden müssen.

Da die meisten Natursteinbauten und Einzeldenkmäler im Laufe ihrer Geschichte immer wieder farbig gefasst waren, nehmen die Suche nach Farbspuren und die Klärung der Farbstratigrafie breiten Raum in der Befunduntersuchung ein. Diese Untersuchungen, die häufig einer wahren »Spurensuche« gleichen, müssen mit großer Sorgfalt ausgeführt werden. Es erfordert Erfahrung und Geschick, an den »richtigen« Stellen zu suchen, um die Farbprogramme in richtiger Zeitfolge abwickeln und nachzeichnen zu können. Häufig ist die Befundsituation aber so bescheiden, dass keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können. Es ist in solchen Fällen entschieden davor zu warnen, die wenigen Befunde über Gebühr zu interpretieren, da die Gefahr für Fehlschlüsse zu groß ist. Die Form, in der solche Befunde dokumentiert werden sollten, wird z. B. in PURSCHE (1992) und SCHMIDT (1995 a und b) behandelt.

6.2.4 Ziele: Baualtersplan, Klärung der Konstruktion und Versetztechnik

Interpretiert man alle Befunde der Bauforschung, so erhält man einen Baualtersplan, welcher Entstehung und Nutzungen des Objektes im Laufe der Geschichte wiedergibt. Mit ihm erhält man eine vorzügliche Grundlage zu seinem Verständnis, mit deren Hilfe behutsame und denkmalgerechte Maßnahmen viel besser geplant und begründet werden können. Die Bauforschung soll deshalb nicht bei der Vermessung eines detailgetreuen Planes stehen bleiben, auf dem auch noch alle Oberflächenzustände naturgetreu nachgezeichnet sind. Die Untersuchungen sind so weit zu führen, dass die Konstruktion und die Versetztechnik des Objektes erkannt werden. Ein ausgezeichnetes Beispiel für die Bedeutung von Baualtersplänen und deren Bedeutung für eine denkmalgerechte Instandsetzung findet sich im Arbeitsheft 71 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege »Die Restaurierung von Schloss Oberschwappach« [Gmde. KNETZGAU & BLFD (1996)].

Nicht nur in den Fällen, wo eine Auswechslung der Teile droht, sind Aufmäße von Profilen oder Ornamenten anzufertigen, sofern sie noch nicht vorhanden sind. Diese Dokumente, die für die Zukunft erhalten bleiben, geben auch häufig Auskunft über Planungsänderungen oder zeitliche Einschnitte im Zuge der Erbauung.

Die besondere Bedeutung der Bauforschung liegt nicht nur in ihrem Nutzen für die Dokumentation und Zustandserfassung, sondern gerade auch im Erkenntnisgewinn

für die Restaurierung. Da sich erst durch die intensive Beschäftigung der Wert eines Objektes in seinem vollen Umfang erschließt, können unter Umständen Bauteile, die für die Geschichte des Objektes von außerordentlicher Aussagekraft sind, erkannt und erhalten werden, Teile, über die man ohne diese Studien vielleicht hinweggesehen hätte.

An der unter Ludwig I. von 1842–1863 erbauten Befreiungshalle, die hoch über Kelheim thront, gibt es immer wieder auffällige Risse im Kalkstein. Bestandsaufnahme, Konstruktionszeichnungen und Recherche zum Material bringen die Lösung (Bild 81). Die Steinblöcke wurden mit Eisenklammern verbunden. Diese rosten und die Volumenvergrößerung des Eisens sprengt den Stein. Das eher noch größere Problem bereitet die Bettung der Eisen. Dazu muss man wissen, dass um die Mitte des 19. Jh. Dübel, Klammern und Fugen gerne mit Schwefel vergossen wurden, was gegenüber Bleibettung Vorteile hat: Es geht schneller, ist billiger und der dünnflüssige Schwefel dringt in die feinsten Ritzen. Würde man Kalk- oder (Roman-)Zementmörtel verwenden, könnte man die Wintermonate über nicht arbeiten. Lange Zeit wurde diese marktfrische »Erfindung« freilich nicht praktiziert, denn bei Eindringen von Feuchtigkeit »explodiert« der Schwefel im Zusammenspiel mit dem Eisen regelrecht. Viele Schäden von 19. Jh.-Bauten gehen auf die Verwendung von Schwefel zurück, besonders drastisch beispielsweise beim Siegestor in München.

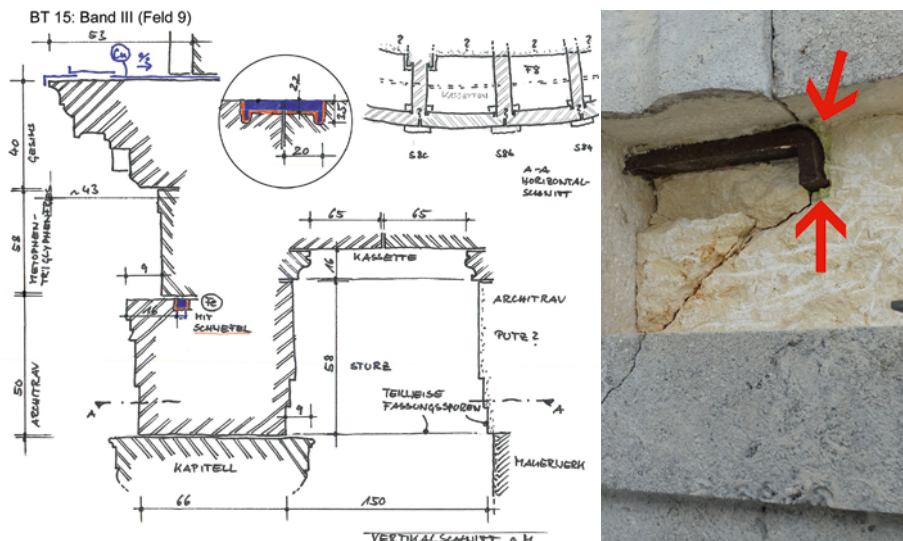


Bild 81: Befreiungshalle Kelheim. Links: Schnittdiagramm einer bauzeitlichen Eisenklammer, welche mit Schwefel ausgegossen wurde (Zeichnung: L. Heim). Rechts: Ausbau während Sanierung. Gut sichtbar sind der gelbliche Schwefel (Pfeile) und der von der Klammer ausgehende diagonale Riss (Aufnahme: Pfanner 2017).

6.3 Zustand der Materialien

6.3.1 Allgemeine Anmerkungen

Der nächste Schritt bei der Entwicklung eines Konservierungskonzepts sind die Schadenskartierungen, mit deren Hilfe man sich den erforderlichen Überblick über den Zustand der Materialien verschaffen kann. Diese Kartierungen sind so wichtig, dass man auf keinen Fall auf sie verzichten sollte. Ihre Ausführung erfordert das eingehende Studium der vorliegenden Situation, sodass ausreichend Zeit einzuplanen ist. Mindestens zwei Arten von Kartierungen – Natursteinschäden und Fugenschäden – sind, wie nachfolgend näher erläutert wird, nötig. Sie können in zwei getrennten Plänen angelegt sein, sollten aber immer zusammen interpretiert werden, weil ansonsten der Zusammenhang der Schäden verloren geht. Bevor man mit der Arbeit beginnt, darf man unter keinen Umständen versäumen, für die zu zeichnenden Pläne die entsprechenden Nummern des Orientierungssystems einzuholen.

Oftmals ist es sinnvoll, in einem ersten Schritt eine überschlägige Schadenserfassung in skizzenhafter Form zu erstellen, und zwar in einem kleinen und übersichtlichen Format (Bild 82). Das hat den Vorteil, dass man die wesentlichen Schäden und deren Kausalität schnell erkennt und dann gezielt weiter untersuchen kann. Sollten nur geringe finanzielle Mittel vorhanden sein oder ist das Zeitfenster sehr eng, ist die Methode ebenfalls geeignet, um mit einem Hubsteiger und entsprechender Fotodokumentation in kurzer Zeit zu einer einigermaßen aussagekräftigen Einschätzung zu gelangen. Dazu bedarf es freilich eines gewissen Erfahrungsschatzes.

Aus der Sicht des Praktikers ist zu entscheiden, mit welcher EDV und ob man überhaupt EDV-gestützt arbeiten möchte. Ohne Frage kann man mit Bildverarbeitungsprogrammen, von denen es eine Vielzahl auf dem Markt gibt, ausreichend präzise und vor allem optisch ansprechende Kartierungen erstellen. Werden höhere Ansprüche hinsichtlich quantitativer Flächenberechnungen gestellt, ist man genötigt, auf CAD-basierende Systeme oder auf spezielle Kartierungssoftware zurückzugreifen.

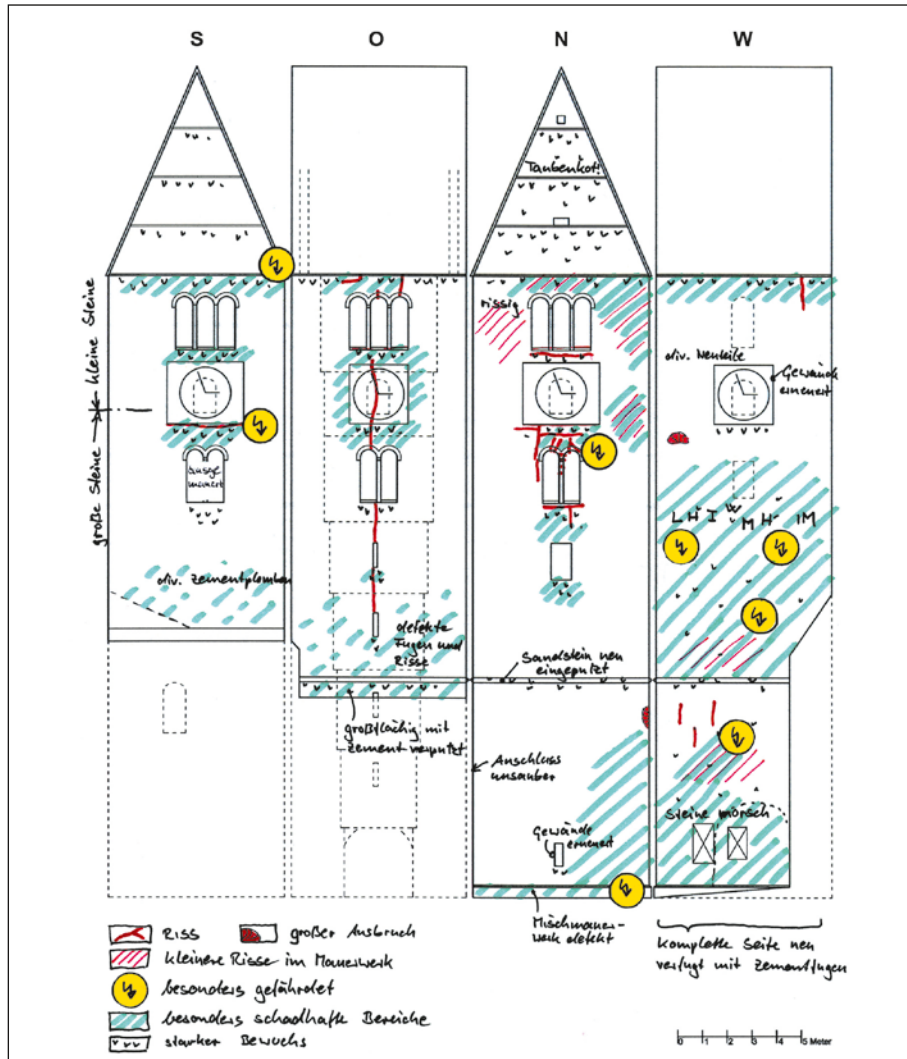


Bild 82: Untrasried (Allgäu), Sankt Sebastian, Kirchturm des 11. Jh., überschlägige und skizzenhafte Schadenserfassung der Tuffsteinfassade (ohne festen Maßstab) (Zeichnung: L. Reichenbach)

6.3.2 Kartierung der Natursteinschäden

Immer wieder kann man feststellen, dass Schadensformen an Gesteinen nicht richtig angesprochen und mit stets wechselnden, vom Bearbeiter frei gewählten Farben kartiert werden. Mit diesem Problem hat sich das im Jahr 2010 abgeschlossene DBU-Projekt »Natursteinmonitoring« befasst und einen Vorschlag für eine vereinfachte Schadenskartierung vorgelegt [AURAS et al. (2010)], die auf dem von FITZNER et. al.

(1996) entwickelten System aufbaut, welches wiederum den Inhalt des international verbindlichen Schadensglossars von Icomos Iscs (2010) geprägt hat. Diese Kartierung listet insgesamt 18 Schadensformen auf, die entweder mit Farben oder mit Schraffuren gekennzeichnet werden können (siehe Bild 83). Die Zahl von 18 Schadensformen scheint auf den ersten Blick für eine vereinfachte Schadenskartierung reichlich umfangreich, ist aber unverzichtbar für die präzise Erfassung der Schäden. Nicht berücksichtigt sind Übergangsformen zwischen den reinen Schadensformen. Auch auf die Abstufung nach Schadensintensitäten wurde verzichtet, die in der 3. Auflage des Leitfadens noch dargestellt worden war. Ist eine Kartierung der Schäden an einer Skulptur verlangt, sind die Verluste von Extremitäten oder anderen Teilen besonders aufzulisten. Es ist zu wünschen, dass sich das vereinfachte Kartiersystem in der Praxis durchsetzt, damit sich Schadenskartierungen künftig ähnlich klar und eindeutig lesen lassen wie geologische Kartierungen oder Architekturpläne.

Sollte es vorkommen, dass das vereinfachte Kartiersystem nicht ausreicht, die beobachteten Schäden mit der erforderlichen Genauigkeit zu kartieren, so kann das Glossar um die objektspezifischen Schadensformen jederzeit erweitert werden. Für eine Kartierung, die hauptsächlich wissenschaftliche Zwecke verfolgt, steht selbstverständlich weiterhin die Kartiervorlage von KOWNATZKI & FITZNER (1999) und FITZNER & HEINRICHS (2002) zur Verfügung, welche alle Feinheiten wie Übergangsformen und Intensitätsabstufungen enthält.

Zusätzliche Informationen über Schadensformen und deren Definition finden sich in YOUNG et al. (2003). Das »Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns« ist in englischer, französischer und deutscher Übersetzung auf der Webseite von ICOMOS-ISCS (International Scientific Committee for Stone, www.international.icomos.org, Stand Juli 2019) verfügbar. Das ICOMOS-Glossar ist besonders hilfreich bei der Suche nach korrekten Definitionen, denn es enthält vorzügliche Abbildungen zur Veranschaulichung der Schadensformen. Auch ist es eine große Hilfe bei der korrekten Übersetzung der deutschen Begriffe in die englische oder französische Sprache. Zwischenzeitlich sind auch Übersetzungen in Spanisch, Portugiesisch, Chinesisch und weitere Sprachen erschienen. Darüber hinaus existiert eine Reihe von geeigneten Vorlagen, an denen man sich bei der Durchführung einer Schadenskartierung orientieren kann [EIKELBERG et al. (1990); FITZNER et al. (1991); FITZNER et al. (1996); ECKSTEIN (1999)].

Bei der Ausführung einer Schadenskartierung sollte man sich stets in Erinnerung rufen, nur die phänomenologisch erkennbare Schadensform zu kartieren und nicht genetisch zu interpretieren, was den nachfolgenden Untersuchungen vorbehalten bleibt. Während Schadensformen wie Absanden, Abschuppen oder Schalenbildung leicht verständlich sind, bedürfen die bei FITZNER (1996) unter Gesteinsverlust subsummierten Definitionen Rückwitterung und Relief einer genaueren Betrachtung.

Während die erste Gruppe den aktiven Prozess beschreibt, bezeichnet die zweite den eingetretenen Zustand.

DBU - Projekt Monitoring: Kartierung Schadensphänomene Naturstein/ Kunststein/ SES						
Merkmal/Bezeichnung	Ziffer/Buchstabe			Symbol	Signatur	Farbton
Absanden	1	A	I	△		RAL 1016 Stabilo 8744 alt Stabilo 87/205
Reliefbildung	2	B	II	△		RAL 1033 Stabilo 8734 alt Stabilo 87/215
Abschuppen	3	C	III	▽		RAL 2008 Stabilo 8754 alt Stabilo 87/235
Schalenbildung	4	D	IV	▽		RAL 3002 Stabilo 8748 alt Stabilo 87/315
Ausbruch/ Fehlstelle	5	E	V	□		RAL 3015 Stabilo 8729 alt Stabilo 87/355
Aufblättern	6	F	VI	□		RAL 4006 Stabilo 8727 alt Stabilo 87/340
Salzausblühungen	7	G	VII	◇		RAL 5012 Stabilo 8757 alt Stabilo 87/450
Feuchte Stellen	8	H	VIII	◇		RAL 5002 Stabilo 8732 alt Stabilo 87/405
Besiedelung durch Pflanzen	9	I	IX	○		RAL 6017 Stabilo 8733 alt Stabilo 87/575
Mikrobielle Besiedlung	10	J	X	⊖		RAL 6005 Stabilo 8743 alt Stabilo 87/520
Abbröckeln	11	K	XI	⊕		RAL 8001 Stabilo 8739 alt Stabilo 87/685
defekte Steinersatzmasse	12	L	XII	⊕		RAL 8014 Stabilo 8745 alt Stabilo 87/635
Krustenbildung	13	M	XIII	◇		
Verschmutzungen	14	N	XIV	⊕		
Verfärbungen	15	O	XV			
Rissbildung	16	P	XVI			
defekte Fuge	17	Q	XVII			
Verformung	18	R	XVIII	▼		

Bild 83: Kennfarben und Signaturen für die Schadenskartierung nach DBU-Projekt »Monitoring«
[siehe auch AURAS et al. (2010)]

FITZNER et al. (1996) definieren Rückwitterung als »einheitliches Zurückwittern parallel zur ursprünglichen Gesteinsoberfläche«. Die Übersignatur für Rückwitterung kann auch auf die aktive Verwitterungsform der rückgewitterten Oberfläche, zum Beispiel Abschuppen, eingetragen werden. Sehr ähnlich wird der Terminus Relief behandelt. FITZNER et al. (1996) definieren Relief als »Veränderung der Morphologie der Gesteinsoberfläche in Folge partiellem oder selektivem Auswittern«. Insgesamt werden bis zu acht unterschiedliche Reliefformen unterschieden, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll. Am wichtigsten erscheinen wohl die Begriffe: Zurundung/Eintiefung, Alveolarverwitterung, texturabhängige Auswitterung und Herauswittern von Gesteinskomponenten.

Mit Hilfe der Schadensform Relief kann der Unterschied zwischen Schadenszustand (Relief) und Schadensprozess (Absanden, Abschuppen) besonders deutlich erläutert werden. Der Schadenszustand Relief ist ohne einen erzeugenden Prozess, z. B. Absanden, nicht erklärbar. Andererseits kann aber der Fall vorliegen, dass der Relief erzeugende Prozess zum Stillstand gekommen ist oder so langsam voranschreitet, dass die durch ihn erzeugte Form in einem zumindest virtuell stabilen Zustand vorliegt. Die Reliefsignatur kann sowohl für sich allein genommen bei stabilem Zustand der Oberfläche als auch als Übersignatur auf die Kennfarbe des aktiven Schadensprozesses eingetragen werden.

An Hand derartiger Beispiele lassen sich die unterschiedlichen Zielsetzungen von Kartierungen sehr einleuchtend erklären. Zielt die Kartierung auf die Beschreibung des eingetretenen bzw. vorliegenden Zustands ab, stehen die Reliefformen im Vordergrund, strebt man die Umsetzung in eine Maßnahmenkartierung an, so haben selbstverständlich die aktiven Schadensprozesse, denen mit einer Konservierung begegnet werden soll, Vorrang.

Bild 84 zeigt typische Beispiele zu den in der Liste angeführten Schadensformen. Viele der Bilder stammen von flächenmäßig eng begrenzten Fassadenausschnitten, um zu demonstrieren, dass alle Schadensformen sehr eng beieinander liegen und ineinander übergehen können. Dabei ist erkennbar, dass sich verschiedene Schadensformen auf einem Quader abwechseln können, sodass sich die Frage stellt, wie detailliert eine Schadenskartierung im Regelfall ausgeführt werden sollte. Eine generelle Antwort gibt es hier nicht, weil praktische und wissenschaftliche Ansprüche konkurrieren. Im Sinne einer klaren und übersichtlichen Kartierung sollte man sich jedoch für das dominante Schadensbild eines jeden Quaders entscheiden. Ist das nicht möglich, oder strebt man eine bessere Auflösung an, so können die Gesteinsquader unterteilt und jedem Teil sein charakteristisches Schadensbild zugewiesen werden.

Schadensform Gesteinsverlust



Rückwitterung durch
Schalenverlust



Relief durch Absanden
(Alveolar-
verwitterung)



Relief durch
Absanden



Ausbruch durch
mechanische
Einwirkung

Schadensform Gesteinsabblösung



Absanden



Abschuppen



Abschalen



Abbröckeln



Aufblättern



Aufspalten

Bild 84: Auswahl wichtiger Schadensformen in der Nomenklatur von FITZNER et al. (1996)
[siehe auch AURAS et al. (2010)]

Schadensform Risse



Lagerparallele Risse



Texturunabhängige Risse

Schadensform Farbänderung/Ablagerung



Verfärbung



Effloreszenz

Verschmutzung
VogelkotBiologische
Besiedlung Grünalgen

Trockenkruste

Biologische
Besiedlung Flechten

Feuchtkruste

Vom jeweiligen Zweck einer Kartierung ist es abhängig zu machen, ob auf verschiedene Schadensintensitäten eingegangen werden soll oder nicht. Besteht ein Hauptanliegen der Kartierung darin, für spätere Zeiten eine Dokumentation des Schadensumfanges anzulegen, ist es auf jeden Fall angebracht, unterschiedliche Schadensintensitäten zu kartieren. Steht dagegen eher die Vorbereitung einer Maßnahmenkartierung im Vordergrund, ist es wahrscheinlich günstiger, sich auf Hauptschadensformen zu beschränken, wobei man in diesem Falle am besten bereits die Art der Maßnahmen berücksichtigt, welche einer bestimmten Schadensform zugeordnet sein werden. Auf diese Weise resultiert dann zu jeder Schadensform eine charakteristische Konservierungsmaßnahme. Beispiele für eine vereinfachte und eine ausführliche Schadenskartierung zeigen Bild 85 und Bild 86.

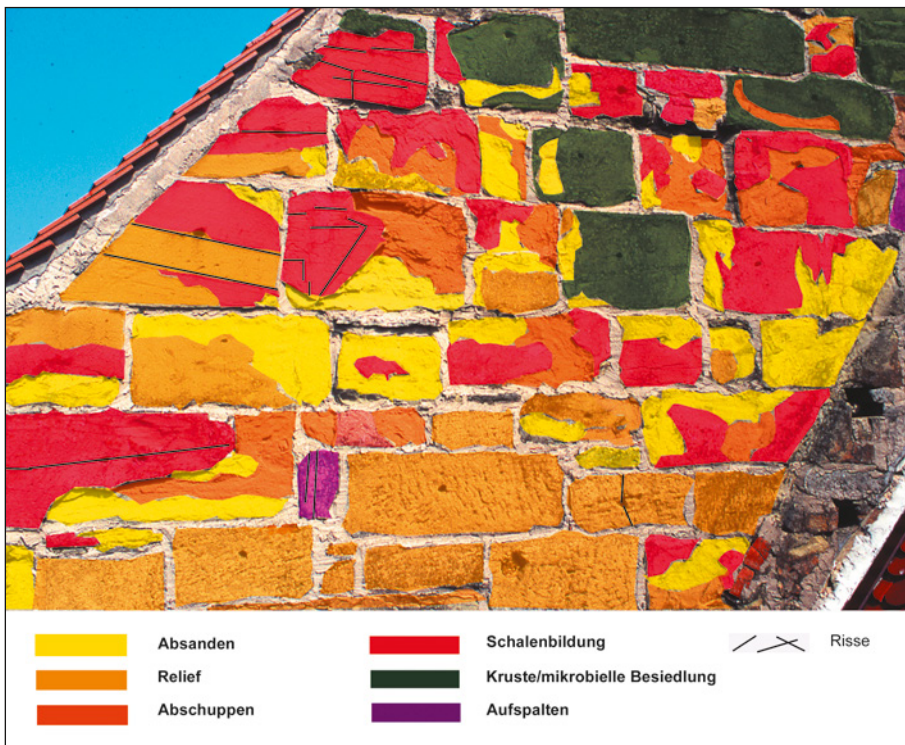


Bild 85: Vereinfachte Schadenskartierung am Westgiebel (Ausschnitt) der Klosterkirche Birkenfeld nach dem Farbschema des DBU-Projekts Monitoring [siehe auch AURAS et al. (2010); Plan nach HERTLEIN (1991)]

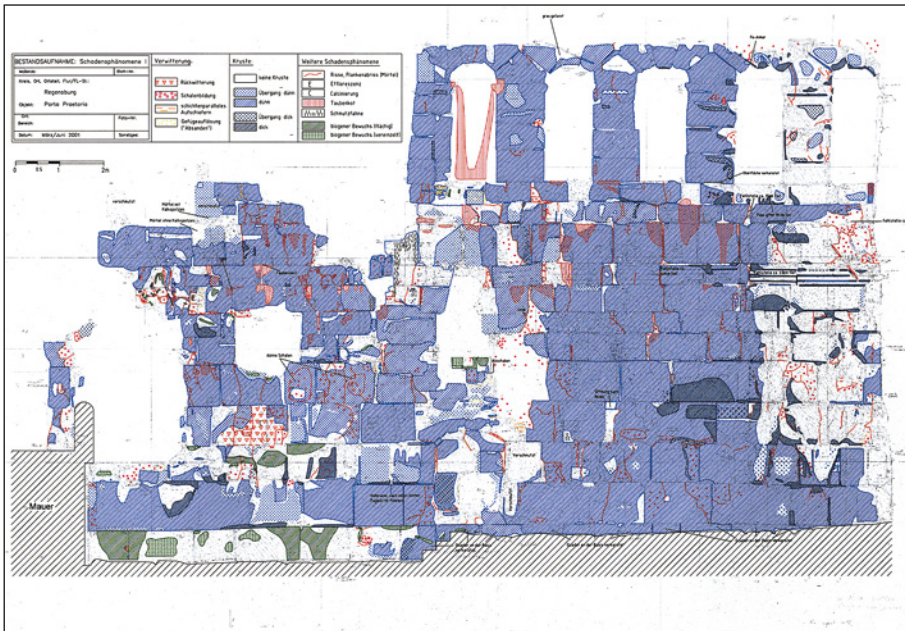


Bild 86: Detaillierte Kartierung der Natursteinschäden an der Porta Prätoria in Regensburg [DREWELLO et al. (2002); Plangrundlage AUMÜLLER (2002)]

6.3.3 Kartierung der Fugenschäden

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist es manchmal günstiger, den Zustand der Fugen in einem extra Plan zu kartieren (Bild 87), da sich die Fugen wegen ihrer geringen Breite nur sehr schlecht abheben. In manchen Fällen mag es ausreichen, die Fugenschäden bereits in die Steinkartierung (siehe 6.1.2) einzutragen.

Da beim Fugenmörtel die Schäden sehr stark von dessen Zusammensetzung abhängen, kann sich fallweise die Möglichkeit ergeben, Mörtelarten und deren typischen Schäden mit einer gemeinsamen Farbe zu bezeichnen. Für die Mörtelkartierung gibt es bislang nur wenige Vorlagen, weswegen man sich bei der Farbauswahl an vergleichbaren Natursteinschäden orientieren sollte, z.B. sollten abgelöste (absandende) Fugendeckmörtel mit der gleichen Farbsignatur kartiert werden wie Schalenbildung (Absanden) beim Naturstein.

In gleicher Weise wie bei den Natursteinschäden dürfte es von Vorteil sein, die Differenzierung der Schadenstypen nicht zu weit zu treiben, sondern sich vielmehr gedanklich bereits an den durchzuführenden Maßnahmen zu orientieren, damit Schadenstyp und Maßnahme mit gleichen Farben angelegt werden können.

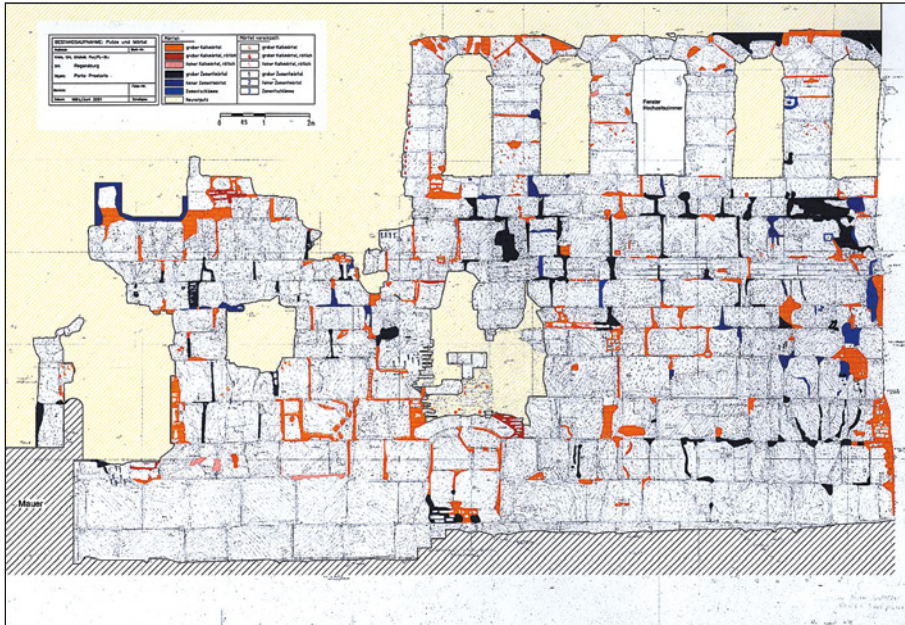


Bild 87: Detaillierte Kartierung der Mörtelphasen am Kalksteinmauerwerk der Porta Prætoria in Regensburg [DREWELLO et al. (2002); Plangrundlage AUMÜLLER (2002)]

Die Schäden an den häufig anzutreffenden, flächigen Überputzungen alter Natursteinschäden sind am besten ebenfalls in die Mörtelkartierung einzuzeichnen. Für eine Mörtelkartierung ist also ein Plan erforderlich, der den Fugenverlauf exakt wiedergibt. Schematische Pläne mit einem idealisierten Fugenbild in Form eines Fugenstrichs sind ungeeignet und abzulehnen.

6.3.4 Ziel der Schadenskartierungen

Das Ziel dieser Kartierungen soll eine erste Schadensbewertung sein. Da hierbei in besonderem Maße die auf bauliche Gegebenheiten zurückgehenden Schäden erfasst werden, können aus deren Verteilung bereits Schadensursachen entschlüsselt und erste Abhilfemaßnahmen aufgezeigt werden. Aus Art und Umfang der Schadensverteilungen können die nachfolgenden Untersuchungen, die zur weiteren Aufklärung von Schäden und zur Vorbereitung von Konservierungsschritten nötig sind, festgelegt werden. Diese tiefer gehenden Untersuchungen wenden sich meistens speziellen Schadensformen, wie z. B. der Schalenbildung oder dem Absanden zu. Beide Kartierungen, sowohl die für Natursteinschäden als auch die für Fugenmörtelschäden, sind unverzichtbare Bestandteile einer jeden Steinkonservierungsmaßnahme.

Es versteht sich von selbst, Art und Intensität der Kartierung dem Objekt und seiner Bedeutung anzupassen. Skulpturen, Reliefs und Bauornamente werden normaler-

weise eine detailliertere Untersuchung erfordern als glatte und wenig strukturierte Fassaden. Während bei kleinteiligen Schmuckobjekten und bedeutenden Kunstwerken eine genau aufgeschlüsselte Kartierung immer gefordert ist, kann sich das Schadensglossar an Baufassaden in größeren Kategorien bewegen. Dies gebietet nicht zuletzt das Gebot der Verhältnismäßigkeit und der damit einhergehenden Wirtschaftlichkeit.

6.4 Untersuchungen zur Schadensdiagnose

6.4.1 Allgemeines

Bei diesen Untersuchungen geht es um die Aufgabe, anhand von geeigneten Messmethoden den Zustand des Steinmaterials zu bestimmen, um damit die Grundlage für den späteren Vergleich unbehandelt – behandelt zu legen. Der Umfang an einzusetzender Analytik kann hier nicht im Einzelnen beschrieben werden. Es sind deshalb erfahrene Fachleute einzuschalten, welche im Auftrag der Projektleitung und in Absprache mit den Fachbehörden ein Programm für die erforderlichen Untersuchungen ausarbeiten. Es ist im Regelfall mindestens ein Ortstermin erforderlich, um die Vorschläge zu besprechen. In den folgenden Ausführungen wird die Bedeutung einzelner Untersuchungen beispielhaft erläutert.

6.4.2 Warum ein Probendokumentationssystem?

Bevor die Untersuchungen beginnen können, ist zunächst eine Vorgabe zu erfüllen, deren Wichtigkeit nicht ernst genug genommen werden kann. Für alle Proben müssen zunächst die entsprechenden Informationen aus dem Orientierungssystem eingeholt werden, damit diese widerspruchsfrei geordnet werden können. Gegebenenfalls muss das Orientierungssystem erweitert oder ergänzt werden, damit auch für die Proben ein schlüssiges Dokumentationssystem entsteht. Hat man sich für ein digitales Archivsystem wie »MonArch« entschieden, ist die Entnahmestelle jeder Probe durch die genaue Positionierung der beprobten Steinquader praktisch schon vorgegeben, sodass man sich einige Mühe ersparen kann. Es empfiehlt sich also, die Probendokumentation gründlich zu überlegen und in einem Testlauf zu erproben, damit das System später nicht mehr geändert zu werden braucht. Es ist ein unschätzbare Gewinn für ein zügiges Arbeiten und vor allem für die Ordnung des Abschlussberichts. Auch folgende Generationen, die sich später mit dem Objekt zu beschäftigen haben, werden einen nicht zu unterschätzenden Nutzen davon haben. Ein Beispiel für ein Probendokumentationssystem wird in der folgenden Tabelle 4 gegeben:

Tabelle 4: Vorschlag für ein Probendokumentationssystem

Proben-Archiv P	lfd. Nr.	Art der Probe	Probenahme	Teilobjekt	Fragestellung	Institut, Firma, Person	Bericht	Ablage des Berichts
P	1	Schabe- probe	01.10.95	N-Fassade Quader Nr.	Kruste, Salze	BLfD Snethlage	Titel 01.11.95	BLfD SHBA
P	2	Kern	01.10.95	S-Fassade Quader Nr.	Salzprofil, Feuchte- profil	BLfD Snethlage	Titel 01.11.95	BLfD SHBA
P	n	Kern	01.10.95	O-Fassade Quader Nr.	Verwitte- rungstiefe	BLfD Snethlage	Titel 01.11.95	BLfD SHBA

In einem Dokumentationssystem ist die laufende Probennummer besonders wichtig, da nur sie dem Bearbeiter angibt, an welcher Stelle in der Folge früherer Probenentnahmen er sich derzeit befindet. Die Probenzahl sollte auf das notwendige Minimum beschränkt werden. Voraussetzung für die Funktion des Dokumentationssystems ist natürlich, dass die einzelnen Bauteile vorab im Orientierungssystem genau bezeichnet sind, und dass der Koordinator vorab einen Überblick über die früher schon entnommenen Proben besitzt. Die beiden letzten Spalten werden erst später ausgefüllt. Sie dokumentieren, ob auch zu jeder Probe ein Untersuchungsbericht abgeliefert wurde, im Zweifelsfall ein gutes Argument gegen überzogene Probenwünsche.

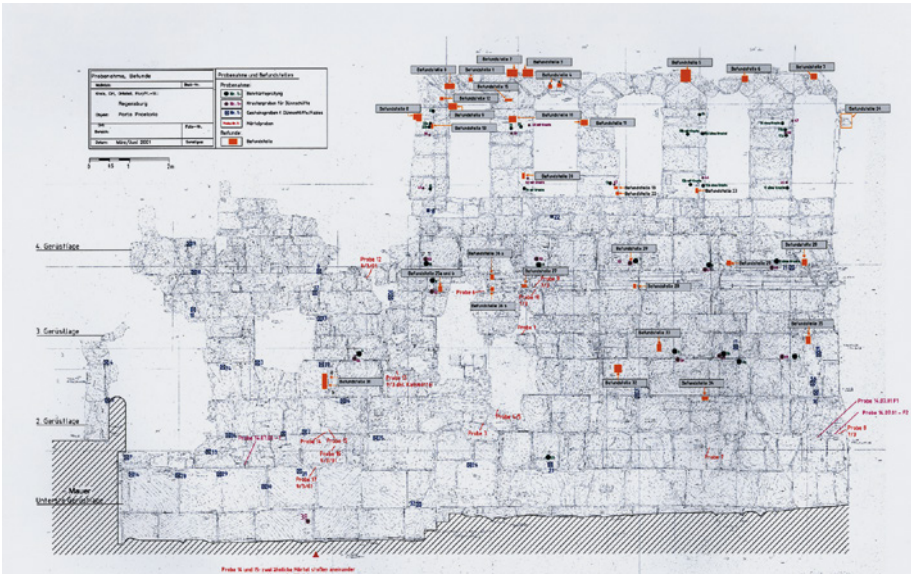


Bild 88: Probenbefundplan an der Porta Prätoria in Regensburg [DREWELLO et al. (2002); Plangrundlage AUMÜLLER (2002)]

Zusätzlich zur rein deskriptiven Dokumentation empfiehlt sich eine grafische Dokumentation der Probenahmepunkte auf einem Fassadenplan, was im digitalen Archivsystem »MonArch« zwangsläufig der Fall ist, weil die Struktur dieses Archivsystems auf Planvorlagen aufbaut. Ein anschauliches Beispiel ist in Bild 88 gezeigt.

6.4.3 Welche Untersuchungen sind erforderlich?

Die wichtigsten Untersuchungen zur Schadensdiagnose betreffen zweifelsohne Bestimmungen des Wasseraufnahmeverhaltens, des Salzgehaltes, des aktuellen Feuchtegehalts im Gestein und natürlich der Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Salzgehalt, Feuchtegehalt und Festigkeit müssen unter allen Umständen tiefenabhängig entlang eines Profils gemessen werden. Die Messungen sind für alle an dem Gebäude unterschiedenen Gesteinstypen vorzunehmen. Nach Bedarf sind auch Untersuchungen zum Risikopotential von Verschmutzungen angebracht.

Aus dieser Aufzählung lässt sich unschwer erkennen, dass im Einzelfall eine Vielzahl von Analysen erforderlich sein kann, welche den Untersuchungskatalog beträchtlich erweitern. Im Vordergrund muss jedoch immer der Nutzen für die Konservierungsmaßnahmen stehen, deren Planung auf den Ergebnissen dieser Voruntersuchungen aufbaut. Weitere, eventuell erforderliche Untersuchungen sind deshalb den Tabellen zu entnehmen, die im Arbeitsschritt 9 »Laboruntersuchungen zur Konservierung« aufgeführt sind.

6.4.4 Kennwerte des Feuchtetransports

Die Kenngrößen des Feuchtetransports (w-Wert, B-Wert, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , hygri sche Dehnung) gehören zu den Basisdaten für jedes Gestein. Ihre Ermittlung setzt die Entnahme von Proben voraus, da die Messungen nur im Labor ausgeführt werden können. Um die Anzahl der Proben aber so gering wie möglich zu halten, kann man bei der Wasseraufnahme auf das Karsten'sche Prüfröhrchen zurückgreifen, mit dem der w-Wert zerstörungsfrei an beliebig vielen Stellen der Fassade bestimmt werden kann (zur Messung mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen siehe WENDLER & SNETHLAGE 1989 und AURAS et al. 2010). Unter bestimmten Voraussetzungen kann auch der Wassereindringkoeffizient abgeleitet werden. Um die Veränderlichkeit des w-Werts auf einer Fassade besser interpretieren zu können, wird es in vielen Fällen hilfreich sein, ergänzende Messungen des biologischen Befalls zu veranlassen.

6.4.5 Messung der Mauerwerksfeuchte

Der Sinn der Messungen besteht darin, aus der Verteilung der Feuchte Hinweise auf deren Ursachen abzuleiten. Aufsteigende Feuchte, Schlagregenbelastung oder rückwärtige Durchfeuchtung ergeben jeweils andere Verteilungsprofile. Vor einer Entnahme von Proben sollte aber zunächst mit einfachen Messgeräten eine Übersichtsmessung und eine Eingrenzung derjenigen Abschnitte vorgenommen werden, an denen die weiteren Messungen zielgerichtet durchgeführt werden können.

Bei der Festlegung des Untersuchungsplans ist zu berücksichtigen, ob in periodischen Abständen Messungen des zeitlichen Verlaufs des Feuchtegehalts vorgenommen werden müssen. Für Messungen von der Oberfläche aus stehen die Leitfähigkeits- oder Kapazitätsmessung, die Mikrowellenmessung oder die Neutronensonde und die Gamma-Absorption zur Verfügung. Bei allen derzeit verfügbaren Feuchtemessmethoden, in Besonderheit aber bei der Leitfähigkeits- und Kapazitätsmessung, darf nicht übersehen werden, dass Messumfang und Messgenauigkeiten völlig unzureichend sein können [ARENDE (1994)]. Die genannten Methoden integrieren ganz oder teilweise über den betreffenden Mauerwerksquerschnitt, selbst wenn man in Betracht zieht, dass durch die Wahl des Sondenabstands mehr oder weniger tiefe Mauerwerksbereiche erfasst werden.

Messungen im Bohrloch sind wesentlich aufwendiger und erfordern spezielle Sondenformen, die auf die geringen Dimensionen im Bohrloch zugeschnitten sind. Am einfachsten sind noch diejenigen kapazitativen Verfahren, welche nur den hygroskopischen Luftfeuchtebereich erfassen. Allerdings nimmt man dann in Kauf, dass der überhygroskopische Bereich flüssigen Wassers nur pauschal angegeben werden kann. Messungen, die für den überhygroskopischen Bereich geeignet sind, wie die Gamma-Absorption oder Mikrowellenmessung, benötigen zum Teil zwei parallele Bohrlöcher, zwischen denen das zu analysierende Gestein zwischen Sender und Empfänger, die sich in diesen Bohrlöchern befinden, durchstrahlt wird.

Bei Schäden im Sockelbereich, die sich unter dem Oberbegriff »aufsteigende Feuchte« einordnen lassen, sind – mindestens an den kritischen Stellen – Bestimmungen des Feuchtegehalts und des Durchfeuchtungsgrades unerlässlich.

Die Messungen müssen auch in unterschiedlichen Höhengniveaus und als Tiefenprofil angelegt sein, um einen Überblick über die Verteilung der Feuchte im Mauerwerk zu erhalten. Da der Feuchtegehalt an sich noch keine Aussage hinsichtlich der Feuchtequelle zulässt, müssen zum Vergleich die Sorptionsfeuchten bei mindestens zwei Luftfeuchten bestimmt werden.

Es hat sich eingebürgert, die Wasserdampfsorption bei 50, 85 und 95 % r. F. zu messen. Liegt der am Objekt vorgefundene Feuchtegehalt höher als die Sorptionsfeuchte, so liegt zumindest der Verdacht auf eine »externe« Feuchtequelle nahe, die im allgemeinen Sprachgebrauch meist als »aufsteigende Feuchte« bezeichnet wird.

Für die gravimetrische Feuchtebestimmung müssen die Proben trocken gebohrt werden, damit die Messwerte nicht verfälscht werden. Kann die Ist-Feuchte nicht direkt vor Ort gemessen werden, müssen die Proben für den Transport ins Labor eingeschweißt werden. Da die Proben meist während des Transports Wassertropfen »ausschwitzten«, sind sie zusammen mit der Folie zu wiegen, deren Trockengewicht hinterher abgezogen werden muss.

6.4.6 Salzbestimmung

Zur Analyse des Salzgehaltes genügt es heute meist nicht mehr, nur die wichtigsten Anionen wie Chlorid, Sulfat und Nitrat qualitativ zu bestimmen. Dem Stand der Technik entsprechend sollten alle löslichen Anionen und Kationen erfasst, eine Ionenbilanz aufgestellt und die Salzproben zusätzlich auch mit Hilfe der Röntgenbeugung (XRD) analysiert werden, damit man auch die tatsächlich vorhandenen Verbindungen (Salzminerale) kennt. Aus der Art und der Menge der vorhandenen Salze können wichtige Rückschlüsse auf das Sorptionsverhalten der Gesteine und letztlich auf die Durchfeuchtung des Mauerwerks gezogen werden. Grundlegende Arbeiten über die Wirkung von Salzen stammen von ARNOLD (1992); ARNOLD & KÜNG (1985); ARNOLD & ZEHNDER (1985). Neueste Ergebnisse über Salze in Gesteinen und das hygrische Potential von Salzgemischen sind von STEIGER & CHAROLA (2011) vorgelegt worden. Aus diesen geht hervor, dass die Deliquiszenzfeuchte von Salzgemischen beträchtlich von der der reinen Salze abweichen kann.

In jedem Fall ist es erforderlich, die Salzbestimmung in Form eines Tiefenprofils durchzuführen, um Aussagen über die räumliche Verteilung der Salze und damit über die Erfolgsaussichten möglicher Entsalzungsmaßnahmen treffen zu können. Folgende Ionenarten sind zu bestimmen:

- **Kationen:** Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , $(\text{Fe}^{3+}, \text{NH}_4^+)$
- **Anionen:** Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , $(\text{F}^-, \text{PO}_4^{3-})$

Da die Wiedergabe von Salzanalysen in Tabellenform wenig anschaulich ist, sollte man die Möglichkeiten der grafischen Wiedergabe prüfen, insbesondere wenn Salzverteilungen über Fassadenabschnitte hinweg übersichtlich präsentiert werden müssen. Ein Beispiel, wie Salzanalysen grafisch umgesetzt werden können, ist in Bild 89 gezeigt. Wer sich vertiefend über Salze informieren möchte, der möge die Internetseite www.salzwiki.de bemühen, auf der alles über Salze dem neuesten Forschungsstand gemäß gefunden werden kann.

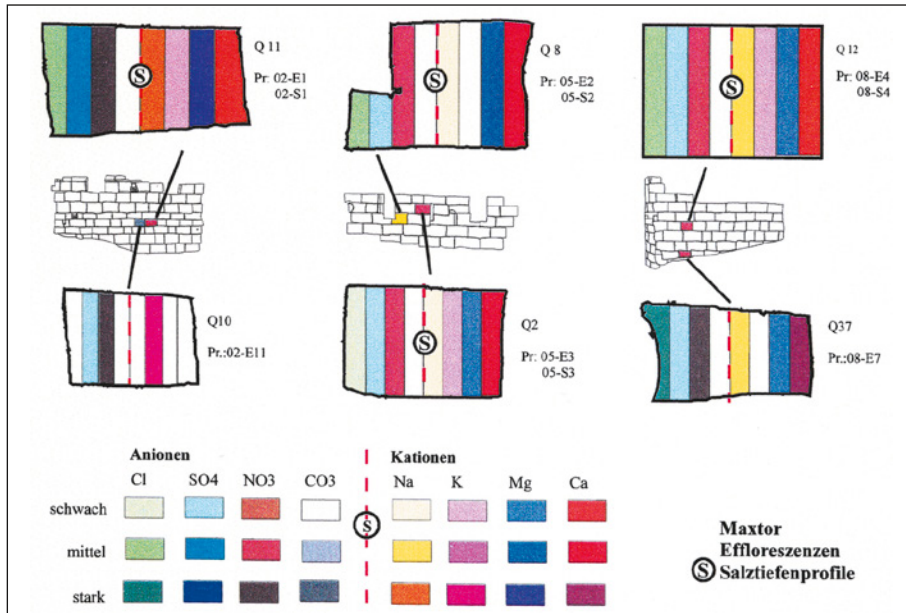


Bild 89: Grafische Wiedergabe von qualitativen Anionen- und Kationenbestimmungen in Effloreszenzen und in Salztiefenprofilen an der Maxtormauer in Nürnberg [aus WENDLER (1997)]

6.4.7 Sorptionsisotherme

Um abzuschätzen, inwieweit die vorgefundenen Durchfeuchtungen durch aufsteigende Feuchte oder durch hygroscopische Salze verursacht werden, ist die Messung der kompletten Sorptionsisotherme oder wenigstens der Sorptionsfeuchten bei 50, 85 und 95 % rel. Luftfeuchte unerlässlich. Die Messungen zeigen die Feuchteaufnahme des Gesteins im hygroscopischen Bereich, d. h. im Bereich der wechselnden Feuchte der Umgebungsluft. Die Kenntnis der Sorptionsisotherme ist unter Umständen sehr wichtig, um die für eine Tränkung geeigneten Luftfeuchtebedingungen festzulegen.

Bild 90 zeigt für modellhafte Sandsteine den Verlauf der Sorptionsisothermen im hygroscopischen Bereich mit und ohne Versalzung. Der Wassergehalt steigt im Bereich der Ausgleichsfeuchte (Deliqueszenzfeuchte), bei welcher das betreffende Salz in Lösung geht, sprunghaft an. Der weitere Anstieg des Wassergehalts wird durch das Bestreben des Salzes, sich immer mehr zu verdünnen, verursacht. Physikalisch-chemisch gesprochen ist dafür das chemische Potential von Wasser verantwortlich, welches im physikalisch-chemischen Gleichgewicht in der Porenlösung und in der Luft gleich sein muss.

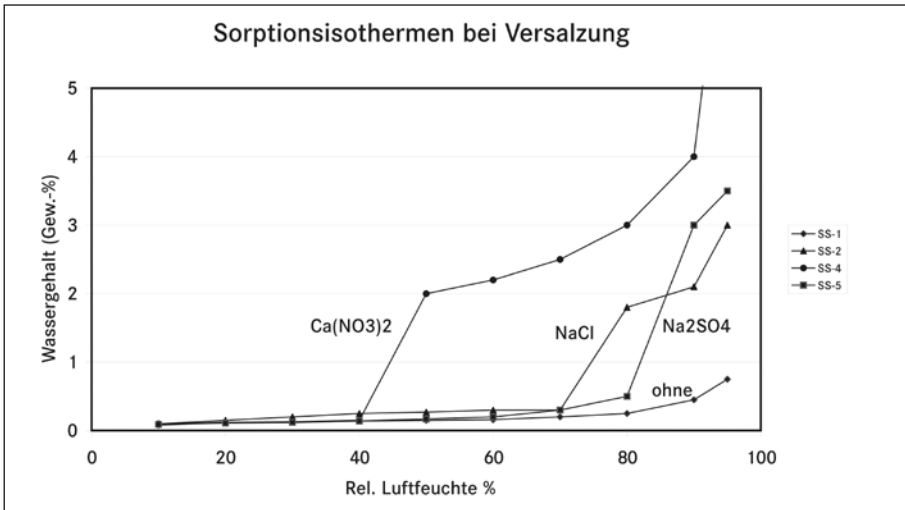


Bild 90: Sorptionsisothermen für Sandsteine mit und ohne Salzkontamination. Der sprunghafte Anstieg des Wassergehalts erfolgt bei der Gleichgewichtsfeuchte der betreffenden Salze.

6.4.8 Festigkeitsmessungen

Da jede Form der Gesteinsverwitterung einen Verlust von Festigkeit bedeutet, sind die Messungen der Festigkeit von besonderer Bedeutung, auch im Hinblick auf die später folgende Konservierung. Es stehen verschiedenen Messmethoden zur Verfügung, die zum Teil miteinander kombiniert werden können. Die gemeinsame Basis sollten auf jeden Fall Messungen der biaxialen Biegezugfestigkeit darstellen [PRIM & WITTMANN (1985); SATTLER (1992)]. Eine sehr anschaulich verfasste Zusammenstellung der üblichen Festigkeits- und Verformungsmessungen hat KOCHER (2005) vorgelegt, die als Einführung in das Thema sehr empfohlen werden kann.

Alle Messungen erfüllen nur dann ihren vollen Zweck, wenn sie in Form eines Tiefenprofils vorgenommen werden, um die »Verwitterungstiefe« zu bestimmen, weshalb man leider nicht ohne die Entnahme von Bohrkernen auskommen wird. Diese müssen desto größer sein, je grobkörniger und inhomogener das Gestein ist. Die Wahl der Messmethode ist von der Gesteinsart und dem vorliegenden Schadensbild (nur oberflächliche oder tiefer gehende Entfestigung, Schalenbildung) abhängig zu machen. Derzeit sind folgende Messmethoden gängiger Stand der Technik:

- Biaxiale Biegezugfestigkeit an Bohrkernscheiben mit Ringauflage: B_{BZ} (N/mm²). Vorteil: Ermittlung des E-Moduls möglich. Bohrkerndurchmesser mind. 50 mm. Verhältnis Durchmesser zu Dicke der Scheiben = 1:10. Beispiel: Durchmesser 50 mm/Dicke 5 mm.
- Abzugfestigkeit an Bohrkernscheiben: B_{BZ} (N/mm²). Vorteil: apparativ einfach und billig. Bohrkerndurchmesser mind. 30 mm, Scheibendicke mind. 5 mm.

- Ultraschallmessung am Bohrkern als Profil: v_p (km/s). Vorteil: schnelle Messung, relativ kostengünstig, Auflösung ca. 5 mm oder sogar darunter, abhängig von der Messfrequenz. Der Kerndurchmesser sollte 5 cm mindestens betragen, weil bei geringeren Wegstrecken die Wellenlänge des Ultraschallsignals bereits in die Größenordnung des Durchmessers reichen kann. Die Messwerte sind unter solchen Umständen nicht verlässlich. Das Verfahren ist für Kalksteine und Marmor besser geeignet als für Sandsteine, weil bei Letzteren das gesamte Intervall zwischen unverwittert und stark verwittert nur 1,5 bis 2 km/s beträgt. Weiterhin müssen die Bohrkern e einheitlich getrocknet werden, weil die Ultraschallgeschwindigkeit vom Feuchtegehalt beeinflusst wird. Sie nimmt mit steigender Feuchtigkeit zu und simuliert somit einen besseren Materialzustand. Siehe zu diesem Thema das Kapitel E2 »Marmor« im Einführungsteil des Leitfadens.
- Bohrhärteprofil: mm/min Bohrfortschritt oder Steigungswinkel der aufgezeichneten Kurve, beim DRMS-Gerät zur Bohrwiderstandsmessung aus Italien auch Bohrwiderstand als Kraft in Newton. Die Messung kann am Objekt ausgeführt werden. Die Bohrlöcher sind sehr klein, da nur 2–5 mm starke Bohrer verwendet werden. Die Methode ist schnell und kostengünstig. Eine Korrelation mit klassischen Festigkeitswerten ist möglich, wenn Vergleichswerte vorliegen. Auflösung bis 1 mm, auch oberflächliche Entfestigungen oder Schalen sind detektierbar. Nachteil: nur bis 30 (40) mm Tiefe anwendbar. Das Hauptproblem bei der Messung des Bohrwiderstands besteht in der Heterogenität der Bohrer. WIDIA-Bohrer sind auch innerhalb einer Lieferung sehr unterschiedlich und liefern keine reproduzierbaren Resultate. Hinzu kommt, dass die Bohrer je nach Gestein bereits im ersten Bohrloch abgerieben werden und an Schärfe verlieren. Der Bohrerabrieb ist auf jeden Fall zu korrigieren und bei der Auswertung zu berücksichtigen. Diese Forderung kann zu beträchtlichen Schwierigkeiten führen.
- Diamantbohrer besitzen eine für Fragestellungen wie »gefestigt – ungefestigt« viel zu große Schärfe, sodass die Bohrhärteunterschiede nicht befriedigend aufgelöst werden. Die beschriebenen Probleme können nur durch eine vorherige Kalibrierung der Bohrer an einem Standardmaterial überwunden werden. Jeder eingesetzte Bohrer ist zu katalogisieren, um für spätere Vergleichsmessungen wieder zur Verfügung zu stehen. Informationen zu diesem Verfahren siehe bei PFEFFERKORN (1994a). Die neuesten Erkenntnisse zur Bohrwiderstandsmessung sind in PAMPLONA et al. (2008, 2010) zusammengestellt. Die Autoren empfehlen polykristallines, natürliches NaCl als am besten geeignetes Kalibriermaterial, weil selbst speziell hergestellte Keramikmassen sich als zu inhomogen erwiesen haben. Als Beispiel sind in Bild 91 einige Bohrwiderstandsprofile des Kalksteins der Porta Prätoria in Regensburg gezeigt. Man erkennt die unterschiedliche Härte der Kalksteine und auch deren Heterogenität in Gestalt starker Ausschläge der Kurven, die durch Organismenschalen hervorgerufen werden.

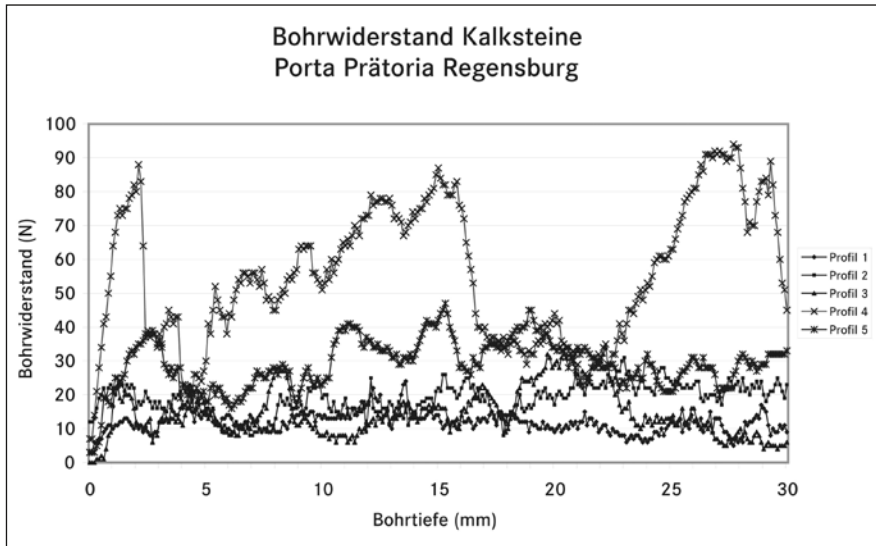


Bild 91: Bohrwiderstand verschiedener Kalksteinvarietäten an der Porta Prätoria in Regensburg

6.4.9 Schmutzkrusten

Bei genauerem Hinsehen kann man zwei Arten Schmutzkrusten unterscheiden, die sogenannte »Feuchtkruste«, welche an regenexponierten Stellen wächst, und die sogenannte »Trockenkruste«, welche sich in regengeschützten Bereichen bildet. Während die »Trockenkruste« vornehmlich aus Gips besteht, enthält die »Feuchtkruste« einen hohen Anteil an biologischer Substanz (siehe Bild 84 bzw. Bild 118). Für die Schadensdiagnose entscheidend ist die Frage, wie die Schmutzschichten mit der Gesteinsoberfläche verwachsen sind, d. h. wie die Grenzfläche Stein – Kruste beschaffen ist. Sind die Schmutzablagerungen fest haftend oder ist an der Grenzfläche zum Stein eine mürbe, salzbelastete Zwischenzone ausgebildet? Sandsteine und Kalksteine stellen meist verschiedene Reinigungsprobleme. Bei größeren Sandsteinen reicht die Verschmutzung oft bis mehrere Millimeter in den Porenraum hinein. Bei Kalksteinen muss die Lage der originalen Oberfläche bestimmt werden, welche bisweilen aufgrund der Gipsbildung bereits zu einem Teil der Schmutzkruste geworden ist. In den genannten Fällen kann auf die Entnahme von größeren Proben nicht verzichtet werden, da beide Aussagen nur anhand von Querschliffen oder Dünnschliffen getroffen werden können.

6.4.10 Biologische Besiedlung

Mikroorganismen sind der wichtigste Bestandteil der Feuchtkrusten und wirken auf zweierlei Weise bei der Gesteinszerstörung mit: Biofilme verändern die Feuchteaufnahme und das Trocknungsverhalten von Gesteinen, die biogene Säureproduktion, vor allem Oxalsäure führt zur Salzbildung. Der Befund von Oxalat auf Skulpturen und Fassadenflächen liefert meist ein starkes Indiz auf eine frühere, ölgebundene Fassung. Eine Bestandsaufnahme des mikrobiellen Befalls eines Gebäudes oder Einzelobjektes ist deshalb anzuraten. Eine Untersuchung könnte z. B. nach folgenden Organismenarten aufgeschlüsselt sein: Nitrifikanten, heterotrophe Bakterien, Aktinomyzeten, Pilze, Algen, Flechten, Moose. Gerade weil dieses Forschungsgebiet im Bereich des Bautenschutzes nicht mit der nötigen Tiefe bearbeitet wird, sollte bereits im Stadium der Schadenserhebung eine Bestandsaufnahme des mikrobiologischen Befalls in Auftrag gegeben werden, um keine für die Entstehung der Schäden möglicherweise entscheidenden Parameter außer Acht zu lassen. Zur vertieften Information über die Analyse von mikrobiologischen Belastungskennziffern von Gesteinen wird hier auf BOCK et al. (1994, 1996) verwiesen. Die Prozesse der Biodeterioration und Biodegradation sind anschaulich und übersichtlich in STERFLINGER (2011a) nachzulesen. PETERSEN et al. (2018) haben jüngst ausführliche Untersuchungen zur biologischen Besiedlung von Marmor im Schlosspark Sanssouci vorgelegt, deren Aussagen auf andere Marmorobjekte übertragen werden können.

Interessante Aspekte biologischer Besiedlung durch Fauna und Flora bietet die Erhaltung historischer Mauern, wie man sie an Festungen, in Weinbergen oder auch an Straßen findet. Bei rechtzeitiger Einbeziehung der betroffenen Entscheidungsträger können Konflikte, wie sie häufig zwischen Denkmalschutz und Naturschutz zu beobachten sind, beizeiten ausgeräumt werden, wie das von der DBU geförderte Modellprojekt der Instandhaltung der Wallmauern der Festung Rosenberg in Kronach dokumentiert. Das Projekt stellt unterschiedliche Methoden der Instandsetzung und Instandhaltung historischer Mauerwerke vor und bewertet deren denkmalpflegerische und ökologische Nachhaltigkeit. Als ökologisch besonders bedeutsam erweist sich die Gestaltung der Fugen. Sie sollten schon wegen des Feuchteausstausches mit dem angrenzenden Erdreich nicht vollflächig verschlossen werden. Fugen bieten auch Lebensraum für zahlreiche Tiere und Pflanzen, die hier ihre ökologische Nische gefunden haben. Weitere Informationen sind bei PICK et al. (2002) zu finden. Die Zusammenhänge zwischen Denkmal und Naturraum werden eindrucksvoll in der Publikation »Die Drei Gleichen« [SIEGSMUND & HOPPERT (2010)] präsentiert, die als Ergebnisbericht eines von der DBU geförderten Projekts entstanden ist. Die Steingebäude und Mauern der Burgen werden hier im Kontext der Kulturlandschaft betrachtet, wobei die geologische Situation, die Entwicklung der Kulturlandschaft und die Habitat seltener Pflanzen- und Tiervergesellschaftungen erörtert werden. Diese Veröffentlichung ist ein bemerkenswertes Beispiel für die zunehmende Vernetzung von Denkmalschutz und Naturschutz, die immer mehr an Bedeutung gewinnt. Naturnahe Steinstrukturen sollten deshalb nie mehr allein als Gebilde aus Stein angesehen

werden. Die Einbindung von Fachleuten des Naturschutzes und der Geoökologie in derartige Projekte muss deshalb zur Vorbedingung gemacht werden.

6.4.11 Frühere Konservierungen

Mitunter finden sich Hinweise, dass die Schäden durch eine frühere Behandlung verstärkt oder sogar verursacht worden sind. Ist die Oberfläche verdichtet, so hat dieser Befund für das spätere Behandlungskonzept gravierende Auswirkungen. Durch geeignete Untersuchungen soll versucht werden, Art und Eindringtiefe des Produkts, welches die Verdichtung verursacht, herauszufinden. Um die Suche nach in Frage kommenden Produkten zu erleichtern, wird hier auf HERM et al. (1996) hingewiesen, die eine Liste der zwischen 1840 und 1940 gebräuchlichen Steinbehandlungsmittel zusammengestellt haben.

Neben den älteren Maßnahmen vor dem Zweiten Weltkrieg oder in den 1950er-Jahren müssen auch die Sanierungsmaßnahmen aus der jüngeren Vergangenheit in Betracht gezogen werden und zwar im Besonderen Festigungen und Hydrophobierungen mit siliziumorganischen Verbindungen, welche in großem Umfang ab 1970 Verwendung gefunden haben und meist im Stein noch nachweisbar sind. Indizien, die auf solche Behandlungen hinweisen, können z. B. untypische dünne Schalen sein, die durch eine ungenügende Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels verursacht sind. Neben den üblichen naturwissenschaftlichen Nachweismethoden ist hier vor allem die Sichtung von Bauakten und alten Rechnungen hilfreich. Prinzipiell sollte den früheren Konservierungen viel Beachtung geschenkt werden, da es nicht selten genau diese Maßnahmen (gerne Fugen, Ergänzungen und Steinaustausch) sind, welche erneuert oder überholt werden müssen.

6.4.12 Ziel des Auftrags: Zweite Schadensbewertung und Maßnahmenvorschlag

Der Untersuchungsbericht soll eine zweite, vertiefte Schadensbewertung enthalten. Das bedeutet, dass der Zustand des Gesteins im Vergleich zum unverwitterten Material und damit der Grad der Zerstörung und Gefährdung sichtbar werden. Darauf aufbauend sind Vorschläge für die zu ergreifenden Konservierungsmaßnahmen (z. B. Reinigung oder Festigung nötig oder nicht) und für das weitere Untersuchungsprogramm zu machen, mit dem diese Maßnahmen vorbereitet werden müssen. Diese Vorschläge sind in einen Plan einzutragen (Bild 92). Ein besonderes Augenmerk sollte auf die Probleme der Reinigung gelegt werden. Die Möglichkeiten des prophylaktischen Schutzes sind zu erörtern. Damit ist vor allem ein konstruktiver Schutz gemeint, z. B. durch Verblechungen an Fassaden (siehe Kapitel 11.1.11), durch Entkoppelung feuchtebelasteter Epitaphien von der Wand oder durch die Verwendung neuer, nicht rostender Anker und Dübel.

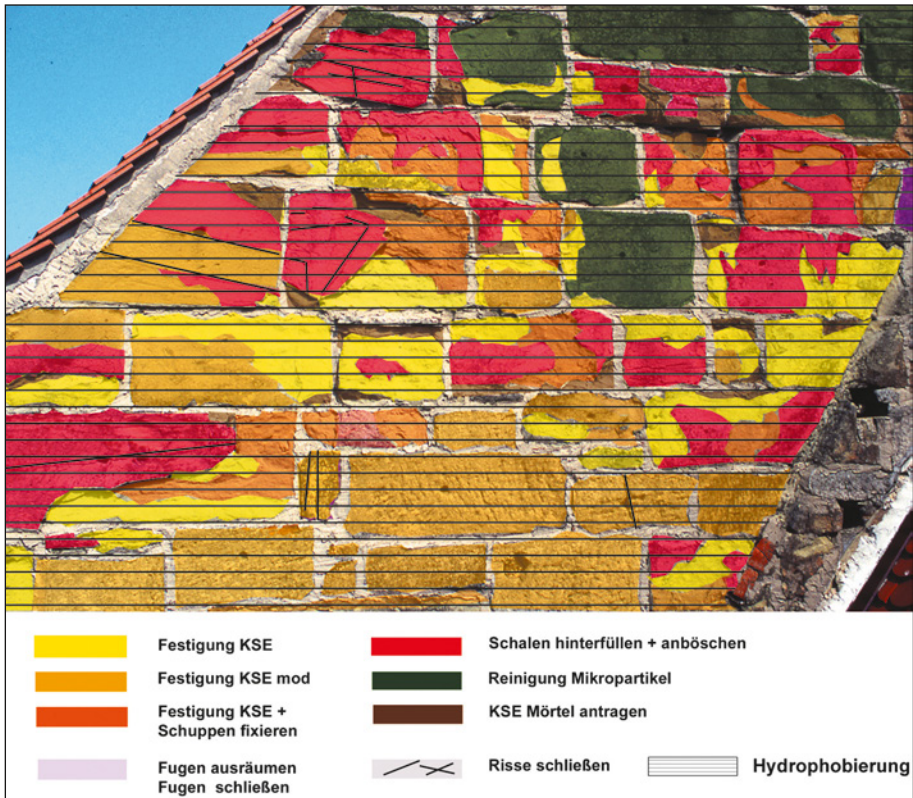


Bild 92: Kartierung des Maßnahmenvorschlags für den Westgiebel (Ausschnitt) der Klosterkirche Birkenfeld nach dem Farbschema des DBU-Projekts Monitoring [siehe auch AURAS et al. (2010); Plan nach HERTLEIN (1991)]

Die für den Westgiebel der Klosterkirche Birkenfeld kartierten Maßnahmenvorschläge leiten sich direkt aus der Kartierung der Natursteinschäden in Bild 85 ab, weil die gewählten Schadensformen unmittelbar bestimmten Maßnahmen zugeordnet werden können. Man wird deshalb zwischen den beiden Abbildungen keine Unterschiede feststellen können.

Von entscheidender Bedeutung für die weitere Planung ist die Aussage, ob das Objekt mit Hilfe des vorgeschlagenen Konservierungsprogramms unter den gegebenen Umständen an seinem Platz erhalten werden kann oder ob andere Lösungen, wie z. B. eine Umgestaltung des Umfeldes oder eine museale Unterbringung, diskutiert werden müssen.

Die Vorschläge des Abschlussberichts über Arbeitsschritt 6 müssen in der folgenden Sitzung der Projektleitung besprochen und zu einer Entscheidung gebracht werden. Handelt es sich um Skulpturen, so würden jetzt alle erforderlichen Parameter zur Hand sein, um eine Risikoziffer für das betrachtete Objekt zu berechnen. Die Risiko-

ziffer bringt das Risiko zum Ausdruck, das für eine Skulptur besteht, weiteren, möglicherweise irreparablen Schaden zu nehmen. Inhalt und Berechnung der Risikoziffer sind in Kapitel E4 detailliert erläutert.

Zum Abschluss dieses Abschnitts sei nochmals darauf hingewiesen, dass die mit dem Arbeitsschritt 6 verbundenen Aufgaben sehr hohe Anforderungen an das beauftragte Fachlabor stellen. Es sollte aus diesem Grunde bereits einschlägige Erfahrungen mitbringen und mit den entsprechenden Geräten ausgestattet sein, um die erforderlichen Untersuchungen auch durchführen zu können. Andernfalls sollte eine Arbeitsgemeinschaft gebildet werden, ohne allerdings die Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten zu verwässern.

7 **Zweite Sitzung der Projektleitung * * ***

Inhalt

7.1	Einbindung externer Experten.....	**	181
7.2	Stimmen die bisherigen Vorgaben noch?	***	181
7.3	Prüfung des Finanz- und des Zeitplans	***	182

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

7 Zweite Sitzung der Projektleitung

7.1 Einbindung externer Experten

Zu dieser Sitzung sei der Projektleitung dringend geraten, Fachleute zu den anstehenden Fragen hinzuzuziehen, um die vorliegenden Ergebnisse zu beraten. Hat zwischenzeitlich keine Sitzung stattgefunden, so müssen alle Ergebnisse und Vorschläge, die aus den bisherigen Arbeitsschritten hervorgegangen sind, besprochen werden. Die Berichte der Gutachter befassen sich demnach mit:

- Arbeitsschritt 2: Objektidentifikation
- Arbeitsschritt 3: Archivstudien
- Arbeitsschritt 4: Mauerwerk und Statik
- Arbeitsschritt 5: Hydrogeologie
- Arbeitsschritt 6: Bestandsaufnahme, d. h. Aufmaß und Planerstellung sowie Untersuchungen zu den Materialien und deren Schäden.

Der Sitzungsleiter muss darauf achten, dass alle Berichte konkrete Empfehlungen für notwendige Folgeuntersuchungen oder bereits feststehende Maßnahmen enthalten. Nur dann gewinnt die Projektleitung einen klaren Überblick über die weiteren Schritte und die Anzahl der Folgeaufträge. Sie kann das weitere Untersuchungsprogramm festlegen und den Zeitplan sowie den Kostenplan anpassen. Möglicherweise ergeben sich auch Konsequenzen für die Änderung des Finanzierungsplanes. Am Ende der zweiten Sitzung sollte es der Projektleitung möglich sein, auf der Grundlage der von den Gutachtern gemachten Empfehlungen das gesamte künftige Instandsetzungskonzept festzulegen. Genügen Untersuchungsberichte nicht den vereinbarten Anforderungen, so ist zunächst eine Frist zur Nachbesserung einzuräumen.

7.2 Stimmen die bisherigen Vorgaben noch?

Da man möglicherweise bei den Aufträgen zur Schadensanalyse zunächst von einfacheren Voraussetzungen ausgegangen ist, kann es möglich sein, einen Teil der bisherigen Aufträge zu erweitern und durch zusätzliche Untersuchungen zu ergänzen.

Dies erscheint in allen genannten Untersuchungsfeldern denkbar, denn man kann nicht unbedingt erwarten, dass sich Fragen der Statik, des Baugrundes und auch der Feuchte- und Salzverteilung in einem Mauerwerk schon aus dem ersten Untersuchungsansatz heraus klären lassen. Es wird also gegebenenfalls erforderlich sein, noch einmal an den Ausgangspunkt des Projekts zurückzukehren, damit die noch offenen Fragen geklärt werden können.

Handelt es sich bei dem untersuchten Objekt um ein bewegliches Denkmal (Figur, Skulpturengruppe o.Ä.) könnte der Fall eintreten, dass sich die Schäden als so

gravierend erweisen, dass eine Volltränkung mit Acrylharz oder reaktiven Silanen erforderlich wird, um es an seinem angestammten Platz erhalten zu können. In diesem Fall sind mit der ausführenden Firma die weiteren Schritte zu besprechen. Die wichtigsten Informationen zu diesen Verfahren finden sich im Abschnitt 16. Vor einer Entscheidung in diese Richtung wird aber geraten, zunächst die spezielle Risikoziffer berechnen zu lassen, welche gestattet, die Dramatik einer Situation objektiv zu beurteilen.

7.3 Prüfung des Finanz- und des Zeitplans

Damit bei der Abwicklung des Vorhabens keine Schwierigkeiten auftreten, dürfen die Konsequenzen für den Finanzierungsplan keinesfalls übersehen werden. Unter Umständen können aufgrund der Empfehlungen der Gutachter sehr kostenintensive Untersuchungen notwendig werden, die bisher noch nicht absehbar waren. Bauherr und Geldgeber sind hier gefordert, objektgerechte Lösungen zu finden. Der Koordinator hat die Aufgabe, die Besprechungsergebnisse in die Tat umzusetzen. Er muss den Leistungsumfang für die Arbeitsschritte 8 und 9 formulieren, wobei er sich am besten der Hilfe eines oder mehrerer kompetenter Experten bedient, um dann das Messprogramm in beschränkter Ausschreibung unter qualifizierten Untersuchungs-labors auszuschreiben.

8 Klima- und Schadstoffmessungen **

Inhalt

8.1	Allgemeines	185
8.2	Innenraummessungen **	186
8.2.1	Messparameter	186
8.2.2	Anordnung der Messfühler	186
8.2.3	Wahl der Messfühler	186
8.2.4	Wiedergabe und Auswertung	187
8.2.5	Sonderfälle	187
8.3	Messungen des Außenklimas **	188
8.4	Allgemeines über Schadstoffmessungen	188
8.4.1	Deposition	189
8.4.2	Welche Luftschadstoffe sollen gemessen werden?	190
8.4.3	Dauer, Auswertung und Darstellung der Messungen	191
8.4.4	Welche Bedeutung haben Schadstoffmessungen für die praktische Konservierung?	192

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

8 Klima- und Schadstoffmessungen

8.1 Allgemeines

Messungen von Temperatur und Luftfeuchte werden eingesetzt, um in erster Linie die Feuchtebelastung eines Mauerwerks oder Bauteils beurteilen zu können. Sie finden sowohl im Innenraum als auch im Außenraum Anwendung, hier aber vor allem bei wertvollen Kirchenportalen und deren Figurenschmuck. Klimamessungen sind ein unverzichtbares Hilfsmittel, sichtbare Feuchteschäden zu interpretieren. So weisen häufige Taupunktunterschreitungen darauf hin, dass wohl weniger kapillar aufsteigende Feuchte als vielmehr Kondensation und erhöhte Salzkonzentrationen für die beobachteten Schäden verantwortlich zu machen sind.

Im Außenbereich sollte man zunächst versuchen, die vorliegenden Schadensbilder als Auswirkungen lokaler Umgebungsfaktoren einzuordnen. Häufig lässt sich allein durch bloße Beobachtungen der Einfluss des Mikroklimas auf die Art und den Umfang der Schäden erkennen, besonders dann, wenn gravierende Baufehler oder Mängel im Bauunterhalt erkennbar sind. Alle Schadensbilder, die sich an Fassaden oder Skulpturen erkennen lassen, sind die Folge von charakteristischen Expositionsbedingungen und lassen aus diesem Grund meist eindeutige Aussagen über die Einflussfaktoren zu. So lässt sich Schalenbildung im Regelfall immer einer Exposition mit schnellen Feucht-Trocken-Wechseln zuordnen, während Absanden dem Dauerfeuchtebereich zugerechnet werden muss. Da an dieser Stelle die Problematik von Feuchtemessungen nur in knappen Ansätzen besprochen werden kann, sei für eine weitergehende Information auf ARENDT (1994) verwiesen. In jüngster Zeit hat die rechnerische Simulation von Feuchte- und Temperaturverteilungen große Fortschritte gemacht, deren Vorteile in Verbindung mit Vor-Ort-Messungen auf jeden Fall genützt werden sollten. Umfangreiche Informationen finden sich in GARRECHT (1992, 1996); KRUS (1995); KÜNZEL (1995); KÜNZEL & KRUS (1995); KÜNZEL et al. (1995); MAYER & WITTMANN (1995) sowie HOLM et al. (1996). Hinsichtlich Anwenderfreundlichkeit scheint besonders das vom Fraunhofer IBP fortlaufend weiter entwickelte numerische Simulationsprogramm WUFI sehr fortschrittlich, da es eine sehr umfangreiche Materialdatenbank enthält. Es sind jedoch auch von anderen Instituten entwickelte Simulationsprogramme wie DELPHIN verfügbar, die ebenso leistungsfähig sind.

Klima- und Schadstoffmessungen sind heute viel komfortabler durchführbar als früher. Die Messfühler brauchen nicht mehr in regelmäßigen Abständen eingeholt und ausgelesen zu werden. Das erspart viel Arbeitszeit und riskante Klettermanöver, sollten die Messfühler zum Beispiel hoch in einem Kirchenschiff angebracht sein. Vielmehr sammelt ein Datenlogger die Messwerte der im Raum verteilten Messfühler und überträgt die Daten via Internet in das heimische Büro, wo sie sofort ausgewertet werden können. Ist ein Messfühler ausgefallen, kann der Schaden frühzeitig

entdeckt werden und wird nicht erst bei der nächsten Routinekontrolle evident. Diese Technik ist seit längerem bereits Stand der Technik.

8.2 Innenraummessungen

Sollen Klimamessungen einen Aussagewert besitzen, so ist die Messung über den Zeitraum von mindestens einem Jahr auszudehnen, um die besonders problematischen Klimazustände im Frühjahr und Frühsommer zu erfassen. Da nur langfristige Veränderungen und lang andauernde Schwankungen des Raum- oder Außenklimas von Bedeutung sind, genügt es, die Messwerte von Temperatur, Luftfeuchte und Oberflächentemperatur im einstündigen Rhythmus zu erfassen.

8.2.1 Messparameter

Unerlässlich sind Messungen von Temperatur und relativer Feuchte der Umgebungsluft. Auf den Oberflächen genügen meist Temperaturfühler, da für die Beurteilung der Kondensationsereignisse nicht die relative Luftfeuchte, sondern die Taupunktunterschreitungen ausschlaggebend sind. Diese lassen sich folgendermaßen berechnen: Aus den Messwerten von Temperatur und relativer Feuchte der Umgebungsluft wird die dazugehörige Taupunkttemperatur ermittelt. Aus dem Vergleich der Taupunkttemperaturen mit den Oberflächentemperaturen erhält man dann das Ausmaß und die Dauer von Taupunktunterschreitungen auf den Wandoberflächen. Die Menge des gebildeten Kondensats ist nicht ganz einfach zu berechnen, weil sie von der absoluten Luftfeuchte, dem Grad der Taupunktunterschreitung und dem Feuchteübergangskoeffizienten der Materialoberfläche abhängt, in welchen die Porenverteilung, die Oberflächenrauigkeit und die Strömungsverhältnisse eingehen.

8.2.2 Anordnung der Messfühler

Die Zahl und die Platzierung der Messfühler richten sich in jedem Einzelfall ganz nach den speziellen Fragestellungen. Auch bei Innenraummessungen ist es zweckmäßig, zu Vergleichszwecken den Temperatur- und Feuchteverlauf der Außenluft zu messen, um die Kopplung des Innenklimas mit dem Außenklima beurteilen zu können.

8.2.3 Wahl der Messfühler

Während die Temperaturfühler weitaus weniger anfällig sind, bedürfen die Feuchtefühler einer regelmäßigen Wartung und Kalibrierung. Vor allem aber sind sie vor Staub zu schützen, da ein mit Staub bedeckter Fühler wesentlich träger reagiert und

obendrein auch noch falsche Messwerte anzeigt. Auch die Anordnung der Messfühler ist sorgfältig zu überlegen und an die jeweiligen Fragestellungen anzupassen.

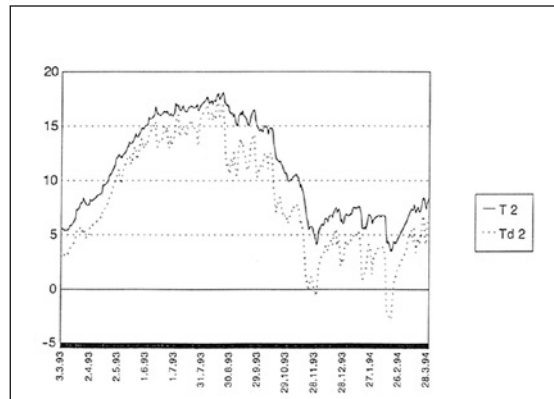
8.2.4 Wiedergabe und Auswertung

Neben dem Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte beinhaltet eine vollständige Auswertung immer auch den Verlauf der Taupunkttemperatur und des Taupunktabstandes. Für die Wiedergabe der Resultate empfiehlt sich eine Diagramm-Darstellung mit folgenden Inhalten:

- Jahresgang: Berechnung aus Tagesmittelwerten
- Monatsgang: Berechnung aus Einstundenwerten

Aufgrund von Messungenauigkeiten, möglicher Kapillarkondensation und besonderen Strömungsverhältnissen in der Nähe der Oberfläche muss eine Taupunktannäherung auf ca. 2° und weniger bereits als kritisch für das Auftreten von Oberflächenkondensation angesehen werden (siehe Bild 93). Soll der Einfluss von Veranstaltungen in Theatern oder Gottesdiensten auf das Innenraumklima beantwortet werden, so sind für die betreffenden Zeiträume kürzere Messintervalle vorzusehen.

Bild 93: Taupunkt und Oberflächentemperaturen in der Krypta von Sankt Sebald in Nürnberg (T2 = Oberflächentemperatur der Messstelle 2, Td2 = Taupunkttemperatur der Messstelle 2)



8.2.5 Sonderfälle

Besondere Messprobleme, wie z. B. die Besonnungsdauer eines Wandelements, erfordern natürlich abweichende Messanordnungen und Auswerteprogramme, die im Einzelfall diskutiert und festgelegt werden müssen. In besonderem Maße sind kostbare Farbfassungen an Altären oder Gemälden von diesem Problem betroffen.

8.3 Messungen des Außenklimas

Für das Klima im Außenraum ist es im Allgemeinen ausreichend, einen Temperatur- und Feuchtesensor zu installieren. Zum Vergleich sollten die Messwerte der nächstgelegenen offiziellen Klimamessstation eingeholt werden. Deren Messungen liefern vor allem verlässliche Daten über die absolute Luftfeuchte, da diese großräumig sehr gleichmäßig verteilt ist. Da mit kommerziellen Feuchtefühlern im Außenraum oft Kalibrierungsprobleme, Ausfälle des Messsystems wegen Verschmutzung und andere Schwierigkeiten auftreten, kann die Genauigkeit der offiziellen Messstationen meist nicht erreicht werden. Für die praktische Auswertung sind deshalb die Messungen der Oberflächentemperaturen von Bedeutung, damit Taupunkt und Taupunktunterschreitungen berechnet werden können.

8.4 Allgemeines über Schadstoffmessungen

Anders als Klimamessungen sind Schadstoffmessungen, außer bei Spezialfragen, auf den Außenbereich bezogen. Für die Natursteinverwitterung sind vor allem die langfristigen Schwankungen der Schadstoffimmissionen von Interesse. Da sich mit Ausnahme von lokalen Besonderheiten die meisten Schadstoffe großräumig gleichmäßig ausbreiten, wird es in den meisten Fällen ausreichen, sich auf die Messwerte der nächstgelegenen offiziellen Immissions-Messstation zu berufen. Natürlich wird man ab und an feststellen, dass gerade bei dieser Messstation nicht alle für die eigenen Fragen interessanten Schadstoffe erfasst werden. Zum Beispiel hat das Landesamt für Umwelt (LfU) in Bayern schon vor längerer Zeit die Messungen des Staubbienerschlags eingestellt. Die in Gläsern gesammelten Staubablagerungen werden nur noch hinsichtlich des Gehalts an Schwermetallen untersucht. Hieraus wird erkennbar, dass das Luftmessnetz ganz auf die gesundheitlichen Belange abgestimmt ist. Sind demnach von der nächstgelegenen Messstation die benötigten Informationen nicht zu erhalten, kann man auf die Werte einer weiter entfernt gelegenen Messstation zurückgreifen.

In den letzten Jahren ist eine zunehmende Verlagerung der Schadstoffimmissionen von schwefelsauren zu salpetersauren Immissionen zu beobachten. Da die Zunahme der Stickoxidimmissionen vor allem auf den Autoverkehr zurückzuführen ist, und aus diesem Grund im Einzugsbereich von Verkehrsadern Bedeutung erlangt, kann durchaus ein gesteigerter Bedarf für Objektmessungen bestehen, wenn offizielle Messstationen zu weit entfernt liegen. Für Stickoxide und Feinstaub gibt es preisgünstige Sensoren, die sich vor Ort an verschiedensten Messstellen einsetzen lassen.

Mittlerweile gibt es für zahlreiche Städte in Deutschland Ausbreitungsmodelle von Feinstaub, Stickoxiden und anderen Schadstoffen, welche den Ferntransport ebenso berücksichtigen wie lokale Emittenten und den Autoverkehr, sodass sich die Schadstoffbelastungen in einzelnen Straßenzügen berechnen lassen. Diese Modelle sind

für die Gefährdung von Denkmalgebäuden durch hohes Verkehrsaufkommen von großer Aussagekraft (IFS 2011). Gerade auf den Kfz-Verkehr und seine Gefahren für die Denkmallandschaft muss in Zukunft ein erhöhtes Augenmerk gerichtet werden. Das besondere Augenmerk wäre dabei auf die Problematik von Grob- und Feinstaubtransport und Deposition zu richten.

8.4.1 Deposition

Wichtiger als die Schadstoffgehalte der Luft sind die tatsächlichen Schadstoffdepositionen auf den Oberflächen, um die Gefährdung eines Objektes beurteilen zu können. Depositionen lassen sich entweder mit inerten Schadstoffsammlern (Passivsammler) oder mit Hilfe von identischen Materialien, z.B. Gesteinsplättchen, bestimmen, welche über einen längeren Zeitraum an dem betreffenden Objekt exponiert werden. Als Beispiel für derartige Messungen siehe Bild 94.

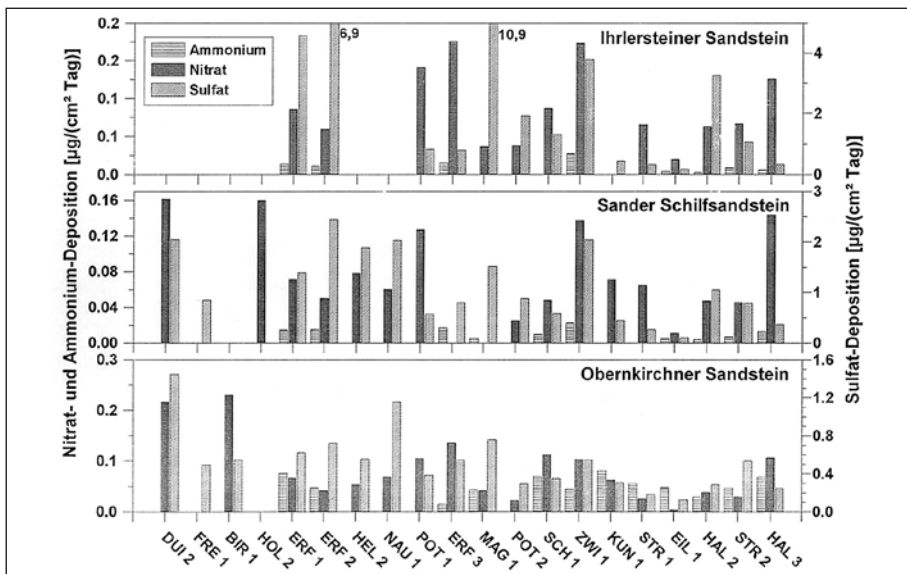


Bild 94: Mittlere Ammonium-, Nitrat- und Sulfatdeposition auf Oberkirchner, Sander und Ihrersteiner Sandstein. Messungen 1989 bis 1994 [WITTENBURG et al. (1996)].

Zur weiteren Erläuterung sei darauf hingewiesen, dass die Schadstoffimmissionen entlang von Straßenzügen heute bereits in Echtzeit modelliert oder online gemessen werden können. Die tatsächlichen Depositionsraten an den Gebäudeoberflächen lassen sich jedoch nur mit erheblichem logistischen und finanziellen Aufwand saisonal aufschlüsseln, weil hierfür immer noch ein großer Probenaufwand vonnöten ist. Kürzere Episoden können mit Passivsammlern erfasst werden, die entlang der Gebäude auf unterschiedlichen Höhen angebracht werden. Über das bestgeeignete Material

für die Passivsammler besteht unter Wissenschaftlern noch erheblicher Diskussionsbedarf, weil die Depositionsraten beträchtlich von den Oberflächeneigenschaften der Substrate abhängig sind. Die Interpretation der Feinstaubmessungen wird erheblich dadurch erschwert, dass Teile davon aus den aktuell erzeugten Kfz-Emissionen, Teile aus dem Ferntransport und weitere Teile aus wieder aufgewirbeltem Straßenstaub bestehen.

Nach Beendigung der Expositionsphase werden die partikulären Ablagerungen und die möglichen Reaktionsprodukte mit dem Substrat im REM an Hand ihrer kristallinen Erscheinungsform und ihrer chemischen Zusammensetzung bestimmt, was bereits weitgehend automatisiert vonstatten gehen kann. Mit Hilfe charakteristischer chemischer Merkmale ist es möglich, die Partikel einzelnen Emittenten zuzuordnen, sodass auch der Anteil der verkehrsbedingten Deposition erfasst werden kann. SCHEUVENS et al. (2011) haben beschrieben, dass in der Parcusstraße in Mainz 25–40 % Zusatzbelastung an PM₁₀ und 50 % der Rußniederschläge durch den Verkehr verursacht sind. Bedenklich stimmt auch der Befund, dass manche der Passivsammler bereits nach wenigen Monaten vollständig mit Partikeln belegt waren, was darauf schließen lässt, dass hier erhebliche Verschmutzungsraten vorliegen.

Die in der Vergangenheit häufiger verwendeten Glassensoren entsprechen heute im Grunde nicht mehr den gestellten Anforderungen, weil durch sie nur die integrale Umweltbelastung mit sauren Schadgasen erfasst wird (VDI Richtlinie 3955, Blatt 2). Die Auswertung erfolgt gemäß einem erprobten und standardisierten Verfahren und ist dementsprechend preisgünstig.

8.4.2 Welche Luftschadstoffe sollen gemessen werden?

In den vergangenen zwanzig Jahren hat die Luftverschmutzung nicht nur in den Ländern der ehemaligen DDR, sondern auch im angrenzenden Tschechien stark abgenommen. Auch die Zusammensetzung der Umweltschadstoffe hat sich verändert. Während die Konzentrationen an SO₂ drastisch gesunken sind, verharren die Stickoxide NO₂ und NO weiterhin auf hohem Niveau. Informationen zu diesem Thema finden sich leicht auf den Webseiten des Umweltbundesamtes oder bei den Umweltbehörden der Länder. An Bedeutung gewonnen hat vor allem die Belastung mit Feinstaub. Die Verschmutzungsraten von Gebäudeoberflächen sind aber hauptsächlich der Deposition von Grobstaub geschuldet. Die Auswahl der zu bestimmenden Luftschadstoffe sollte nicht nur die anorganisch-, physikalisch-chemischen Reaktionen berücksichtigen, sondern auch den möglichen Einfluss dieser Schadstoffe auf biologische Vorgänge einbeziehen. Erste Priorität haben aus diesem Grund partikuläre und gasförmige Luftschadstoffe:

- Feinstaub, Fraktionen PM₂₅, PM₁₀, wenn möglich PM_{2,5}
- Schwefeldioxid SO₂
- Stickoxide NO₂ und NO

- Ammoniak NH_3
- Summe der Kohlenwasserstoffe THC

und unter Umständen

- Fluorid F_2
- Ozon O_3 .

Aufgrund der verbesserten technischen Prozesse wird die Verteilung der Feinstaubfraktionen zu immer feineren Partikelgrößen verlagert, sodass diese ebenfalls gemessen werden sollten. Neue Messungen berücksichtigen sogar die Partikelgröße $\text{PM}_{1,0}$.

Sofern die Möglichkeit besteht, sollen auch die Regeninhaltsstoffe gemessen werden. Die Analysen sollten die

- Kationen: Natrium Na^+ , Kalium K^+ , Magnesium Mg^{2+} und Calcium Ca^{2+}

und die

- Anionen: Sulfat SO_4^{2-} , Chlorid Cl^- , Nitrat NO_3^- und Ammonium NH_4^+

erfassen.

In Einzelfällen mag auch das Anion Fluorid F^- von Bedeutung sein. Erweisen sich die Einzelbestimmungen als zu aufwendig, kann es als ausreichend angesehen werden, auf die Leitfähigkeit des Niederschlagswassers zurückzugreifen. In vielen Fällen sind mit diesem Parameter sehr gute Korrelationen gefunden worden, sodass die Einzelbestimmungen der Anionen und Kationen unterbleiben können. Für besondere Fragen kann die röntgenografische Phasenanalyse der festen Partikel des Niederschlags und des festen Rückstands nach Eindampfen dienen. Sollen Stoffbilanzen aufgestellt werden, ist sowohl die Bestimmung der Niederschlagsmengen und der Regeninhaltsstoffe, als auch die Bestimmung des Ablaufwassers und der darin enthaltenen Inhaltsstoffe erforderlich. Für die Berechnung von Stoffbilanzen darf die Analyse von Hydrogencarbonat HCO_3^- und Carbonat CO_3^{2-} nicht vergessen werden.

8.4.3 Dauer, Auswertung und Darstellung der Messungen

Die Dauer der Schadstoffmessungen muss längerfristig angelegt sein, da nicht die Spitzenbelastungen, sondern die Höhe der mittleren Schadstoffbelastung wichtig ist. Die Messperioden sollten deshalb mindestens ein Jahr umfassen, um Winter- und Sommerbelastung trennen zu können. Die Messwerte sollten auf der Basis von Stundenwerten als Monatsmittelwerte dargestellt werden. Die Messungen können durch häufiger zu wechselnde Passivsammler oder durch optische Partikelzähler (OPC) komplettiert werden.

8.4.4 Welche Bedeutung haben Schadstoffmessungen für die praktische Konservierung?

Messungen der Umweltbelastung sind in erster Linie von wissenschaftlichem Interesse und dienen der Grundlagenforschung. Seit vielen Jahren laufen auf nationaler und internationaler Ebene Expositionsprogramme mit dem Ziel, die Abhängigkeiten des Steinzerfalls vom Klima und Schadstoffmilieu zu untersuchen und die Dauerhaftigkeit von Steinschutzstoffen zu bewerten. So konnten insbesondere für Kalkstein und Marmor Dosis-Wirkungs-Beziehungen nachgewiesen werden, die eine eindeutige Korrelation zu Schadstoffimmissionen und Niederschlagsmengen zeigen [KUCERA (2005); WATT et al. (2008); WATT et al. (2009); IFS (2011); BRIMBLECOMB (2011)]. Mit Hilfe dieser Dosis-Wirkungs-Beziehungen lassen sich für beliebige Standorte die Abtragsraten von Kalkstein und Marmor berechnen, sofern die relevanten Umweltdaten an diesen Standorten bekannt sind. Kritisch ist zu den Dosis-Wirkungs-Beziehungen anzumerken, dass die ermittelten Abtragsraten streng genommen nur für den betreffenden Messzeitraum gültig sind. Seit den 1980er-Jahren, als das MULTI-ASSESS Programm gestartet wurde [KUCERA (2005)], haben sich die Umweltbedingungen so sehr verändert, dass im Verlauf des Projekts die ersten Dosis-Wirkungs-Funktionen wieder verworfen und durch neue, aktualisierte ersetzt werden mussten.

Mit Bedauern ist zu konstatieren, dass das Forschungsinteresse im Bereich des kulturellen Erbes so stark abgenommen hat, dass die mit viel Elan begonnenen Expositionsprogramme abgebrochen werden mussten. Auch auf EU-Ebene ist der Förderungsschwerpunkt »Kulturerbe« nur noch in stark reduziertem Umfang vertreten.

Für den konkreten Einzelfall gewinnt die Messung der Schadstoffbelastung insofern an Bedeutung, als die mit Hilfe der Dosis-Wirkungs-Beziehungen ermittelten Abtragsraten unter Einbeziehung weiterer Kriterien zu der Entscheidung führen können, ein wertvolles Objekt nicht mehr im Freien zu belassen, sondern in einen geschützten Innenraum zu bringen. Auch die Auswahl eines Konservierungsmittels, zumal einer filmbildenden Beschichtung, könnte von bestimmten Schadstoffgrenzwerten, z. B. Ozon, abhängig gemacht werden.

Schadstoffmessungen können nur von einschlägig erfahrenen Instituten oder Fachfirmen durchgeführt werden, die über die erforderliche mobile Messeinrichtung verfügen oder die ausgebrachten Passivsammler regelmäßig abholen und analysieren. Eine Messkampagne zur Erfassung der Umweltbelastung, deren Dauer mindestens ein Jahr betragen muss, erfordert einen beträchtlichen apparativen Aufwand und ist aus diesem Grund sehr zeit- und kostenintensiv, zumal die Messstellen regelmäßig gewartet werden müssen. Auch die Auswertung der anfallenden Datenmengen erfordert einen hohen apparativen und personellen Aufwand. Eine Entscheidung für die Durchführung einer solchen Messkampagne sollte deshalb wohl begründet sein.

9 Methoden und Laboruntersuchungen zur Konservierung ***

Inhalt

9.1	Reinigung	***	197
9.1.1	Warum soll gereinigt werden?		197
9.1.2	Laborversuche.....	**	198
9.1.3	Reinigungsmethoden.....	***	198
9.1.4	Ziel der Untersuchungen		205
9.2	Festigung	***	205
9.2.1	Allgemeines.....		205
9.2.2	Festigungsmittel		205
9.2.3	Ablauf des Untersuchungsprogramms		206
9.2.4	Der Anforderungskatalog	***	207
9.2.4.1	Visuelle Eigenschaften	***	209
9.2.4.2	w-Wert, B-Wert	***	209
9.2.4.3	Eindringtiefe s	***	209
9.2.4.4	Hygrische Dilatation α_{Hy}	**	210
9.2.4.5	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	**	210
9.2.4.6	Festigkeits- und Verformungseigenschaften	***	210
9.2.5	Ziel der Untersuchungen		219
9.3	Fugenmörtel	***	220
9.3.1	Allgemeines.....		220
9.3.2	Bestand und Analyse der Originalmörtel	**	221
9.3.3	Anpassung der Fugenmörtel.....	***	221
9.3.4	Bindemittel.....	***	222
9.3.5	Struktur und Farbe, Sande (DIN EN 1996 und DIN 18550).....	*	225
9.3.6	Untersuchungsprogramm.....	***	226
9.3.6.1	Probenpräparation.....	***	227
9.3.6.2	Erhärtungsschwinden	***	227
9.3.6.3	w-Wert, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	***	227
9.3.6.4	Thermische (α_{th}) und hygrische (α_{Hy}) Dehnung	***	228
9.3.6.5	Druckfestigkeit BD, Haftzugfestigkeit BHZ und E-Modul.....	***	228
9.3.7	Problemfälle	***	229
9.3.8	Ziel der Untersuchungen und prinzipielle Hinweise		229
9.4	Steinersatzstoffe	***	230
9.4.1	Allgemeines.....		230
9.4.2	Materialien	*	230
9.4.2.1	Zement und Kalk		231
9.4.2.2	Kieselgel-gebundene Massen		231
9.4.2.3	Acrylharze.....		232

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

9.4.2.4	Epoxidharze	232
9.4.2.5	Zuschlagstoffe	232
9.4.2.6	Pigmente	233
9.4.3	Untersuchungsprogramm	*** 233
9.4.3.1	Probenpräparation	*** 234
9.4.3.2	Grenzbedingungen für Spannung und Verformung im Verbundsystem Naturstein – Restauriermörtel. Ein Beispiel	*** 235
9.4.4	Ziel der Untersuchungen	239
9.5	Schlämmen und Putze auf Naturstein	** 239
9.5.1	Allgemeines	239
9.5.2	Spezialputze	240
9.5.3	Befund	** 241
9.5.4	Untersuchungsprogramm	** 241
9.5.4.1	Probenpräparation	** 242
9.5.4.2	Struktur und Farbe	** 243
9.5.4.3	Bindemittel	** 243
9.5.4.4	Kriterien für die Verträglichkeit Alt – Neu	** 244
9.5.4.5	Organische Zusätze	** 244
9.5.4.6	Porenraumeigenschaften	** 245
9.5.4.7	Festigkeitsmessungen	** 245
9.5.4.8	Hinweise zur Verarbeitung	** 246
9.5.5	Schlussfolgerungen	246
9.6	Farbanstriche auf Stein	** 247
9.6.1	Allgemeines	247
9.6.2	Farbsysteme: Aufbau und Eigenschaften	247
9.6.3	Befund	** 248
9.6.4	Chemische Analyse	** 249
9.6.5	Untersuchungsprogramm	** 250
9.6.5.1	Probenpräparation	** 252
9.6.5.2	w-Wert, sd-Wert, Künzel-Zahl	** 253
9.6.5.3	Trocknungsverhalten	** 255
9.6.5.4	Biologische Besiedlung	* 255
9.6.5.5	Absolute Farbmessung	* 255
9.6.6	Konservierung von Polychromie	** 256
9.6.7	Probleme der Dauerhaftigkeit	** 259
9.6.8	Kriterien der Denkmalpflege	259
9.7	Hydrophobierung	261
9.7.1	Allgemeines	261
9.7.2	Teilhydrophobierung	263
9.7.3	Wirkungsweise einer Hydrophobierung	263
9.7.4	Selektive Wirksamkeit, Unterschiede Sandstein – Kalkstein	*** 264
9.7.5	Untersuchungsprogramm	*** 267

9.7.5.1	Probenpräparation.	***	268
9.7.5.2	Visuelle Eigenschaften.	***	268
9.7.5.3	Eindringtiefe.	***	268
9.7.5.4	w-Wert, B-Wert (ISO 15148; DIN EN 1925; EN 15801).	***	270
9.7.5.5	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (ISO 12572; EN 15803).	***	271
9.7.5.6	Hygrische Längenänderung Δh_y	**	271
9.7.5.7	Mikrobiologische Beständigkeit.	**	271
9.7.6	Ziel der Untersuchungen.		272
9.8	Natursteinaustausch.	***	272
9.8.1	Allgemeines.		272
9.8.2	Auswahl der Gesteine.	***	273
9.8.3	Untersuchungsmethoden.	**	273
9.8.4	Anastyllose.		275
9.9	Mikrobiologische Prüfungen.	*	275
9.9.1	Allgemeines.		275
9.9.2	Prüfempfehlungen der VDI Richtlinie 3798 (Auswahl).	*	277
9.10	Abschließende Bemerkungen zu den Laboruntersuchungen.		279
9.10.1	Finanzieller Nutzen von Laboruntersuchungen.		279
9.10.2	Begrenzung der Probenanzahl.		279
9.10.3	Laboruntersuchungen erhöhen die Planungssicherheit.		280
9.10.4	Das Konzept Risikoziffer.		280
9.10.5	Zeitlicher Vorlauf.		283
9.10.6	Wer kann Voruntersuchungen durchführen?		283

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

9 Methoden und Laboruntersuchungen zur Konservierung

9.1 Reinigung

Die Laboruntersuchungen dienen dazu, die für das Erreichen der Restaurierungsziele besten und kostengünstigsten Konservierungsmaterialien und -methoden zu finden. Sie machen konkrete Angaben über Materialformulierungen, Anwendungsarten und Anwendungszeiten. Sie gehen in das Leistungsverzeichnis ein und stellen konkrete Vorgaben für den ausführenden Restaurator dar.

9.1.1 Warum soll gereinigt werden?

Bei Gesprächen vor Ort wird immer wieder die Meinung vertreten, Schmutzkrusten könnten eine Schutzschicht darstellen. Dieser Auffassung muss aus folgenden Gründen klar widersprochen werden. Eine Schmutzkruste ist aufgrund ihrer großen inneren Oberfläche ein ausgezeichneter Absorber für Feuchtigkeit und alle gasförmigen und partikulären Schadstoffe. Da in der Kruste kaum Materialien vorhanden sind, welche die eingetragenen Schadgase und Säuren neutralisieren könnten, reagieren diese zwangsläufig an der Unterseite der Kruste mit der Steinsubstanz und zerstören die originale Oberfläche. Da Schmutzkrusten Schadstoffe in größerem Umfang absorbieren als reine Steinoberflächen, beschleunigen sie die Zerstörung, selbst wenn diese zunächst unsichtbar unter der Kruste verborgen bleibt.

Aus der Sicht der Denkmalpflege bestehen für eine Reinigung die folgenden Gründe:

- Beseitigung von Risikofaktoren wie erhöhte Schadstoffadsorption, Salzanreicherungen und Verzögerung der Trocknungsgeschwindigkeit
- Vorbereitung von Konservierungsmaßnahmen durch Wiederherstellung der kapillaren Saugfähigkeit
- ästhetische Gründe: Entfernung von optisch störenden Verschmutzungen.

In keinem Fall sollten allein ästhetische Gründe für eine Reinigung ausschlaggebend sein, sondern immer die Frage nach der Erhaltung und Sicherung der Originalsubstanz. Da auch schonende Reinigungsverfahren einen, wenn auch geringen, Eingriff darstellen, müssen Reinigungen immer äußerst sorgfältig geprüft und ausgeführt werden, um mögliche negative Auswirkungen auf ein Minimum zu beschränken. Bezüglich näherer Informationen über die Anforderungskriterien der Denkmalpflege wird auf SNETHLAGE (1996) verwiesen.

Wertvolle Einblicke liefert auch eine Studie von Historic Scotland und der Gordon University in Edinburgh. Sie besagt, dass an Gebäuden, die mit Säuren gereinigt

wurden, die Schäden nach einigen Jahren größer sind als an Gebäuden aus gleichem Gestein, die nicht gereinigt wurden [YOUNG et al. (2003 a und b)]. Untersuchungen wie diese belegen, dass falsche Vorstellungen von Sauberkeit und falsche Reinigungsmethoden ein großes Gefahrenpotential darstellen.

9.1.2 Laborversuche

Durch Messung der Wasserdampfdiffusion und der kapillaren Saugfähigkeit kann beurteilt werden, ob die Verschmutzung die Trocknung des Gesteins bereits gravierend behindert und die ausreichende Aufnahme von Schutzstoffen durch Reduktion der kapillaren Förderleistung verhindert. Beide Messungen stehen in Ergänzung zu den unmittelbaren Objektmessungen in Arbeitsschritt 6.4. Zur Durchführung der Untersuchungen ist eine repräsentative Auswahl von Proben erforderlich. Zerstörungsfrei am Objekt kann nur die Wasseraufnahme nach Karsten durchgeführt werden.

Die Laboruntersuchungen beinhalten weiterhin die chemische Analyse der Schmutzschichten und deren Schichtenabfolge. Im Labormaßstab kann überprüft werden, ob die Schmutzablagerungen im kalten oder heißen Wasser löslich sind, oder ob organische Verschmutzungen vorliegen, welche den Einsatz von Lösungsmitteln, z. B. in Kompressen erfordern würden. Sollten größere Proben zur Verfügung stehen, können im Labor erste Erprobungen von Mikroheißdampf- oder Mikro-Trockenstrahlverfahren vorgenommen werden. Mit dem Binokular, Stereomikroskop oder REM können die Muster dahingehend ausgewertet werden, ob es gelungen ist, die Schmutzablagerungen auch aus den Vertiefungen zu entfernen. Auch eine Messung der Rauheit, auf die später im Kapitel »Musterfläche« noch genauer eingegangen wird, könnte nutzbringend eingesetzt werden, um einen Methodenvergleich herzustellen.

In allen Fällen ist besondere Aufmerksamkeit auf die Frage zu richten, inwieweit durch partielle Vorfestigungen Schäden bei der eigentlichen Reinigung zu verhindern sind. Im Allgemeinen tritt jedoch die Bedeutung der Laboruntersuchungen zur Reinigung hinter der Auswertung von Reinigungsmustern an größeren Flächen am Objekt zurück. Dennoch können sie von Fall zu Fall zur Eingrenzung der Reinigungsmethoden, mit denen die Muster angelegt werden sollen, hilfreich sein.

9.1.3 Reinigungsmethoden

Um den gewünschten Reinigungserfolg zu erzielen, stehen eine Reihe von Methoden zur Verfügung, die in Tabelle 5 kurz im Überblick zusammengefasst sind. Die Tabelle enthält bewusst keine Reinigungsmittel, die Säuren oder Laugen enthalten. Auf diese Mittel soll und kann ohnehin verzichtet werden, da die Folgeschäden in den meisten Fällen beträchtlich sind. Eine Ausnahme machen die Reinigungspasten mit den Wirkstoffen EDTA und $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, die in Tabelle 5 aufgeführt sind, obwohl sie, wenn

auch weitaus geringer als starke Laugen, alkalisch wirken. Während EDTA-Pasten gegenwärtig in Deutschland kaum eine Rolle spielen, haben $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ -Kompressen in jüngster Zeit eine Renaissance erfahren, weil sie zur Umwandlung von Gips in Calcit eingesetzt werden, wobei als Nebeneffekt auch eine Reinigung eintritt. Neben den genannten Wirkstoffen bieten die Carbonat-belegten Ionenaustauscher eine wirkungsvolle Alternative. Diese Art Ionenaustauscher fängt Sulfationen ab und setzt Carbonationen frei, sodass Gipskrusten angelöst, entfernt und in Calcit umgewandelt werden, ohne dass das unerwünschte Nebenprodukt $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, ein extrem lösliches und migrationsfähiges Salz, entsteht, welches der Vorschrift nach noch mit Barytwasser unschädlich gemacht werden müsste.

Tabelle 5: Methoden der Reinigung von Naturstein (Auswahl)

Methode	Parameter	Anwendung	Risiken
Trocken	Absaugen, Abbürsten, Skalpell	Lockerer Schmutz und Krusten, Salzausblühungen	Verletzung der Oberfläche, Substanzverlust
Kaltwasser	Sprühen ohne Druck	Gipskrusten, dichte Gesteine	Durchfeuchtung, offene Fugen
Druckwasser	kalt/warm/heiß 10–20°, 60–90 °C bis ca. 150 bar	Gipskrusten, dichte Gesteine	Materialverlust bei weichen Oberflächen, Abfallen von Schuppen, Durchfeuchtung bei offenen Fugen
Mikrodampf	140–180 °C	Staubschichten, Gipsschichten auf sensiblen Oberflächen wie Farbschichten	Beschädigung der Farbschichten
Dampfstrahl	140–180 °C 20–40 bar	Gipskrusten, dichte und poröse Gesteine	Materialverlust bei sandenden und mürben Oberflächen
Reinigungspasten	Wirkstoffe: EDTA, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, K_2CO_3 , Carbonatbelegter Ionenaustauscher. Trägerstoffe: meist Mischungen aus verschiedenen Tonen (Attapulgit, Sepiolit, Bentonit), Methylcellulose, Cellulose, Hochdisperse Kieselsäure, Superabsorber u. a.	Gipskrusten, bes. auf Kalkstein und Marmor. Umwandlung von Gips in Calcit. Auftragen der Paste, Einwirkzeit beachten	vollflächiges Anliegen der Paste auf der ganzen Oberfläche. Salzbildung $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ und Salzwanderung, Anlösung von Calcit (EDTA), Vergraugung. Entfernung von feinen Tonschleiern.

Tabelle 5 (Fortsetzung)

Methoden	Parameter	Anwendung	Risiken
Partikelstrahl	Glasschlacke, Hohlglaskugeln, Größe 0,1–0,5 mm trocken oder feucht	alle Arten von Verschmutzung, bes. dichte und harte Gesteine	Materialverlust bei sandenden und mürben Oberflächen
Mikro-Partikelstrahl	verschiedene Materialien, z. B. Korund, Quarz, Calcit, Hohlglaskugeln, Feinsand Größe 0,05–0,1 mm	alle Arten von Verschmutzung und Gesteine	Staubentwicklung, Gefährdung von losen oder pudernden Farbschichten möglich
Laser	Wellenlänge, Pulsfrequenz, Fokus (Energiedichte)	alle Arten von Verschmutzung, bes. geeignet für helle Kalksteine und Marmor	Verfärbung von Pigmenten bei Mal-schichten

Zuerst sollte immer versucht werden, mit einem trockenen Strahlverfahren zum Erfolg zu kommen, was in der Praxis auch bei sensiblen Oberflächen meist gelingt. Die Mikropartikelstrahlmethoden haben in den letzten Jahren durch die Verwendung von Mikropartikeln <100 µm große Verbreitung gefunden und sind nicht mehr mit den Sandstrahlverfahren früherer Zeiten zu vergleichen. Dennoch sollte nicht unerwähnt bleiben, dass zähe Verkrustungen mit dem erwünschten, niedrigen Arbeitsdruck mitunter nicht abgetragen werden können. Es macht in diesen Fällen keinen Sinn, den Strahldruck weiter zu erhöhen, weil dann nur die etwas lockeren Oberflächenbereiche abgesprengt werden und ein äußerst unregelmäßiges Erscheinungsbild hell – dunkel entsteht.

Neben den trockenen Strahlverfahren können auch die verschiedenen Wasser-Reinigungsmethoden erprobt werden. Es muss allerdings gewährleistet sein, dass kurze Anwendungszeiten ausreichen, den Schmutz zu entfernen, da Durchfeuchtungen des Mauerwerks vermieden werden müssen. Die Nachteile und Gefahren liegen in der langen Trockenzeit, in der die weiteren Konservierungsarbeiten ruhen müssen, und in der möglichen Durchfeuchtung von Innenräumen.

Gezielte Berieselungen eng umgrenzter Flächen über längere Zeiträume können in der Tat manche gipshaltigen Schmutzauflagerungen und -krusten lösen. Sie dürfen jedoch nur dann Anwendung finden, wenn die Ableitung des mit gelösten Stoffen belasteten Wassers vollständig gewährleistet ist und angrenzende Mauerwerkspartien nicht tangiert werden.

Auf stabilen Oberflächen kann zur Entfernung einer nicht zu fest haftenden Verschmutzung auch die Anwendung einer Latexfolie wie Arte Mundit in Erwägung gezogen werden. Die flüssige Latexemulsion wird auf die Oberfläche aufgestrichen und

nach dem Trocknen mit der Hand abgezogen. Es besteht jedoch die Gefahr, dass lockere Bestandteile der Oberfläche ebenfalls mit abgerissen werden.

Mit diesen herkömmlichen Methoden wird man in der Regel an größeren Gebäuden und Fassaden auskommen. Für Reinigungsmaßnahmen an kleinen und hochwertigen Objekten sind auch folgende Verfahren interessant:

In den vergangenen Jahren hat sich die Lasertechnik für Reinigungszwecke in der Praxis fest etabliert. Sie wird in der Zwischenzeit nicht nur für Naturstein, sondern auch für Glasmalerei, Metalle, Wandmalerei, Elfenbein, Papier und andere Materialien aufgewendet. Die Laserreinigung wird besonders bei hellen Gesteinen mit gutem Erfolg eingesetzt. Das Verfahren steuert sich sozusagen selbst, da der Laserstrahl nach dem Abtragen der schwarzen Kruste von der hellen Gesteinsoberfläche reflektiert wird, sodass er die eigentliche Oberfläche nicht beschädigen kann. In der Praxis am meisten verwendet werden gepulste Nd-YAG Laser, weil sie leistungstark und trotzdem transportabel sind. Durch Variation des Fokus und der Pulsfrequenz lässt sich ein breites Energiespektrum abdecken, welches für die Entfernung der meisten Verschmutzungen ausreichend ist. Eine neuere Entwicklung stellt der Rucksacklaser dar. Es handelt sich um einen gepulsten Diodenlaser, der mit einer Luftkühlung versehen ist und nur 12 kg wiegt, weshalb er während des Arbeitens auf dem Rücken getragen werden kann.

Während beim Q-Switch gesteuerten Laserpuls des Nd-YAG Lasers ein punktförmiger Laserpuls durch eine Veränderung des Fokus auf die gewünschte Flächengröße gestreut werden kann, erzeugt der Rucksacklaser einen aus lauter Einzelpulsen bestehenden Laserstrich von ca. 5 cm Länge.



Bild 95: Fokalstrich
eines Rucksacklasers

Für einen Vergleich der Leistungsfähigkeit und der Eignung für die Restaurierung ist die Laserleistung allein keine geeignete Vergleichsgröße. Entscheidend ist vielmehr, aber nicht allein, der Energieeintrag pro Fläche. Dieser wird durch die Pulsdauer und die Schärfe des Fokus bestimmt. Messungen an verschiedenen schwarzen Krusten auf Marmor haben die folgenden Energieschwellen ergeben, bei denen ein Abtrag erfolgt:

- Abtrag schwarze Kruste mit Gips $6,8 \text{ J/cm}^2$
- Abtrag schwarzer Pilzbelag $0,3\text{--}0,5 \text{ J/cm}^2$
- Abtrag Schimmel $0,1\text{--}0,2 \text{ J/cm}^2$
- Abtrag Marmor 17 J/cm^2

Mit diesen Zahlenwerten kann gezeigt werden, dass zwischen dem Energieeintrag zum Entfernen der Verschmutzungen und dem Energieeintrag, bei dem eine Beschädigung des Marmors eintritt, eine große Schwelle vorhanden ist, die sicherstellt, dass durch den Laser kein Schaden am Gestein entstehen kann.

Für die Praxis ist jedoch auch das Reinigungsbild entscheidend. Je nach Oberflächenbeschaffenheit wird möglicherweise der Streifenlaser das homogenere Erscheinungsbild liefern. Da es sich bei Laserlicht um Lichtstrahlen handelt, ist die Zugänglichkeit in Hinterschneidungen möglicherweise eingeschränkt.

Noch nicht befriedigend gelöst sind die Fragen der Laserreinigung bei polychromen Objekten, weil mit wenigen Ausnahmen die Pigmente durch den Impact des Laserstrahls farblich verändert werden. Besonders gefährdet sind OH-haltige Pigmente, die in die zugehörigen Oxide umgewandelt werden. Dazu zählen leider alle wichtigen mineralischen Pigmente wie Azurit, Malachit, Bleiweiß, Ocker, Grüne Erden und andere. Eine Ausnahme bildet Lapislazuli, das vom Laserstrahl nicht angegriffen wird. Auch farbige Gesteine können bei der Laserreinigung verfärbt werden, wie zum Beispiel ockerfarbene Sandsteine, deren farbgebendes Pigment Limonit durch den Laserstrahl zu rotem Eisenoxid oxidiert werden kann.

Vier Praxisbeispiele mögen die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten der Laserreinigung für Naturstein belegen. In Wien ist der gesamte Turm von Sankt Stephan von einer privaten Firma mit Laser gereinigt worden, wobei mehrere Geräte gleichzeitig zum Einsatz gekommen sind. Die Methode soll sich finanziell als nicht kostspieliger erwiesen haben als die traditionelle Reinigung mit Partikelstrahltechnik. Die Dombauhütte Bamberg hat nach eingehender Prüfung im Jahr 2016 einen Rucksacklaser erworben, mit dem nach und nach alle Domtürme gereinigt werden sollen. Das Schlosskapellenportal in Dresden konnte mit Hilfe der Laserstrahlreinigung von seinem verschmutzten und konservatorisch ungeeigneten Ölfarbanstrich befreit werden. Das Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden berichtet, dass es gelungen ist, durch Variation von Laserimpulszahl und Impulsintensität den Energieeintrag in die Malschicht der Wandmalerei in der Kirche Sankt Martin in Meerane (Sachsen) so auf die verwendeten Pigmente abzustimmen, dass diese nicht verändert wurden. Das letzte Beispiel möge zeigen, dass es mit einem präzisen Wissen um die Lasertechnik und mit hinreichender Experimentierzeit durchaus gelingen

kann, auch polychrome Farbschichten ohne Pigmentschädigungen zu reinigen. Da die Absorption des Laserlichts jedoch auch vom Bindemittel der Farbschicht abhängig ist, gibt es noch keine Routineeinstellungen, welche den Einsatz des Lasers abhängig von den Pigmenten der Polychromie gefahrlos anwendbar machen.

Wer sich näher mit der Laserreinigung befassen möchte, sollte sich in den Berichten der LACONA Konferenzen informieren, bei denen auf internationaler Ebene die neuesten Forschungen über den Einsatz von Laser in der Konservierung von Kulturgütern vorgetragen wurden. In Deutschland fand regelmäßig das sogenannte »Laserforum« statt, auf dem über Erfahrungen mit der Laserreinigung berichtet wurde. Eine Zusammenfassung der in mehreren DBU geförderten Projekten gesammelten Erfahrungen zur Laserreinigung haben SIEDEL & WIEDEMANN (2002) vorgelegt. Ein Beispiel einer Laserreinigung von Marmor zeigt Bild 96.

In jüngster Zeit gewinnt das Trockeneisstrahlen an Beliebtheit. Der Reinigungseffekt beruht auf der Kombination von thermischem und mechanischem Schock. Es hat den unbestreitbaren Vorteil, dass das Objekt nicht mit Wasser belastet wird. Erfahrungen in der Praxis zeigen jedoch, dass die Methode bei vielen empfindlichen Oberflächen zu aggressiv ist. Zudem verhindert der Schleier des Trockeneisstrahls den freien Blick auf das Objekt – eine unabdingbare Voraussetzung jeder Reinigung und Konservierung (Bild 97). Das Sonderverfahren Sodastrahlen wird hier nicht besprochen, weil es in der Denkmalpflege keine praktische Bedeutung besitzt.



Bild 96: Laserreinigung einer Marmorskulptur aus dem Park von Schloss Sanssouci mit NdYAG Laser (Werkstattaufnahme: K. Lange)



Bild 97: Reinigung mit Trockeneis (Aufnahme: Pfanner)

Wie eine kleine Versuchsserie mit Reinigungsmustern am Objekt, die einer Laboranwendung gleichzusetzen ist, dokumentiert werden kann, zeigt Bild 98.

Festlegung und Dokumentation der Probefelder

Ort, Objekt: Regensburg, Porta Praetoria
Anlaß: Musterflächen für die Durchführung der Probereinigung
Termin: 17.10.2001
Durchführung: Dombauhütte Naumburg, Herr Kolter; steinwerkstatt Regensburg, Herr Endemann.

Probefeld 1, Übersicht:

Dichte Oberflächenkruste ohne Malschichten oder flächenhafte Putzfragmente.

Ziel der Reinigung:

Abnahme der schwarzen Kruste unter vollständiger Beibehaltung der römischen Bearbeitungsspuren.



Probefeld 1, Angabe der Reinigungsfelder;

bitte je drei Felder, ca. 10 x 10 cm mit Randbegrenzung gemäß Zeichnung (ungefähre Angabe der Probeflächen).

Dombauhütte Naumburg:

- 1) LASER
- 2) PASTE (Endemann)
- 3) Partikelstrahl
- 4) Kombiverfahren

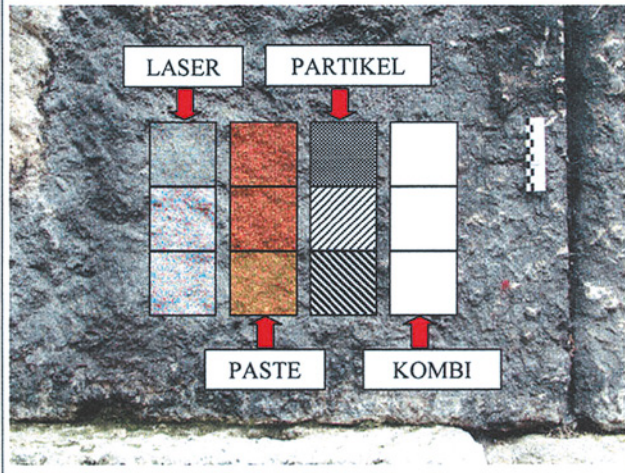


Bild 98: Reinigungsmuster an der Porta Prätoria in Regensburg [DREWELLO et al. (2002)]

9.1.4 Ziel der Untersuchungen

Die Laboruntersuchungen sollen im Ergebnis eine begrenzte Auswahl von Reinigungsmethoden ausweisen, die mit Aussicht auf Erfolg an einer Musterfläche erprobt werden können. Weiterhin müssen sie die zulässige Reinigungstiefe festlegen, die sich aus der Lage der Originaloberfläche ergibt, und über Risiken wie lockere, von Mörbzonen unterlagerte Krusten etc. Auskunft geben. Sind solche Bereiche vorhanden, sollen auch Materialien und Mittel genannt werden, mit denen eine Sicherung gefährdeter Partien und eine Vorfestigung ausgeführt werden können. Die Untersuchungen zu dieser Frage sind in den Aufgabenbereich Festigung eingebunden.

9.2 Festigung

9.2.1 Allgemeines

Aufgrund von Beobachtungen und unterstützt durch Messungen weiß man, dass jeder Verwitterungsprozess mit einem Festigkeitsverlust des Gesteins verbunden ist. Konservierung beinhaltet deshalb das Ziel, dem Gestein die verloren gegangene Festigkeit zurückzugeben, um den Schadensfortschritt zu verzögern. Die Festigung stellt aber keine prophylaktische Schutzmaßnahme dar. Wenn die Zustandsbedingungen des Objektes nicht verbessert werden, wird die Verwitterung nach einer gewissen Zeitspanne wieder zu Schäden führen, sodass auch in Zukunft erneute Behandlungen erforderlich sein werden.

9.2.2 Festigungsmittel

Eine Übersicht über die gegenwärtig marktgängigen Stoffgruppen gibt Tabelle 6. Eine Liste mit den heute üblichen Konservierungsmitteln der verschiedenen Hersteller ist auf der Webseite des Instituts für Steinkonservierung e. V. (IFS) zugänglich (www.institut-fuer-steinkonservierung.de, Stand August 2017). Die Auswahl, welche Mittel in den Voruntersuchungen getestet werden, sollte dem beauftragten Experten überlassen bleiben. Es ist jedoch zu empfehlen, möglichst nur solche Mittel auszuwählen, die bereits eine Langzeiterfahrung nachweisen können oder wenigstens einer Stoffgruppe entstammen, mit der schon vielfältige Erfahrungen vorliegen. Langzeitverhalten und biologische Beständigkeit sollten also zumindest in gewissem Rahmen bekannt sein.

Tabelle 6: Materialien zur Natursteinfestigung

Stoffklasse	Modifikationen	Formulierungen	Anwendung
Kieselsäureester	monomer, vorhydrolysiert, mit Haftvermittler, mit Weichsegment	Lösungsmittel, Katalysator, Verdünnung	Tränkung
Kieselsole	Größe der Solpartikel 7–30 nm	sauer oder alkalisch, Verdünnung mit Wasser	Oberflächenfestigung
Nanokalk Sol	in Alkohol dispergierte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -partikel, Partikelgröße 150 nm	Lösung und Verdünnung in Alkoholen	Festigung Kalkstein, Putze, Mörtel
Acrylharze	verschiedene Alkylierungen und Estergruppen, Copolymere	Reaktions- oder Lösungsmittelharz, Lösungsmittel, Katalysator, Konzentration	Klebung, Oberflächenfestigung, Sonderfall: Acrylharz-volltränkung
Polyurethane	verschiedenen Hart- und Weichsegmente, Polymerisationsgrad	Lösungsmittel, Konzentration	Tränkung

Neu in die Liste wurden die Nanokalke aufgenommen, welche sich weniger für Sandsteine, sondern eher für poröse und grobporige kalkhaltige Materialien wie Kalksteine, Mörtel und Putze eignen. Wie bei den Kieselsoleen besteht auch bei diesen das Risiko, dass die Nanopartikel an der Oberfläche ausgefällt werden. Die Behandlung kann mit einer Tränkung mit Kieselsäureester in einem zweiten Arbeitsschritt kombiniert werden. Die hohe Alkalität bewirkt aber eine schnelle Hydrolyse des Kieselsäureesters. Der Verwendungsbereich von Nanokalken ist deshalb ebenso wie der von Kieselsoleen genau zu überdenken und einzugrenzen.

9.2.3 Ablauf des Untersuchungsprogramms

Das folgende Untersuchungsprogramm ist ganz auf die Prüfung von Sandsteinen zugeschnitten, die für den Einsatz der besprochenen Methoden geeignet sind. Für Marmor, der bei uns fast ausschließlich für Skulpturen verwendet wurde, sind andere Ansätze zu wählen, die im Kapitel E2 »Marmor« kurz behandelt werden.

Die Notwendigkeit einer Festigungsmaßnahme leitet sich immer vom Zustand des verwitterten Gesteins und von den Parametern des unverwitterten Gesteins ab. Man beginnt demnach damit, zunächst die Messungen am unbehandelten Gestein durchzuführen. Die Kenndaten des verwitterten Gesteins erhält man aus den Oberflächenabschnitten der entnommenen Proben (Bohrkerne), die des unverwitterten aus den inneren Abschnitten der Bohrkerne.

Zum Vergleich können auch die Gesteinskenndaten aus Arbeitsschritt 6 herangezogen werden. Weiterhin sind die diversen Gesteinsvarietäten zu berücksichtigen, was bedeutet, dass alle Messungen für jede der Varietäten getrennt durchgeführt werden müssen.

Die in Tabelle 7 genannten Qualitätsprüfungen beinhalten also Untersuchungen, die an drei Probenserien durchgeführt werden müssen: an unverwitterten, an verwitterten und an behandelten Proben. Aus dem Umfang der Messungen wird ersichtlich, dass für das Untersuchungsprogramm eine ziemlich große Anzahl von Proben, am besten von Bohrkernen, benötigt wird. Es ist empfehlenswert, für die Probeentnahme an einem Gebäude zum Beispiel einen oder mehrere Quader auszuwählen, die aufgrund ihrer starken Schäden ausgewechselt werden müssen.

9.2.4 Der Anforderungskatalog

Aufgrund der Forschungsarbeiten im Rahmen des BMFT-Projekts »Steinzerfall – Steinkonservierung« ist es möglich gewesen, für bestimmte Eigenschaften eindeutige Qualitätskriterien aufzustellen, die eine absolute Bewertung erlauben [SASSE & SNETHLAGE (1997)]. Die in dieser Publikation veröffentlichten Kriterien besitzen noch heute Gültigkeit, was den eindeutigen Nachweis liefert, dass seit dieser Zeit mangels eines hinreichend dotierten Forschungsverbunds keine Revision dieser Empfehlungen mehr erfolgt ist.

Für die Beurteilung einer Festigungsmaßnahme kann man sich an den in Tabelle 7 genannten Anforderungen orientieren. Es wird weiterhin darauf hingewiesen, dass der identische Anforderungskatalog später auch noch bei der Auswertung der Musterfläche und bei der Nachkontrolle benötigt wird. Für die einzelnen Eigenschaften gelten die nachfolgend näher erläuterten Kriterien.

Tabelle 7: Qualitätsprüfungen für die Natursteinfestigung

Symbol	Eigenschaft	Dimension	Prüfmethode	Anforderung 1)
–	visuelle Eigenschaften	–	visuelle Beobachtung; quant. siehe Tab. 12, Kap. 9.4.3.2	mögl. keine Farbänderung mögl. keine Dunklung kein Glanz
w	Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² /h	DIN EN 1925 Karsten	$w_i \leq w_o$
B	Wassereindringkoeffizient	cm/h	DIN EN 1925	$B_i \leq B_o$
s	Eindringtiefe	cm	kapillares Saugen, 5 min.	größer als Zone der max. mittleren Feuchte $w = 0,1 \dots 0,5$: $s = 1,0$ cm $w = 0,5 \dots 3,0$: $s = 3,0$ cm $w > 3,0$: $s = 6,0$ cm (w unbehandeltes Gestein)
α_{Hy}	hygrische Längenänderung	$\mu\text{m/m}$	DIN 52450 (zurückgezogen)	keine Zunahme gegenüber unbehandeltem Gestein
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	–	CEN/TC 346: EN 15803 ISO 12572 dry + wet cup	Zunahme $\leq 20\%$
B_{BZ}	Biegezugfestigkeit*	N/mm ²	Ringauflage an Bohrkernscheiben, Lagerung 20/65	$B_{BZ,i} = B_{BZ,o}$ ausgeglichenes Festigkeitsprofil, ansonsten: $(B_i - B_o)/B_o < 0,5$ und $\Delta B_i/\Delta x < 0,2$ N/mm ² · mm
E-Modul	Elastizitätsmodul*	kN/mm ²	statischer oder dyn. E-Modul	$E_i \leq 1,5 E_o$ und $E_i/B_i \leq E_o/B_o$ möglichst ausgeglichenes E-Modulprofil und $\Delta E/\Delta x \leq 0,1$ kN/mm ² · mm
B_{HZ}	Haftzugfestigkeit*	N/mm ²	Lagerung 20/65	$B_{HZ,i} = B_{HZ,o}$ ausgeglichenes Festigkeitsprofil
vp	Ultraschallgeschwindigkeit*	km/s	Lagerung 20/65	$v_{p,i} = v_{p,o}$ ausgeglichenes Profil
BWS	Bohrwiderstand*	mm/Zeit oder N	Lagerung 20/65	ausgeglichenes Bohrwiderstandsprofil
*	Von den mit (*) bezeichneten Methoden ist mindestens eine zur Beurteilung der Festigungswirkung und eine E-Modul-Bestimmung auszuführen.			
1)	Index i: behandeltes Gestein, Index o: unbehandeltes Gestein			

9.2.4.1 Visuelle Eigenschaften

Durch die Behandlung soll das optische Erscheinungsbild des Gesteins farblich nicht verändert werden. Das Festigungsmittel darf keine, ein bestimmtes Ausmaß überschreitende Dunklung verursachen. Da fast alle Festiger eine gewisse Dunklung nach sich ziehen, macht es wenig Sinn, dieses Kriterium genauer festzulegen, sodass nach subjektiven, visuellen Beurteilungen entschieden werden kann. Glanz und Grauschleier dürfen aber unter keinen Umständen auftreten.

9.2.4.2 w-Wert, B-Wert

Wasseraufnahmekoeffizient w und Wassereindringkoeffizient B sollen entweder gleich bleiben oder abnehmen. Üblicherweise tritt durch eine Festigung eine Erniedrigung von w - und B -Wert auf, da das Porengefüge verändert und stark saugfähige Grobporen verengt werden. Die Messungen können nach DIN EN 1925:1999-05 (ISO 16148) bzw. CEN/TC 346: EN 15801 oder mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen [WENDLER & SNETHLAGE (1989)] ausgeführt werden.

9.2.4.3 Eindringtiefe s

Die Eindringtiefe s soll die Zone mit verminderter Festigkeit überbrücken und bis in das gesunde Gestein reichen. Wie die Baupraxis zeigt, sind Saugzeiten von mehr als fünf Minuten unrealistisch, weil in der Regel schneller gearbeitet werden muss. Die erforderliche Eindringtiefe sollte deshalb in dieser Zeit, besser sogar in noch kürzeren Saugzeiten um zwei Minuten erreichbar sein. Die als Anforderungen genannten Mindesteindringtiefen beziehen sich auf die Lage des Maximums der mittleren Feuchteverteilung, die gesteins- und expositionsabhängig verschieden ist [SNETHLAGE & WENDLER (1996, 1997)]. Diese Tiefenlage ist in erster Näherung w -Wert-abhängig, sodass sich folgende Anhaltswerte ergeben:

- $w = 0,1 \dots 0,5$: $s \geq 1 \text{ cm}$
- $w = 0,5 \dots 3,0$: $s \geq 3 \text{ cm}$
- $w > 3,0$: $s \geq 6 \text{ cm}$

Dass die geforderten Ziele nicht oder nur schwer erreichbar sind, ist dem Verfasser klar. Eine Lösung bietet sich dadurch an, nur die kritischen Fassadenbereiche länger und mehrmals zu Fluten. Andererseits kann besonders bei Werkstattarbeiten an Skulpturen, durchaus aber auch an Gebäudefassaden, die Verwendung von Kompressen erprobt werden.

Die oben genannten Näherungswerte für die Eindringtiefe von Steinfestigern übertreffen die Anforderungen für Hydrophobierungsmittel, wie sie in Kapitel 9.7 auf der Grundlage der Empfehlungen der WTA Arbeitsgruppe 3.17 beschrieben sind. Die Unterschiede sind dadurch begründet, dass im Fall einer Festigung immer die entfestigte Zone überbrückt und das unverwitterte Gestein erreicht werden muss, während es

im Fall einer Hydrophobierung genügt, eine ausreichend tiefe Oberflächenzone zu imprägnieren. Bei der Schalenbildung an Schilfsandsteinen kann beispielsweise beobachtet werden, dass trotz eines mittleren w -Wertes von etwa $3 \text{ kg/m}^2 \text{vt}$ die Mürbzone in einer Tiefe von 2 bis 3 cm liegt, sodass der Steinfestiger eine Eindringtiefe von mindestens 3,5 cm erreichen sollte, was entscheidend über den Anforderungen an die Hydrophobierungsmittel liegt.

9.2.4.4 Hygrische Dilatation α_{hy}

Da die hygrische Dilatation, d. h. die Quellung und Schrumpfung unter dem Einfluss wechselnder Feuchte, einen entscheidenden Parameter der Gesteinszerstörung darstellt, darf gerade diese Eigenschaft gegenüber dem unbehandelten Gestein nicht nachteilig verändert werden. Sie darf auf keinen Fall zunehmen; vielmehr ist eine Reduktion der Feuchtedehnung durch die Behandlung positiv zu bewerten. Wenn es sich um Gesteine mit hohem Tongehalt und hoher hygrischer Dehnung handelt, ist eine Tränkung mit Anithygro in Erwägung zu ziehen. Die Chemikalie reduziert die Feuchtedehnung um bis zu 50 %, ohne die kapillare Wasseraufnahme und die Wasserdampfdiffusion zu beeinflussen. Das Produkt sollte jedoch nie ohne vorgeschaltete Labormessungen zum Einsatz kommen.

9.2.4.5 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ sollte immer mindestens unter wet cup-, wenn möglich auch unter dry cup-Bedingungen bestimmt werden. Die Versuchsanordnung ist nach ISO 15148 bzw. CEN/TC 346: EN 15803 einzurichten. Das angegebene Anforderungskriterium für die Zunahme des μ -Wertes ($\leq 20 \%$) ist an der allgemeinen Erfahrung ausgerichtet und nicht streng messtechnisch begründet. Ein Anstieg der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in der Größenordnung von 20 % liegt meist im Rahmen der natürlichen Streubreite eines Gesteins und ist deshalb zu akzeptieren. Deutliche Filmbildungen und Dampfdiffusionssperren, bei denen dann der Diffusionswiderstand gleich um Größenordnungen ansteigen kann, dürfen aber unter keinen Umständen hingenommen werden.

Wie später im Kapitel 9.6 »Farbanstriche auf Stein« gezeigt, kann auch für die Festigung die Beurteilung mit Hilfe des s_d -Wertes und der Künzel-Zahl [KÜNZEL (1969), DIN EN 1062] angewendet werden.

9.2.4.6 Festigkeits- und Verformungseigenschaften

In einem ersten Schritt soll das Ausmaß und die Tiefe der Entfestigung im Oberflächenbereich bestimmt werden. Es ist zu prüfen, ob bereits eine Schalenbildung erkennbar ist. Die Ergebnisse dieser Messungen bestimmen den weiteren Ablauf des Untersuchungsprogramms. Die erforderliche Eindringtiefe und damit die benötigte Anwen-

dungsdauer hängen von der Tiefe der geschwächten Zone ab, die, wie weiter oben gezeigt, mit dem w -Wert und dem Maximum der mittleren Durchfeuchtung korreliert.

Welche Messmethoden sind geeignet?

Für die Bestimmung der Festigkeit bieten sich unterschiedliche Methoden an. Da aber in jedem Fall die Festigkeit als Funktion der Tiefe benötigt wird, sind nur diejenigen Messverfahren geeignet, welche die Bestimmung eines Tiefenprofils zulassen. Die Vor- und Nachteile der heute gängigen Methoden, die bereits im Arbeitsschritt 6 besprochen wurden, seien hier nochmals kurz wiederholt:

- Biaxiale Biegezugfestigkeit an Bohrkernscheiben mit Ringauflage: β_{BZ} (N/mm²). Vorteil: Ermittlung eines E-Moduls möglich. Bohrkerndurchmesser mind. 50 mm, Scheibendicke mind. 5 mm. Es ist zu berücksichtigen, dass der so gemessene E-Modul nicht mit dem E-Modul im Druckversuch und dem dynamischen E-Modul übereinstimmt.
- Abzugfestigkeit an Bohrkernscheiben: β_{HZ} (N/mm²). Vorteil: apparativ einfacher und billiger. Bohrkerndurchmesser mind. 30 mm, Scheibendicke mind. 5 mm.
- Ultraschallmessung am Bohrkern als Profil: Kompressionswelle v_p (km/s). Vorteil: schnelle Messung, relativ kostengünstig, Auflösung 5 mm. Bei Geräten, welche auch für die Messung der Transversalwelle eingerichtet sind, kann mit hinreichender Näherung auch der E_{dyn} berechnet werden.
- Bohrhärteprofil: mm/min Bohrfortschritt oder Steigungswinkel der aufgezeichneten Kurve. Neue Geräte messen entweder mit Hilfe einer Druckzelle direkt die erforderliche Bohrkraft in Newton (N) oder elektronisch den Stromverbrauch. In beiden Fällen erhält man Tiefenprofile der aufzuwendenden Kraft bzw. des Energieverbrauchs. Vorteile der Methode: Die Messung kann am Objekt ausgeführt werden. Die Bohrlöcher sind sehr klein, da nur 2–5 mm starke Bohrer verwendet werden. Die Methode ist schnell und kostengünstig. Ein Vergleich mit klassischen Festigkeitswerten ist möglich, wenn Vergleichswerte vorliegen. Auflösung je nach Gerät 0,5 bis 2 mm, auch oberflächliche Entfestigungen sind auflösbar. Nachteile der Methode: nur bis ca. 30 mm Tiefe anwendbar. Bei größeren Bohrtiefen spielt der Bohrmehltransport eine immer größere Rolle und führt zu einer scheinbaren Erhöhung des Bohrwiderstands. Eine Korrektur der Kurven ist möglich, aber für die Baupraxis eher schwierig. Bohrwiderstandsmessungen sind wegen der unterschiedlichen Qualität der Bohrer und des Bohrerabriebs in silikatreichen Gesteinen kaum reproduzierbar. Das Problem kann nur umgangen werden, wenn für Vergleichsmessungen immer mit dem gleichen Bohrer, der vorher kalibriert wurde, gemessen wird. Dessen mehr oder weniger schnell abnehmende Schärfe verhindert letztendlich jedoch auch die genaue Vergleichbarkeit der Messungen.

Auswahl der Messmethode

Von den genannten Messmethoden zur Bestimmung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften, die grundsätzlich alle geeignet sind, muss mindestens eine ausgewählt werden. Es ist jedoch dringend zu raten, auch eine repräsentative Zahl von biaxialen Biegezugmessungen auszuführen, damit auch der E-Modul bekannt ist, welcher für die Anpassung von Mörteln und Steinersatzstoffen unerlässlich ist.

Um die Tiefenabhängigkeit der Verwitterung und den Grad der Entfestigung direkt an der Oberfläche zu bestimmen, ist eine Kombination der hier genannten Methoden erforderlich. Die Auflösung der Verfahren ist jeweils unterschiedlich. Es muss deshalb entschieden werden, welche Auflösung benötigt wird. Ohne Frage wird bei dichten Gesteinen, bei denen die Schadenszonen teleskopartig nahe der Oberfläche zusammengezogen sind, eine feinere Auflösung erwünscht sein.

Anforderungskriterien

Alle Auswertungen müssen sich sowohl auf das unbehandelte als auch auf das unverwitterte Gestein beziehen. Das Bezugsniveau für die zu erreichende Festigkeit und den anzustrebenden E-Modul gibt dabei immer das unverwitterte Gestein vor, welches bei allen Gesteinsvarietäten mit ziemlicher Sicherheit in Bohrkerntiefen größer als 10 cm angetroffen wird. Als Resultat ist immer ein möglichst ausgeglichenes Profil für Festigkeit und E-Modul anzustreben, das sich an den Werten des unverwitterten Gesteins orientiert. Die Außenzone soll nicht überfestigt sein. Besonders der E-Modul darf dabei nicht überproportional ansteigen, da ein sprunghafter Anstieg des E-Moduls zu beträchtlichen Spannungen an der Grenzfläche behandelt – unbehandelt führt.

Die Mittel sind deshalb so auszuwählen oder zu modifizieren, dass Festigkeit und E-Modul gezielt angepasst werden können. Dies kann durch die Auswahl der Produkte (monomer, vorhydrolysiert), wechselnde Katalysatoranteile, unterschiedliche Verdünnungen und gezielt eingebaute Weichsegmente im Gelgerüst erreicht werden. In manchen Fällen dürfte es angebracht sein, nach einer ersten Serie von Vorversuchen eine weitere Verfeinerung des Untersuchungsprogramms durch mehrstufige Tränkungen herbeizuführen, um die Anpassung der Profile zu verbessern [siehe SATT-LER (1992); SCHUH (1987)].

Nicht in allen Fällen wird sich eine Überfestigung der Außenzone vermeiden lassen, was auch in bestimmten Grenzen hingenommen werden kann. Folgende Kriterien sind in diesem Fall anzuwenden: Eine Überfestigung kann hingenommen werden, wenn

- die Festigkeit und der E-Modul der getränkten Zone (i) weniger als das 1,5-fache der Werte des unverwitterten Gesteins (o) betragen ($B_i \leq 1,5 B_o$ bzw. $E_i \leq 1,5 E_o$)
- der E-Modul in der behandelten Zone höchstens mit demselben Faktor zugenommen hat wie die Festigkeit ($E_i/E_o \leq B_i/B_o$) oder, anders ausgedrückt, das Verhältnis Festigkeit/E-Modul im gefestigten Bereich dem des unverwitterten Gesteins ent-

spricht ($E_i/B_i = E_o/B_o$, vgl. [SASSE & SNETHLAGE (1997)]). Unter bestimmten Voraussetzungen kann auch hingenommen werden, wenn E_i/B_i bis auf $1,2 E_o/B_o$ ansteigt.

- die Eindringtiefe größer ist als die Zone der maximalen mittleren Feuchte [siehe SNETHLAGE, WENDLER & KLEMM (1996a)]
- der Festigkeitsabfall von B_i auf das Niveau des unverwitterten Gesteins B_o erst hinter der Zone der maximalen mittleren Feuchte erfolgt
 - für dessen Gefälle näherungsweise die Regel $\Delta B_i/\Delta x < 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$ Gesteinstiefe erfüllt ist und wenn
 - der E-Modul ebenfalls graduell im Rahmen der Regel $\Delta E_i/\Delta x < 1 \text{ kN/mm}^2 \cdot \text{mm}$ ($x = \text{Gesteinstiefe}$) abnimmt [vgl. LITTMANN et al. (1997)].

Bild 99, Bild 100 und Bild 101 zeigen beispielhaft die soeben geschilderten Rahmenbedingungen. Bei der Prüfung von Acrylaten, Epoxiden oder Polyurethanen sei darauf hingewiesen, dass auf jeden Fall der Glasumwandlungspunkt des betreffenden Kunstharzes Berücksichtigung finden muss, da sich in dem betreffenden Temperaturbereich die mechanischen Eigenschaften signifikant ändern. Allgemein wird dazu geraten, solche Kunstharze, deren Glasumwandlungspunkt unter den zu erwartenden Klimabedingungen durchschritten wird, nicht zu verwenden.

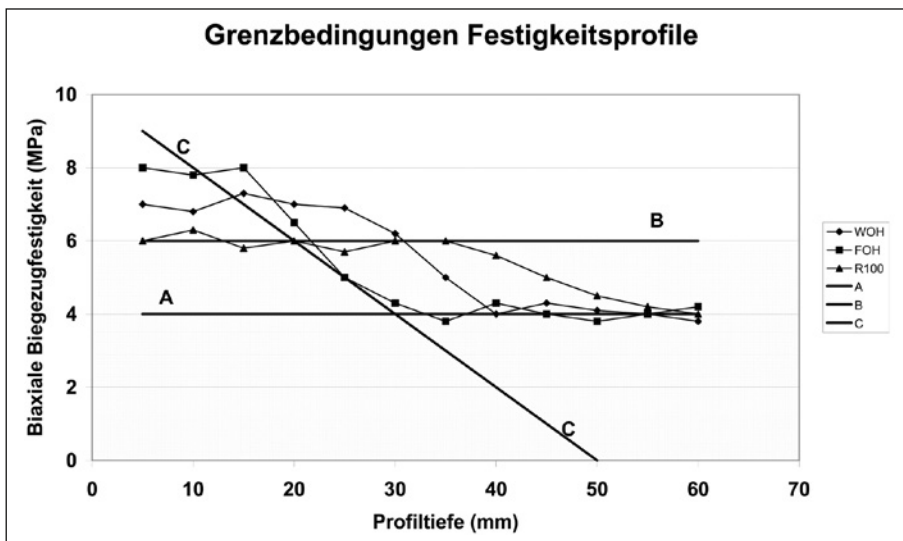


Bild 99: Erläuterungen der Grenzbedingungen für Festigkeitsprofile an einem aktuellen Beispiel. Linie A: homogenes Festigkeitsprofil: $B_i = B_o$; Linie B: Grenzbedingung für 1,5-fache Überschreitung der Festigkeit des unverwitterten Gesteins: $B_i \leq 1,5 B_o$; nur Festiger R100 erfüllt die Anforderung. Linie C: Festigkeitsabfall entsprechend der Regel $B_i/\Delta x < 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$. Der Festiger R100 erfüllt die Anforderung; Festigkeitsprofil FOH fällt zu steil ab.

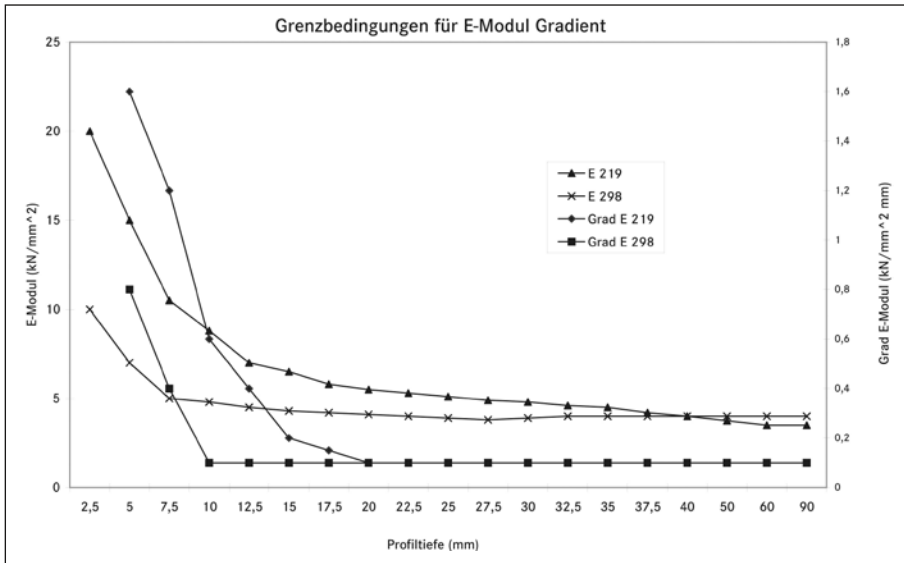


Bild 100: Erläuterungen für Grenzwert und Gradient des E-Moduls an einem aktuellen Beispiel. In der oberflächenschicht steigt der E-Modul für den Festiger E219 absolut und relativ zu stark an. Die Bedingungen $E_i \leq 1,5 E_o$ und $\Delta E_i / \Delta x < 0,1 \text{ kN/mm}^2 \cdot \text{mm}$ werden nicht erfüllt. Der Festiger E298 erfüllt die Bedingungen annähernd [Littmann et al. (1997)].

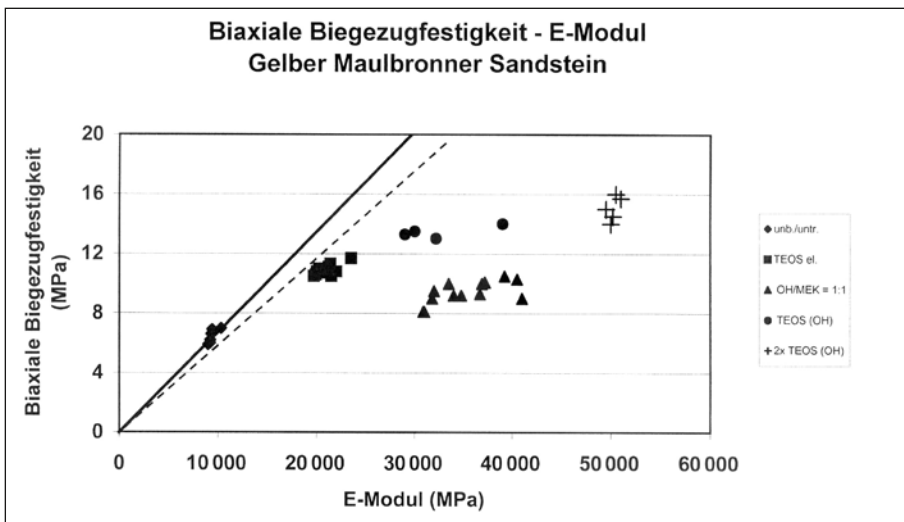


Bild 101: Grenzbedingungen für den Anstieg von Festigkeit und E-Modul am Beispiel des Gelben Maulbronner Schilfsandsteins. Die durchgezogene Linie beschreibt das konstante Verhältnis B_o/E_o , das von dem unverwitterten und unbehandelten Gestein als Grenzbedingung vorgegeben wird. Die gestrichelte Linie entspricht dem Anforderungskriterium $E_i/B_i = 1,2 E_o/B_o$. Alle Festiger liegen unterhalb der Grenzlinie, d. h., der E-Modul nimmt relativ stärker zu als die Festigkeit. Die Grenzbedingung wird am besten durch den elastifizierten Festiger erfüllt.

Das beschriebene Testprogramm sollte, wenn irgend möglich, immer vollständig bearbeitet werden. Ausnahmslos alle Parameter sind von großer Bedeutung für die Beurteilung der Verträglichkeit (Kompatibilität) zwischen Behandlungsmethode und Gesteinsmaterial. Je besser die Übereinstimmung der behandelten Bereiche mit dem Ausgangsgestein ist, desto dauerhafter wird sich die Konservierung erweisen. Trotz der Gleichgewichtigkeit aller Parameter in der Gesamtheit der Bewertung sei zum Abschluss dieses Abschnitts nochmals auf die besondere Bedeutung der Festigkeit bzw. des E-Moduls als der wichtigsten mechanischen Kenngröße hingewiesen.

Grenzwerte für Spannung und Verformung in Beispielen

Wie im letzten Abschnitt ausgeführt, kann man als vielleicht wichtigstes Kriterium festhalten, dass Festigkeit und E-Modul in Folge einer Festigung nur in einem konstanten Verhältnis, welches dem Quotienten aus der Biegezugfestigkeit und dem E-Modul des unverwitterten Gesteins entspricht, zunehmen sollen. Es ist sogar erwünscht, dass der E-Modul geringer ansteigt als die Biegezugfestigkeit, weil dann die verformungsbedingten Spannungen kleiner ausfallen. Die Einhaltung dieses Kriterium lässt sich leicht in einem Diagramm Biegezugfestigkeit – E-Modul überprüfen.

Ist diese Forderung erfüllt, müssen alle Punkte auf einer geraden Linie liegen, die durch den Nullpunkt geht, wie auf Bild 102 und Bild 103 zu sehen ist. Im Fall der Grünsandsteine von der Alten Pinakothek ist auf alle verfügbaren Messungen an unverwitterten, verwitterten und gefestigten Proben zurückgegriffen worden. Die Messwerte liegen entlang von zwei Geraden, welche die Varietäten II, III und IV von der deutlich festeren Varietät I trennen. Auffällig ist aber, dass sowohl die unverwitterten, die verwitterten als auch die mit unterschiedlichen Produkten gefestigten Proben ausnahmslos nahe an Geraden liegen und damit das Kriterium der konstanten Änderung von Biegezugfestigkeit und E-Modul recht gut erfüllen. Das bedeutet aber auch, dass sich Biegezugfestigkeit und E-Modul sowohl beim Verwitterungsvorgang als auch bei der Festigung gleich verhalten. Eine Überfestigung ist nicht eingetreten, selbst im Falle der doppelten Festigung nicht, welche durchgeführt worden war, um möglichst eine Überfestigung herbeizuführen [MEINHARDT-DEGEN & SNETHLAGE (2002)].

Überraschenderweise verhalten sich die tonreichen Sandsteine von Schloss Schillingsfürst (SSF) ebenso wie die Grünsandsteine von der Alten Pinakothek. Wie auf Bild 103 zu sehen ist, liegen die Originalsteine aus Diebach und Gailnau bei den geringeren Festigkeitswerten, während die Austauschgesteine aus Schleerith im oberen Teil des Diagramms angesiedelt sind, allerdings relativ stark streuen. Auch in diesem Beispiel spielen der Grad der Verwitterung und die Art der Behandlung keine Rolle.

Die geraden Linien in Bild 102 und Bild 103 beschreiben einen engen Bereich der spezifischen Verformung, welcher die Grünsandsteine und die tonreichen Sandsteine von Schloss Schillingsfürst offenbar genügen. Die festere Varietät I des Grünsand-

steins besitzt eine spezifische Verformung von $\varepsilon = 0,28$, während die weicherer Varietäten II, III und IV einheitlich einer Geraden mit $\varepsilon = 0,41$ folgen. Bei den tonreichen Sandsteinen beträgt der Wert der spezifischen Verformung $\varepsilon = 0,67$. Die tonreichen Sandsteine verformen sich unter Belastung mehr als die carbonatischen Grünsandsteine, was auch zu erwarten war.

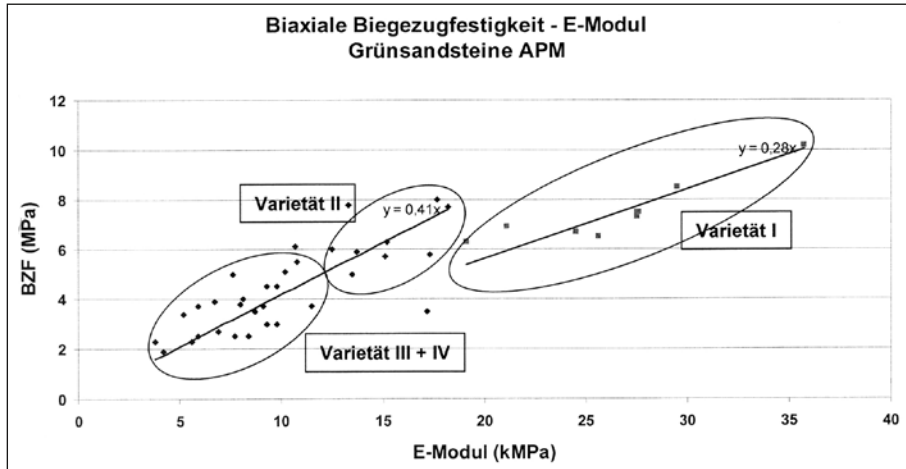


Bild 102: Diagramm Biaxiale Biegezugfestigkeit – E-Modul für verwitterte, unverwitterte und gefestigte Grünsandsteine von der Alten Pinakothek in München. Die Gesteinsvarietäten I bis IV lassen sich in zwei Gruppen mit den spezifischen Dehnungen $\varepsilon = 0,41$ und $\varepsilon = 0,28$ (in dem Diagramm mit y bezeichnet) unterteilen. Zu den Eigenschaften der Varietäten I bis IV siehe SNETHLAGE et al. (1996).

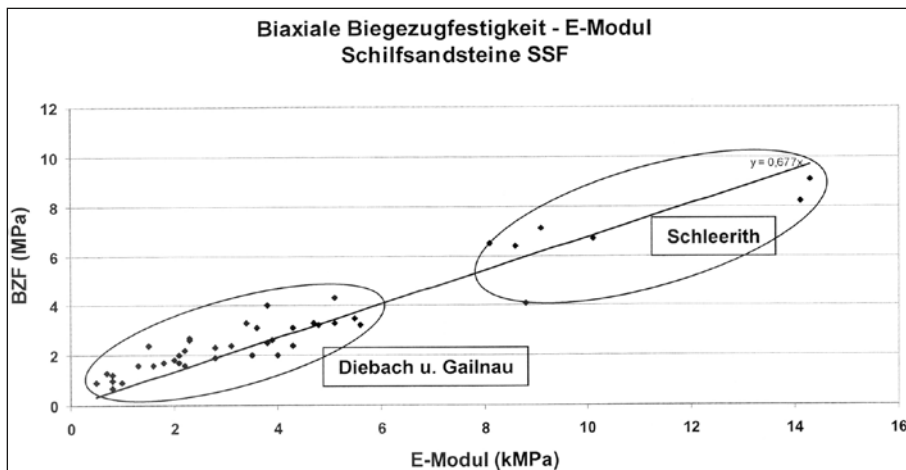


Bild 103: Diagramm Biaxiale Biegezugfestigkeit – E-Modul für verschiedene verwitterte, unverwitterte und gefestigte Schilfsandsteine von Schloss Schillingsfürst. Alle Steine besitzen eine spezifische Dehnung von $\varepsilon = 0,67$. Originalgestein aus den Brüchen von Diebach und Gailnau, Ersatzgestein aus Schleerith.

Die spezifischen Verformungen lassen sich nützen, um Grenzwerte für Spannung und Verformung festzulegen, die für die betreffenden Gesteinsvarietäten unbedenklich sind. Die Interpretation ist in Bild 104 gezeigt. Grundlage des Diagramms ist zunächst eine theoretische Berechnung der resultierenden Zug- oder Biegezugspannungen bei verschiedenen, beispielhaft vorgegebenen Verformungen und E-Moduln. In diesem Diagramm bezeichnen die oben genannten spezifischen Verformungen vertikale Linien. Grau schraffiert sind Felder, welche beispielhaft die Biegezugfestigkeit bestimmter Einzelgesteine von der Alten Pinakothek und von Schloss Schillingsfürst wiedergeben. Setzt man voraus, dass ein Schaden am Gestein eintritt, wenn seine Zugfestigkeit bzw. Biegezugfestigkeit überschritten wird, dann sind nur diejenigen Verformungen und E-Moduln erlaubt, welche innerhalb des grau getönten Bereichs liegen. Es fällt sofort auf, dass die geringe Zugfestigkeit des Schilfsandsteins sehr kritisch ist, weil bei angenommen 1 mm/m hygrischer Dehnung, ein für diese Gesteinsart nicht ungewöhnlicher Wert, allenfalls eine E-Modul-Differenz von 3 kMPa erlaubt ist, ohne den Grenzwert zu überschreiten. Analoge Betrachtungen gelten auch für die festeren Grünsandsteine, nur liegen hier die Werte allgemein höher, zumal auch die hygrischen Verformungen viel geringer sind (ca. 0,3 mm/m).

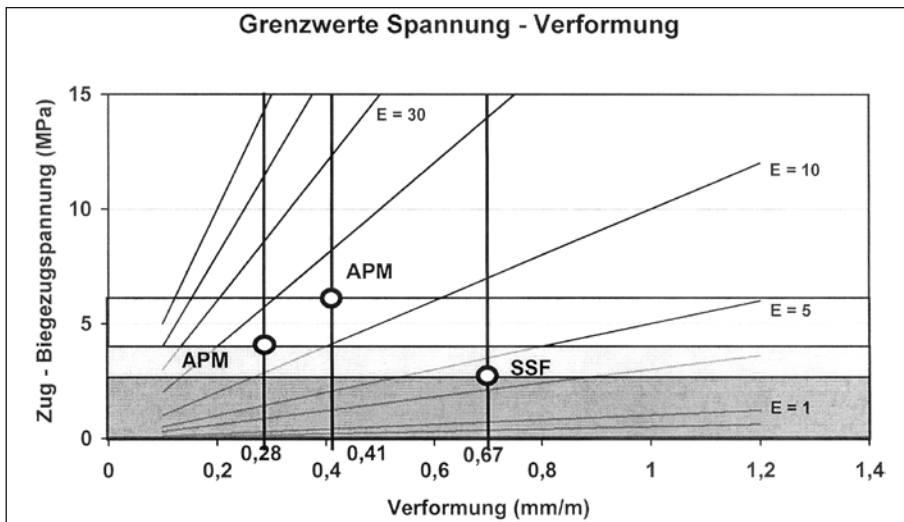


Bild 104: Grenzwerte für Spannung und Verformung verschiedener Grünsandsteine von der Alten Pinakothek in München und eines Schilfsandsteins von Schloss Schillingsfürst. Die vertikalen Linien repräsentieren die Werte der spezifischen Dehnungen (siehe Bild 102 und Bild 103). Die Kreise markieren die biaxialen Biegezugfestigkeiten der betrachteten Gesteinsvarietäten. Die Flächen unterhalb der Festigkeitswerte sind grau gefüllt. Alle Verformungen und E-Moduln innerhalb der grauen Flächen sind zulässig. Sie führen nicht zur Schädigung.

In gleicher Weise lassen sich auch die zulässigen Spannungen und Verformungen für den Übergang gefestigt – ungefestigt abschätzen. Zum besseren Verständnis von Bild 105 sei auf die folgende Tabelle 8 verwiesen.

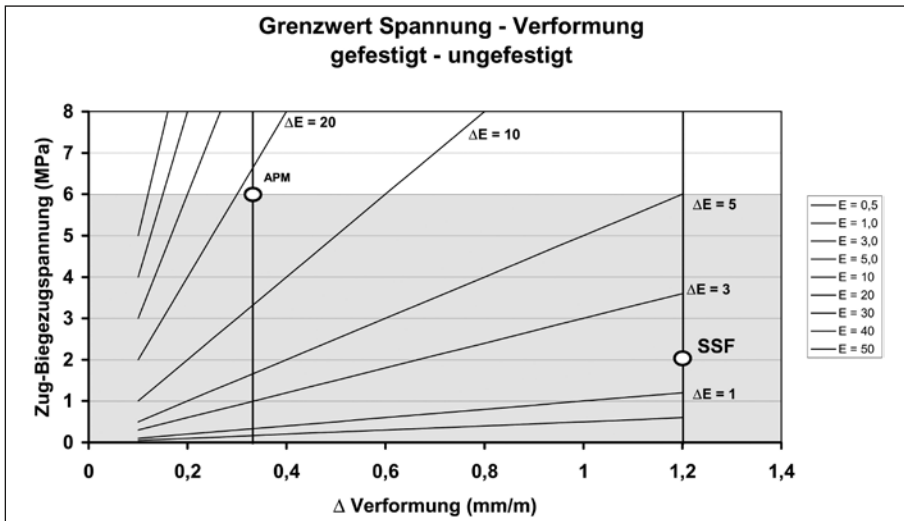


Bild 105: Grenzwerte für Spannung und Verformung am Übergang gefestigt – ungefestigt am Beispiel einer Grünsandsteinvarietät von der Alten Pinakothek in München (APM) und eines Schilfsandsteins von Schloss Schillingsfürst (SSF). Die grau hervorgehobenen Flächen markieren die Biegezugfestigkeiten der betreffenden Gesteine im ungefestigten Zustand. Die vertikalen Linien geben die Differenzen der hygrischen Dehnungen ungefestigt – gefestigt an. Alle Verformungen und E-Modul-Differenzen innerhalb der grauen Flächen sind erlaubt und beinhalten kein Risiko einer Schalenbildung. Beim Schilfsandstein darf die E-Modul-Differenz höchstens 2 kMPa betragen. Bei einer höheren E-Modul-Differenz dürfen nur entsprechend geringere hygrische Dehnungen auftreten.

Tabelle 8: Beispiele für die Veränderung der hygrischen Dilatation, der biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls im behandelten und im unbehandelten Zustand

Grünsandstein	α_{hyg} (mm/m)	B_{BFS} (MPa)	E_{BFS} (kMPa)
unbehandelt	0,75	6	24
gefestigt	0,38	10	35
Differenz	0,35	4	11
Schilfsandstein	α_{hyg} (mm/m)	B_{BFS} (MPa)	E_{BFS} (kMPa)
unbehandelt	3,20	2	3
behandelt	2,00	4	6
Differenz	1,20	2	3

Aus dieser Tabelle sind die Zahlenwerte ersichtlich, welche in die Bild 105 übernommen wurden. Es sei nochmals daran erinnert, dass tatsächlich gemessene Werte einzelner Gesteine verwendet wurden, die aber keinesfalls für Grünsandsteine oder Schilfsandsteine repräsentative Mittelwerte darstellen. Eingang in Bild 105 finden die Differenzen der betreffenden Eigenschaften. Abgeschätzt werden die Spannungen, die im Verlauf der hygrischen Dehnung bei vollständiger Durchfeuchtung auftreten würden.

Das Beispiel in Bild 105 wurde in der gleichen Weise berechnet wie das in Bild 104, indem zunächst theoretisch die resultierenden Zug- oder Biegezugspannungen in Abhängigkeit beispielhafter Verformungs- und E-Modul-Differenzen berechnet wurden. Die beiden vertikalen Linien bezeichnen die in Tabelle 9 berechneten Verformungsdifferenzen bei hygrischer Dilatation. Aus dem Diagramm kann man ablesen, dass im Fall des Grünsandsteins von der Alten Pinakothek München (APM) der Übergang gefestigt – ungefestigt trotz der hohen E-Modul-Differenz von 11 kMPa unkritisch ist, weil lediglich Spannungen im Bereich von 4 MPa erreicht werden, die klar im zulässigen, grau hinterlegten Bereich liegen. Theoretisch könnten die E-Modul-Differenzen zwischen gefestigt und ungefestigt bei gleicher Differenz der hygrischen Dehnung sogar annähernd 20 kMPa betragen, wie aus Bild 105 abgelesen werden kann.

Im Fall des Schilfsandsteins von Schloss Schillingsfürst (SSF) ist der Übergang gefestigt – ungefestigt wesentlich kritischer. Bei einer E-Modul-Differenz von 3 kMPa und einer Verformungsdifferenz von 1,2 mm/m entstehen Spannungen im Bereich von 3,5 MPa, die über der zulässigen Spannungsobergrenze von 2 MPa für den betrachteten Schilfsandstein liegen. Folgt man dem dunkelgrauen Bereich für den Schilfsandstein, so dürften bei diesem Beispielgestein nur Verformungsdifferenzen von ca. 0,7 mm/m auftreten, um die Zugfestigkeit nicht zu überschreiten.

9.2.5 Ziel der Untersuchungen

Zum Abschluss der Laboruntersuchungen über die Beschaffenheit der Gesteinsfestigkeit vor und nach der Behandlung sollen genaue Angaben über die am besten geeigneten Materialien und Methoden vorliegen, die dann in einem zweiten Schritt an einer Musterfläche weiter getestet werden können.

9.3 Fugenmörtel

9.3.1 Allgemeines

Ein Natursteinmauerwerk kann nicht isoliert ohne seine Fugen und Fugenmörtel betrachtet werden. Defekte Fugen führen zu schwerwiegenden Schäden an den Natursteinen. Entlang von offenen Fugen oder beim Flankenabriss des Fugenmörtels dringt Schlagregen tief in das Mauerwerk ein und durchfeuchtet die Quader. Die Austrocknung geschieht auf dem Weg der besten Kapillarleitung und des geringsten Diffusionswiderstandes. Bei dichtem Stein wird die Feuchtigkeit vorrangig durch den porösen Fugenmörtel entweichen, bei hartem und dichtem Fugenmörtel erfolgt die Austrocknung eher durch den Stein, der dadurch verstärkt belastet wird. Absandende und aufblätternde Kanten und Ecken sind die Folgen. Eine Konservierung des Natursteins kann deshalb nur dann dauerhaft sein, wenn auch das Fugennetz instand gesetzt wird. Ziel ist die Minimierung des Feuchtigkeitseintrags ins Mauerwerk durch offene oder gerissene Fugen und zugleich die Diffusion eingedrungener Feuchtigkeit über die Fugen nach außen durch die Auswahl eines zu dem Gestein passenden Fugenmörtels.

Bei der Instandsetzung von Fugen sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Hat ein Bauwerk Jahrzehnte oder vielleicht Jahrhunderten ohne gravierende Schäden überstanden, sind Stein und Fugen aufeinander abgestimmt und eine erfolgreiche »Symbiose« eingegangen. Weicht nun der neue Fugenmörtel, auch wenn er vermeintlich qualitätvoller ist, von den Eigenschaften des originalen ab, kann dies ungeahnte Auswirkungen auf die Verdunstungswege, die Belastung der Steine, den Salztransport und die Lebensdauer der Fugen haben – ganz zu schweigen von möglichen Schäden im Gebäudeinneren. Kommt eine Hydrophobierung hinzu, so entstehen gerade bei historischen Backsteinfassaden nicht selten immense und irreversible Schäden [PFANNER et al. (2009)].
- Pressfugen sind ein gestalterisches Element des Bauwerks. Sie dürfen nicht mit der Flex aufgeschnitten werden, um einen Fugenmörtel einbringen zu können. Ist die Wand vor Schlagregen geschützt, können die Pressfugen ohne Füllung verbleiben. Gibt es eine Gefährdung durch Schlagregen, was sich aber an Schadensbildern und Durchfeuchtungen im Inneren zeigen muss, dann kann eine Fugenabdichtung mit Mörtel vorgenommen werden, die jedoch nur mit Injektagechnik ausgeführt werden darf.
- Sind die Fugen sehr breit, besteht die Gefahr, dass in Folge des Erhärtungsschwindens des Fugenmörtels ein Flankenabriss erfolgt. Dem ist dadurch vorzubeugen, dass die Fugen mit dünnen Steinplättchen »ausgezwickelt« werden, um die Fugenbreite zu vermindern.
- Wenn durch Abwittern der Steinkanten das Fugenprofil trichterförmig aufgeweitet ist, darf der Fugenmörtel nicht bis an die Wandoberfläche nach vorn gezogen werden, weil er bei dieser Fugegeometrie keinen Halt findet. Der Fugenmörtel

soll in einer derartigen Situation innerhalb der Fuge auf einer Tiefe stehen bleiben, wo er noch festen Halt an den Steinflanken hat.

- Die Sanierung von Fugen ist **nicht** gleichbedeutend mit dem Austausch des Fugenmörtels. Welche Konsequenzen ein Fugenaustausch aus statischer Sicht und in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Sanierungsmaßnahme hat, wird in Kapitel 11.1.6 dargelegt. Erhalt und Ertüchtigung von gerissenen und defekten Fugen sind dem Fugenaustausch oftmals vorzuziehen.

Die Forderung nach Instandsetzung des Fugennetzes ist bei Trockenmauern mit Verbindung zum Erdreich zu relativieren, bei denen das Fugennetz nicht dicht geschlossen werden darf, um den Wasserabfluss nicht zu unterbinden. Dichte Fugen können dazu führen, dass das dahinter liegende Erdreich vollkommen durchnässt wird und in sich zusammensackt, weshalb die Mauern ausbauchen oder sogar zusammenbrechen können (Grundbruch). In dieser Hinsicht sind besonders die hohen Wallmauern von Festungsanlagen gefährdet.

Auch die Bedeutung der Fugen für das ökologische Gleichgewicht darf nicht übersehen werden. Offenen Fugen stellen einen Rückzugsraum für seltene Tiere und Pflanzen dar, die hier ihre ökologische Nische gefunden haben [PICK et al. (2002)].

Fugenmörtel, Restauriermörtel und Putzmörtel basieren letztlich alle auf den gleichen Grundrezepturen hinsichtlich Bindemitteln, Zuschlagstoffen und Zusätzen. Die Übergänge zwischen den Begriffen und den Eigenschaften sind daher fließend. Weitere Informationen zu Rezepturen und Eigenschaften finden sich in den einschlägigen Kapiteln.

9.3.2 Bestand und Analyse der Originalmörtel

Sofern diese Aufgaben noch nicht im Arbeitsschritt 6 erledigt sind, besteht jetzt noch einmal die Gelegenheit, die erforderlichen Daten zu ermitteln. Die Analyse der historischen Mörtel ist ein unverzichtbarer Teil der Bestandsbeschreibung eines historischen Mauerwerks. Zunächst sind die verschiedenen Reparaturphasen des Fugennetzes nach optischen Befunden zu unterscheiden. Anschließend daran empfiehlt sich der chemische Analysengang, wie er von WISSER & KNÖFEL (1987, 1988) oder KNÖFEL & SCHUBERT (1993) vorgeschlagen worden ist, um Zuschlag, Sieblinie, Bindemittel und Pigmente und vor allem die hydraulischen Anteile zu identifizieren, welches ein chemisch schwieriges Unterfangen ist.

9.3.3 Anpassung der Fugenmörtel

Von besonderer Bedeutung ist die Anpassung der neuen Fugenmörtel an die historischen Mörtel einerseits und die Natursteineigenschaften andererseits. Zahlreiche Beispiele der Verwendung von Zementmörteln belegen, in welchem Ausmaß ein zu

dichter und starrer Mörtel den angrenzenden Naturstein schädigen kann. Zunächst ist zwischen Fugendeckmörteln und Versetzmörteln zu trennen. Bei Versetzmörteln sind die Druckfestigkeit und die Abbindezeit entscheidende Beurteilungskriterien, da diese Mörtel nach dem Einsetzen von neuen Quadern sehr schnell tragfähig sein müssen.

Für Fugendeckmörtel gilt als Grundregel, dass sie stets etwas weicher sein sollten als der Naturstein, jedoch keineswegs so weich, dass keine Flankenhaftung mehr gewährleistet ist. Auch sollte man keine historischen Mörtel nachstellen, die aufgrund heutiger Erkenntnis ungeeignet sind. Gewisse Schwierigkeiten können beim Nachstellen besonderer Mörtelstrukturen entstehen, sofern diese beispielsweise auf ungeeigneten Sieblinien basieren. Sollte das Größtkorn strukturbestimmend sein, so wird es sich nicht umgehen lassen, die Festigkeit des Bindemittels durch Erhöhung der hydraulischen Komponente zu verbessern, um das vorzeitige Herausbrechen der großen Körner zu verhindern.

Die Qualitätsprüfungen für Fugenmörtel sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die Anforderungskriterien zeigen deutlich, dass die Eigenschaftswerte des Mörtels meist unter denen des Natursteins liegen sollten. Von besonderer Bedeutung ist eine hinreichende Haftzugfestigkeit, welche auch die Flankenhaftung bestimmt. Weitere Informationen zu einem umfangreichen Untersuchungsprogramm sind KNÖFEL & SCHUBERT (1992a, 1993) zu entnehmen. MIDDENDORF (2007) legt vergleichbare Eigenschaftskriterien für Mörtel zur Instandsetzung von historischem Mauerwerk vor. Nach seiner Einschätzung kann der E_{dyn} an den des Gesteins heranreichen. Die Feuchtdehnung sollte nicht mehr als 2 mm/m betragen und die Druckfestigkeit über 2 MPa liegen.

9.3.4 Bindemittel

Als Bindemittel steht eine Reihe von Materialien zur Verfügung, die in Tabelle 9 aufgeführt sind. Für historisches Mauerwerk gebietet sich geradezu die Verwendung anorganischer Bindemittel mit dem Schwergewicht auf Luftkalk und hydraulischem Kalk als den vorherrschenden historischen Materialien. Es sollte aber berücksichtigt werden, dass Luftkalke starken klimatischen Beanspruchungen nicht gewachsen sind, sodass sie nicht in jeder Situation eingesetzt werden können.

Tabelle 9: Materialien für Steinersatzstoffe und Fugenmörtel

Bindemittel	Modifikationen	Formulierungen	Anwendung
Luftkalk, Wasserkalk CL 90, CL 80, CL 70 DIN EN 459-1:2015-07	Kalk + Trass + Zement, Hüttensand, Ziegel- mehl u. Ä. dispergiertes Weiß- kalkhydrat	historische Additive wie Kasein, Albumin, Leim, Holzkohle; moderne Additive wie Porenbildner, Fließmittel, Haft- vermittler	Restauriermörtel, Fugenmörtel, Putze
hydraulischer Kalk HL 2, HL 3,5 NHL 2, NHL 3,5 DIN EN 459-1:2015-07	In handelsüblicher Form verarbeiten	moderne Additive wie Porenbildner, Fließmittel, Haft- vermittler	Restauriermörtel, Fugenmörtel, Putze
hochhydraulischer Kalk HL 5, NHL 5 DIN EN 459-1:2015-07 Romanzement (Romankalk)	In handelsüblicher Form verarbeiten	moderne Additive wie Porenbildner, Fließmittel, Haftver- mittler, Plastifizierer	Restauriermörtel, Fugenmörtel, Putze. Achtung: Romanzement wegen kurzer Verarbeitungszeit nur bedingt einsetzbar
Dolomitkalk DL 85, DL 80	nicht üblich, aber möglich: Dolomitkalk + Trass + Zement	Additive wie Poren- bildner, Fließmittel, Haftvermittler	Fugenmörtel, Putze. Regional mitunter häufig vertreten.
Zement CEM I, CEM II, CEM III DIN EN 197-1:2011-11	Zement + Trass + Kalk, Hüttensand, Ziegel- mehl u. Ä.	Additive wie Poren- bildner, Fließmittel, Haftvermittler, Plastifizierer	Restauriermörtel, Fugenmörtel
Gips DIN EN 13279-1	Stuckgips, Estrich- gips, Gips + Kalk	Abbindeverzögerer und -beschleuniger	nur Innenraum, Restauriermörtel
Acrylharze	Copolymerisate, Ester- und Alkylgruppen	Reaktionsharz, Lösungsmittelharz, Lösungsmittel, wässrige Dispersion	Restauriermörtel, Rissfüllung, Rissinjektion, Klebung
Kieselgel	Ethylsilikat, vorhydr. Ethylsilikat, Kieselsol	Lösungsmittel, Katalysator, Verdün- nung, Additive	Restauriermörtel, Fugenmörtel, Rissfüllung
Epoxidharze	diverse Typen	Viskosität, Härter	Restauriermörtel, Rissinjektion, Klebung

Zu den Bindemitteltypen hydraulischer und hochhydraulischer Kalk ist zu sagen, dass diese heute zumeist aus fabrikmäßig gefertigten Mischungen von Kalk und Zement

bestehen. Aus natürlichen Mergeln gebrannte hydraulische und hochhydraulische Kalke NHL sind erst seit einigen Jahren wieder im Handel erhältlich. Der bekannteste historische Vertreter dieser Gattung ist unter dem Namen Romanzement oder Roman-kalk bekannt, der Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts weite Verbreitung erlangte. Das EU-Projekt ROCARE stellt vielfältiges Informationsmaterial zur Produktion und Verwendung von Romanzement zur Verfügung. Die bei Weitem hauptsächlichste Verwendung von Romanzement fand im Neoklassizismus und in der Gründerzeit statt, als zahllose vorgefertigte Teile aus Romanzement wie Bossenquader, Konsolen, Voluten, Kapitelle und weitere Zierelemente zur Fassadengestaltung eingesetzt wurden. Als Fugenmörtel ist Romanzement nicht geeignet, weil er zu schnell anzieht und nicht mehr verarbeitet werden kann. Die schnell erreichte Steifigkeit darf nicht mit der Aushärtung verwechselt werden, die sehr langsam vonstattengeht. Das schnelle Anziehen ermöglicht jedoch ein schnelles Ausschalen aus der Gussform, sodass Formteile sehr zügig produziert werden können.

Natürliche hydraulische Kalke werden bei niedrigeren Temperaturen als Zemente bei ca. 1 200 °C gebrannt. Sie sind durch das Vorherrschen von C_2S gegenüber C_3S geprägt, wodurch sie langsamer er härten und weniger Spannungen entwickeln als reine Zemente. Man darf aber nicht darüber hinwegsehen, dass manche natürliche hydraulische Kalke wie die meisten Romanzemente einen höheren Hydraulefaktor als heutige Portlandzemente aufweisen und deshalb eine größere Endfestigkeit als Portlandzemente erreichen können. Auch bedürfen sie einer längeren gewissenhaften Nachsorge, weil die Hydratation von C_2S viel langsamer verläuft als die von C_3S . Wegen ungenügender Festigkeitsentwicklung sind deshalb schon mehrfach Schäden aufgetreten. Romanzement, der durchaus viele positive Eigenschaften und Vorzüge in der Restaurierung hat, verschwand seit ca. 1920 mehr und mehr aus dem Bauwesen. Das hängt u. a. mit der DIN-Vorschrift, die den Festigkeitsnachweis nach 28 Tagen an Prüfkörpern fordert, zusammen. Erstens erhärtet Romanzement nur langsam und erreicht seine hohen Festigkeiten erst nach drei bis vier Monaten, zweitens braucht der Mörtel zum Abbinden immer viel Feuchtigkeit, die bei Prüfverfahren unter Normklima 25 °C/65 % RF nicht immer ausreichend zur Verfügung steht. Somit ist ein altbewährter Mörtel den Normen zum Opfer gefallen und stellt auch heute noch den Bauherrn vor Gewährleistungsprobleme, da er die gültigen Vorschriften nicht erfüllt.

Die Klassifizierung in NHL 2, NHL 3,5 und NHL 5 ist nicht so streng reglementiert wie bei Zement, was in der Verwendung von natürlichem Mergel begründet ist, der in seiner Zusammensetzung beträchtlichen Schwankungen unterworfen sein kann. Es kann deshalb vorkommen, dass ein NHL 3,5 eine größere Festigkeit entwickelt als ein NHL 5 eines anderen Herstellers.

Dolomitkalkmörtel sind vor allem regionaltypisch dort verbreitet, wo Reinkalke als natürliche Vorkommen nicht vorhanden waren, z. B. in Thüringen und Berlin. Umweltbedingte Schäden an Dolomitkalkmörteln sind in jüngster Zeit durch das Institut für

Steinkonservierung (2003) im Rahmen eines DBU-Projekts eingehend untersucht worden.

Mitunter kann die Verwendung von latent hydraulischen Stoffen wie Ziegmehl (häufig in römischem Mauerwerk anzutreffen), Trass, Hüttensand etc. angebracht sein, um die Verarbeitungseigenschaften zu verbessern und eine höhere Endfestigkeit zu erzielen. Es ist jedoch Vorsicht geboten, da alle Mörtel, welchen latent hydraulische Stoffe zugegeben sind, einer besonders sorgfältigen Nachsorge (lang andauerndes Feuchthalten) bedürfen.

Organische Hilfsstoffe sollten dort eingesetzt werden, wo sie wirklich benötigt werden. Welchen Einfluss historische und moderne Zusätze auf die Mörtel Eigenschaften haben, kann Tabelle 14 im Abschnitt 9.5 entnommen werden. Aus ihr ist zu entnehmen, dass im Falle historischer Bindemittel (Kalk und hydraulischer Kalk) manch positive Eigenschaftsänderung erzielt werden kann (z. B. Erniedrigung der Druckfestigkeit); diese Aussage gilt aber nicht für den allgemeinen Fall, sondern immer nur für die jeweils betrachtete Mörtelmischung, sodass auch unliebsame Überraschungen eintreten können.

Auch bei Kalkmörteln lassen sich manche ungünstige Eigenschaften durch organische Zusätze in positiver Hinsicht verändern. So verbessern Luftporenbildner die Frostbeständigkeit und die Fließeigenschaften, was für die Verwendung als Injektionsmörtel entscheidend ist.

Die Haftfestigkeit lässt sich durch die Zugabe von Kunststoffdispersionen erhöhen, was für den Einsatz auf dichten Steinen, hierzu zählen auch viele Kalksteine, und für Pietra Rasa Techniken von großer Wichtigkeit ist. Weiterhin können organische Hilfsstoffe den E-Modul des Mörtels senken und dessen Rissdehnung beträchtlich heraufsetzen, was für die Formulierung geeigneter Mörtel von großem Nutzen sein kann.

9.3.5 Struktur und Farbe, Sande (DIN EN 1996 und DIN 18550)

Die Anpassung des Neumörtels in Struktur und Farbe an den Originalmörtel erfordert einige praktische Erfahrung. Für beide Eigenschaften ist die Verwendung geeigneter Sande entscheidend. Meist ist die Farbigkeit historischer Fugenmörtel durch die natürlichen Sande bestimmt. Es ist deshalb oft günstiger, natürlich eingefärbte Sande zu verwenden, als Pigmente zuzusetzen. Es ist aber Vorsicht geboten, da ein zu hoher Gehalt an aufschlammenden Anteilen, wie sie in Natursanden vorkommen, die Eigenschaften des Mörtels stark beeinträchtigt.

Auf der anderen Seite müssen alle gefärbten Natursande gewisse Mengen Feinanteile enthalten, da die färbenden Pigmente an Tonminerale gebunden sind. Synthetische Pigmente färben in aller Regel zu stark; außerdem sind sie extrem fein und verändern damit den Bindemittelbedarf.

Die Struktur der fertigen Mörtel wird im Wesentlichen durch das Größtkorn und dessen mengenmäßigen Anteil bestimmt. Für Fugenmörtel gilt die Regel, dass das Größtkorn maximal die halbe Fugenbreite betragen darf. Bei der Aufstellung der passenden Sieblinie ist vom Größtkorn auszugehen. Die Verteilung der weiteren Korngrößen ist dann gemäß den Anforderungen nach DIN 18550 bzw. DIN EN 1996 einzurichten, damit eine möglichst gute Raumerfüllung erreicht wird. Falsche Abstufungen der Körnungen (schlechte Sieblinie) erhöhen den Bindemittelbedarf und vergrößern die Schwund- und Rissneigung. Für den historischen Bezug finden sich Kalkspatzenmörtel auf dem Markt, welche die historischen, heiß gelöschten Mörtel nachstellen. Die Kalkspatzen stellen ein hypothetisches Reservoir für das alkalische Calciumhydroxid dar und können so der Verarmung an Bindemittel der Kalkmörtel vorbeugen.

9.3.6 Untersuchungsprogramm

Das als Qualitätsprüfung geforderte Untersuchungsprogramm umfasst die in Tabelle 10 genannten Messungen. Im Mittelpunkt stehen die Eigenschaften des Feuchtetransports und der mechanischen Eigenschaften. Die Auswahl der Sande und Bindemittel orientiert sich im Wesentlichen an den Befunden über die historischen Mörtel. Sodann ist danach zu fragen, welche Mörtelgruppe die Anforderungen, die das Natursteinmaterial stellt, überhaupt erfüllen kann. Werden bautechnisch völlig falsche Mörtel angetroffen, die im Zuge der Fugeninstandsetzung entfernt werden sollen, so wäre man in der Wahl des Bindemittels und der Sande insoweit frei, als man sich nur nach den Eigenschaften des Natursteins zu richten bräuchte.

Tabelle 10: Qualitätsprüfungen für Fugenmörtel. Anforderungen in Prozent der Werte des Natursteins

Eigenschaft	Symbol	Anforderung
dynamischer E-Modul	E_{dyn}	20–60 %
Druckfestigkeit	β_0	20–60 %
Feuchtedehnkoeffizient	α_{Hy}	50–100 %
Wärmedehnkoeffizient	α_{T}	50–150 %
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50–100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	50–150 %
Haftzugfestigkeit	β_{HZ}	0,5 ... 1,0 $\beta_{\text{HZ, Substrat}}$
Die Anforderungen sind auf die Eigenschaften des Substrats bezogen. β_{HZ} : Abreiß-Zugfestigkeit (Ein Versagen der Haftung im Fugenmörtel ist wünschenswert). Daten nach SASSE & SNETHLAGE (1997).		

9.3.6.1 Probenpräparation

Die Präparation der Proben stellt ein besonderes Problem mit großer Relevanz für die Praxis dar. Dabei kommt es vor allem auf eine gleichmäßige, den Praxisbedingungen entsprechende Verdichtung der frischen Proben an. Die mechanische Verdichtung ist von allergrößter Wichtigkeit und beeinflusst alle Eigenschaften des späteren Mörtels auf entscheidende Weise. Auf der anderen Seite lässt eine nicht praxiskonforme Präparation im Labor – z. B. eine zu perfekte Verdichtung – keine Rückschlüsse auf das spätere Verhalten des Mörtels im Mauerwerk zu und ist aus diesem Grund kontraproduktiv. Allerdings scheint die in den Normen verordnete Art der Verdichtung mit Gewichten oder auf dem Schlagtisch auch nicht die optimale Reproduzierbarkeit zu gewährleisten; bessere Methoden sind derzeit aber auch nicht bekannt.

9.3.6.2 Erhärtungsschwinden

Werden die Proben unter möglichst realitätsnahen Bedingungen präpariert, wird man schon beim Aushärten im Labor sehen können, ob das Erhärtungsschwinden (Primärschwindung) zu Flankenabrissen führt. Die Haftung des Mörtels auf dem Substrat und der Absolutbetrag sowie die Geschwindigkeit der Schwindung entscheiden darüber, ob es zu einer Ablösung kommt oder nicht. Relativ gesehen sollte das Erhärtungsschwinden einige Promille nicht übersteigen. Am Bauwerk spielt natürlich die Fugenstärke eine wichtige Rolle. Je größer diese ist, desto größer ist auch das Risiko der Flankenablösung bei gegebenem relativem Schwindmaß. Das Erhärtungsschwinden kann durch eine gute Sieblinie, ein geeignetes Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis und den richtigen Wassergehalt günstig beeinflusst werden.

9.3.6.3 w-Wert, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Der Wasseraufnahmekoeffizient w soll zwischen 50–100 % und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ zwischen 50–150 % den Werten des Natursteins angepasst werden. Eine gut abgestimmte Wasseraufnahme und Wasserdampfleitfähigkeit haben einen ausgeglichenen Feuchtehaushalt zwischen Mörtel und Gestein zur Folge, und sind eine der Grundvoraussetzungen für eine lange Haltbarkeit.

Der Weitertransport von Feuchtigkeit vom Mörtel in den Stein im Inneren der Fugen wird nicht nur durch den Feuchtegehalt, sondern durch die Porenradienverteilung und infolgedessen durch die Saugspannung bestimmt. Besitzt der Fugenmörtel mehr Feinporen mit hoher Saugspannung, wird nur wenig oder kaum Wasser an das Gestein abgegeben und umgekehrt. Der w -Wert ist im Wesentlichen unabhängig von der Saugspannung. Grobporige Materialien mit wenig Saugspannung können einen hohen w -Wert haben. Am günstigsten sind die Verhältnisse dann, wenn der Fugenmörtel einen höheren w -Wert und eine höhere Saugspannung gegenüber dem Gestein aufweist.

9.3.6.4 Thermische (α_{th}) und hygrische (α_{hy}) Dehnung

Das Dehn- und Schrumpfverhalten unter Temperatur- und Feuchteeinfluss ist für die Dauerhaftigkeit einer Fuge eine entscheidende Eigenschaft. Gemeint ist hier das sogenannte sekundäre Quellen und Schwinden in bereits erhärtetem Zustand, also nicht das Schwinden beim Abbindeprozess, das möglichst gering gehalten werden muss, um primäre Flankenabriss zu verhindern (siehe Auswahl der Sande und Bindemittel). Die Werte für den Mörtel sollen in einer Bandbreite von 50–100 % bei der hygrischen Dehnung und 50–150 % bei der thermischen Dehnung, bezogen auf den Naturstein, liegen. Je besser die Fugenmörtel an das Gestein angepasst sind, desto niedriger sind die an der Grenzfläche auftretenden Spannungen, die sonst auf Dauer zur Ablösung führen.

9.3.6.5 Druckfestigkeit B_D , Haftzugfestigkeit B_{HZ} und E-Modul

Mit den mechanischen Eigenschaften lässt sich die Qualität des Verbandes Naturstein – Mörtel beschreiben. Die Druckfestigkeit B_D stellt zwar keine direkte Messgröße zur Beschreibung dieser Eigenschaften dar; sie korreliert jedoch mit den anderen Kenngrößen, sodass mit ihr eine indirekte Aussage über das Verhalten des Verbandes Naturstein – Mörtel möglich ist. Da sie zudem relativ einfach zu messen ist, ist gerade über die Druckfestigkeit viel Zahlenmaterial verfügbar. Sie soll 20–60 % des Natursteins betragen.

Die am besten geeignete Größe zur Beurteilung des Haftverbundes Naturstein-Mörtel ist die Haftzugfestigkeit B_{HZ} . Sie soll zwischen 0,5 bis 1,0 der Haftzugfestigkeit des Substrats betragen. Dadurch ist gewährleistet, dass der Abriss nicht im Stein, sondern in der Grenzfläche, oder in besonders günstigen Fällen im Mörtel erfolgt. Der letztgenannte Fall wird aber nur eintreten, wenn die Zugfestigkeit des Mörtels (innere Kohäsion) kleiner als seine Haftzugfestigkeit ist, was bei günstiger Oberflächenbeschaffenheit des Substrats und einer guten Verarbeitung durchaus möglich ist.

Die Flankenhaftung wird bei gleichem Bindemittelgehalt auch durch eine Erhöhung der Porosität herabgesetzt. Diesen Zusammenhang sollte man bedenken, wenn die Verwendung von Leichtmörteln oder die Zugabe von Luftporenbildnern geplant ist, um den E-Modul zu verringern.

Von besonderer Bedeutung ist der E-Modul des Mörtels, in Tabelle 10 als dynamischer E-Modul angegeben. Der Grund liegt in messtechnischen Erwägungen, da an Normkörpern der dynamische E-Modul sehr schnell und zerstörungsfrei zu messen ist, was für große Probenserien einen unschätzbaren Vorteil darstellt. Der E-Modul soll möglichst niedrig im Bereich 20–60 % des Gesteins liegen, damit die durch thermische und hygrische Verformungen verursachten Spannungen an der Grenzfläche klein bleiben.

9.3.7 Problemfälle

Ein besonderes Problem stellen sogenannte Pressfugen dar, welche dadurch entstehen, dass die Quader lediglich in einem dünnen Mörtelbett verlegt sind. Solche Fugen dürfen auf keinen Fall aufgeschnitten werden, damit mit herkömmlichen Methoden oberflächlich ein Fugenmörtel eingebracht werden kann. Vielmehr sind hier Lösungen zu wählen, die es erlauben, in den oft nur millimeterbreiten Fugenspalt einen entsprechend fließfähig eingestellten Mörtel zu injizieren.

Im Untersuchungsprogramm müssen deshalb entsprechende Versuche über Fließfähigkeit und Wasserrückhaltevermögen berücksichtigt werden [KNÖFEL & SCHUBERT (1993)]. Bei Bedarf müssen spezielle Prüfkörper hergestellt werden, um die Injektionsprozedur zu simulieren. Die Verbesserung der Fließfähigkeit darf nicht nur durch zusätzliches Anmachwasser erreicht werden, weil dann das Erhärtungsschwinden stark zunimmt und ein sofortiger Flankenabriss zu befürchten ist. Stattdessen sollte man die für diesen Zweck speziell entwickelten Fließmittel verwenden. Für den Injektionsvorgang selbst, d. h. das Abdichten und Einpressen über sogenannte Packer, gibt es seit einigen Jahren eine im Handel erhältliche Gerätetechnik, auf die zurückgegriffen werden sollte.

9.3.8 Ziel der Untersuchungen und prinzipielle Hinweise

Die Untersuchungen sind mit einem Bericht abzuschließen, in dem die Eigenschaften der Natursteine denen der getesteten Mörtel gegenübergestellt sind. Die in Tabelle 10 genannten Anforderungskriterien sind auszuwerten und eine beschränkte Anzahl von Mörtelrezepturen festzulegen, welche an der Musterfläche vom Restaurator erprobt werden sollen.

Der beste Lehrmeister für den richtigen Fugenmörtel ist – neben den naturwissenschaftlichen Untersuchungen – die Erfahrung am Denkmal selbst. Deshalb soll der funktionierende historische Mörtel möglichst beibehalten oder gegebenenfalls nachgestellt werden. Beispielsweise weisen alte Mörtel oft scharfkantige Zuschläge unterschiedlicher Größe auf, die eben keine eindeutige Sieblinie haben, aber einen positiven Keileffekt bewirken. Auch kleine und große Kalkspatzen, die sich unregelmäßig im Mörtel verteilen und in keiner DIN-Norm auftauchen, können vorteilhaft sein. Mikrorisse im Fugenmörtel können durch das Reservoir von gelöschtem Kalk wieder verheilen, durch Regenwasser ausgelöstes Bindemittel wieder ersetzt werden. Ist das Mörtelgefüge jedoch zu starr und bestehen die Kalkspatzen aus ungelöschtem Kalk, der bei hohem Feuchteintrag hydratisiert, können Abplatzungen und Schäden entstehen. Auch kann Kalkmörtel sogar in stark belasteten Einbausituationen ungewöhnlich haltbar und stabil sein. Hinweise dieser Art beruhen auf langjährigen Erfahrungswerten und lassen sich nicht immer normieren oder in DIN-Vorschriften erfassen – eine Problematik, die im Zuge der Leistungsverzeichnis-Erstellung (Kapitel 12.4) nochmals aufgegriffen wird.

9.4 Steinersatzstoffe

9.4.1 Allgemeines

Steinersatzstoffe, auch Steinerergänzungsstoffe, Steinersatzmassen oder Restauriermörtel genannt, dienen dazu, kleinere Fehlstellen auf eine das natürliche Aussehen des Gesteins imitierende Weise auszubessern. Ihre Verwendung ist so alt wie die Steinmetzarbeit und Steinbildhauerei. Wann eine Fehlstelle eine Größe erreicht hat, dass sie durch eine Vierung geschlossen werden sollte, oder ob eine Ausbesserung mit Restauriermörtel noch zweckmäßig ist, lässt sich nicht allgemein beantworten, sondern muss im Einzelfall festgelegt und durch entsprechende Hinweise in der Maßnahmenkartierung vermerkt werden. Oftmals ist die Verwendung von Steinersatzstoffen die kostengünstigere Lösung, insbesondere wenn es sich um komplizierte Ornament- oder Figurenteile handelt.

Da viele Gesteinsschäden an den Ecken und Kanten von Quadern auftreten, ist die Anwendung von Steinersatzstoffen auch eng mit der Reparatur der Fugen verbunden. Weiterhin fällt unter das Einsatzgebiet der Steinersatzstoffe das Füllen von kleineren und breiteren Rissen sowie das Hinterfüllen von abstehenden oder hohl liegenden Schalen, sodass sie auch in fließfähiger Konsistenz bereitgestellt werden müssen. Besonders bei dieser Aufgabe ist die enge Zusammenarbeit zwischen dem Restaurator und dem Naturwissenschaftler schon im Vorfeld der Untersuchungen unentbehrlich, da Fragen wie die Einfärbung und die Verarbeitung nicht ohne Praxisbezug gelöst werden können.

Ergänzungen mit Steinersatzmassen haben zudem den Vorteil, dass sie meist denkmalgerechter sind und die Originalsubstanz schonen, da bei ihnen im Gegensatz zu Vierungen kein oder kaum Steinmaterial abgearbeitet werden muss. Sie können auch als im Abgussverfahren vorgefertigte Inlays und damit in größerem Format hergestellt werden (siehe ausführlicher im Kapitel 11.1.7).

9.4.2 Materialien

Für Steinersatzstoffe stehen prinzipiell die gleichen Materialien zur Verfügung wie für Fugenmörtel, da Steinersatzstoffe im Grunde lediglich eine besondere Art Mörtel darstellen (siehe Tabelle 9). Steinersatzstoffe unterliegen aus diesen Gründen den gleichen Verarbeitungsvorschriften wie Mörtel, sodass im Wesentlichen auf die Ausführungen über Fugenmörtel verwiesen werden kann.

Einige wesentliche Unterschiede sind jedoch bemerkenswert. Da Steinersatzstoffe in vielen Fällen allseitig vom Gestein umgeben sind, sollten die Anforderungskriterien besonders kritisch gesehen werden, da sich alle Abweichungen langfristig durch ein verändertes Aussehen zwischen Stein und Steinersatzstoff abzeichnen.

Anders als bei Fugenmörteln muss die strukturbestimmende Kornverteilung dem Gestein angepasst werden und kann sich nur in engen Grenzen an den gewünschten Festigkeitswerten orientieren. Die Verformungskennwerte dürfen die des Gesteins vor allem nicht gravierend unterschreiten. Auch die Gesamtporosität und der Luftporengehalt müssen so beschaffen sein, dass der Steinersatzstoff dem Gestein möglichst nahe kommt, und dürfen nicht so eingestellt werden, dass der Steinersatzstoff selbst optimale Eigenschaften erreicht. Es kann also durchaus vorkommen, dass man hier in einen Interessenkonflikt gerät.

9.4.2.1 Zement und Kalk

Kommerzielle Steinersatzstoffe sind beinahe ausnahmslos auf der Verwendung von Zement als Bindemittel aufgebaut, wobei die Eigenschaften durch Zusätze von Kunststoffdispersionen modifiziert werden. Allgemein besitzen solche Materialien eine hohe Plastizität und Verformbarkeit, sodass sie in keiner Weise mehr mit den starren Zementmörteln früherer Zeiten zu vergleichen sind. In Eigenregie hergestellte Massen basieren in vielen Fällen auf der Verwendung von hydraulischem Kalk, seltener auch auf reinem Kalkhydrat.

Dispergiertes Weißkalkhydrat ist ein in Wasser sehr fein dispergiertes CL 90, welches zur Stabilisierung des Sols organische Komponenten enthält. Es wird vornehmlich für Schlämmen, Anböschungen und Injektionsmörtel verwendet, wenn deren Gewicht gering gehalten werden muss. Man darf aber nicht übersehen, dass es wegen der hohen Porosität zu Haftungsproblemen kommen kann.

9.4.2.2 Kieselgel-gebundene Massen

Seit mehreren Jahren schon sind Kieselgel-gebundene Steinersatzmassen stärker in den Vordergrund getreten, die entweder unter Verwendung von Kieselsäureester oder von Kieselsol hergestellt werden. Diese Stoffe besitzen gegenüber den anderen Materialien im Wesentlichen zwei Vorteile. Durch Nachtränkungen kann die Festigkeit der Masse erhöht und vor allem eine fließende Übergangszone zum Gestein geschaffen werden. Die Massen können ohne Probleme auf Null auslaufen, sodass die Antragsflächen nicht abgearbeitet zu werden brauchen. Für die Kompatibilität zwischen Sandsteinen und Steinersatzstoffen ist es von unschätzbarem Vorteil, wenn alle Materialien auf der gleichen Stoffklasse aufbauen.

Seit den Zeiten des BMFT-Projektes »Steinerfall – Steinkonservierung« ist auf dem Gebiet der Kieselgel-gebundenen Steinersatzstoffe viel geforscht worden. Die Bindemittel wurden verbessert und Standardrezepturen für die verschiedenen Anwendungsbereiche entwickelt [ETTL et al. (1996), REMMERS (2000)]. Ein komplettes Anwender-set für die Steinrestaurierung ist als Modulsystem (siehe Kapitel E3) kommerziell erhältlich. Die Mischungen und Rezepturen des Modulsystems sind durch Laborunter-

suchungen geprüft und optimiert. Sofern man nicht über wirklich gute praktische Erfahrungen verfügt, sollte man das kommerzielle Produkt benutzen.

9.4.2.3 Acrylharze

Acrylharze und Acrylharzdispersionen sind auf das Schließen von kleinen Fehlstellen in erster Linie bei Kalksteinen oder Marmor beschränkt. Sie eignen sich aber auch für das Injizieren von Rissen und Füllen dünner Spalten. Je nach Bedarf finden sie deshalb als Reinstoffe (ungefüllt) oder mit Zuschlagstoffen gefüllt Verwendung.

9.4.2.4 Epoxidharze

Epoxidharze lassen sich ähnlich wie Acrylharze zu Steinersatzmassen verarbeiten, wenn sie entsprechend gemagert werden. Um ein steinähnliches Aussehen zu erzielen, muss das Harz/Zuschlag-Verhältnis bei rund 1:10 oder sogar noch darunter liegen. Ihr Haupteinsatzgebiet liegt jedoch dort, wo die Epoxidharze ihre Vorteile am besten ausspielen können, beim Verkleben von Steinteilen oder Ankern und beim kraftschlüssigen Injizieren von Rissen. Das Langzeitverhalten von Acryl- und Epoxidharzergänzungen ist im Außenbereich durchaus als kritisch einzustufen, was ihre UV-Beständigkeit, ihre Flankenhaftung, ihre feuchtetechnischen Eigenschaften und deshalb ihre Lebensdauer anbelangt.

9.4.2.5 Zuschlagstoffe

Als Zuschlag für die Herstellung von Steinersatzstoffen dienen Sande, die möglichst eine optimale Sieblinie aufweisen sollen. Bei deren Ableitung kann man sich an DIN EN 1996 und DIN 18550, bei Bedarf auch an EN 13139 orientieren, muss bei der Sieblinie allerdings immer eine Anpassung an das gewünschte Größtkorn vornehmen. Anders als bei den Mörteln steht jedoch die Imitation der Struktur des Gesteins im Vordergrund, sodass eine vorteilhafte Sieblinie nicht immer realisiert werden kann. In vielen Fällen wird gemahlenes Originalgestein verwendet, das nötigenfalls durch Schlämmen von zu hohen Feinanteilen befreit wird. Auf der anderen Seite können Tonminerale aber durchaus erwünscht sein, um die Anpassung der hygrischen Quellung an das Originalgestein zu erreichen. Da aber viele Sandsteine von Natur aus eine ungünstige Korngrößenverteilung aufweisen, wird man um das Zumischen weiterer Kornfraktionen nicht herumkommen. Entscheidend für die richtige Wiedergabe der Struktur sind das Größtkorn und dessen prozentualer Anteil. In den meisten Fällen wird man mit einer Siebabstufung 0,063 mm; 0,125 mm; 0,25 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 2,0 mm zu einer befriedigenden Lösung gelangen.

9.4.2.6 Pigmente

Die Einfärbung der Steinersatzmasse setzt eine große Erfahrung und vor allem restauratorisches Geschick voraus. Es ist von Vorteil, weitestgehend natürliche Pigmente zu verwenden. Künstliche Pigmente sind in der Regel zu feinkörnig, sodass ein dichter, unnatürlich wirkender Farbton entsteht. Der Grundfarbton wird wohl am besten immer dann getroffen, wenn gemahlenes Originalgestein zugegeben wird. Aber auch dann muss meist noch mit Pigmenten nachgefärbt werden. Auch bei manchen Bindemitteln wie Portlandzement oder auch Trass ist eine harmonische Einfärbung nur schwer zu erreichen, da ihre Eigenfarbe zu intensiv ist. Aus diesem Grund sind Weißzement oder Kalk-Weißzementmischungen vorzuziehen, die sich auf weißer Grundtönung leichter einfärben lassen. Andererseits kann dann aber das Problem auftreten, dass die Farben zu »kalt« wirken, sodass sie wiederum mit warmen Pigmenten abgetönt werden müssen. Manche Pigmente sind nicht alkalibeständig, was vorab zu prüfen ist.

9.4.3 Untersuchungsprogramm

Da Steinersatzstoffe und Fugenmörtel eng miteinander verwandt sind, unterscheidet sich das Untersuchungsprogramm für Steinersatzstoffe auch nicht von dem für Fugenmörtel. Auch die gestellten Anforderungen sind sehr ähnlich, sollen aber trotzdem der Vollständigkeit halber in der folgenden Tabelle 11 nochmals genannt werden. Grundlegende Informationen zur Gestaltung eines umfassenden Untersuchungsprogramms finden sich in KNÖFEL & SCHUBERT (1993), die durch die Angaben von FRANK & KITTL (1995) ergänzt werden können. Analysen für historische Steinersatzstoffe und Mörtel sind in WISSER & KNÖFEL (1987, 1988) beschrieben. Weitere Informationen finden sich auch in SNETHLAGE (2011).

Tabelle 11: Qualitätsprüfungen für Steinersatzstoffe

Eigenschaft	Symbol	Anforderung
dynamischer E-Modul	E_{dyn}	bis 80 %
Druckfestigkeit	β_D	bis 60 %
Feuchtedehnkoeffizient	α_{Hy}	50–100 %
Wärmedehnkoeffizient	α_T	50–150 %
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50–100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	50–100 %
Haftzugfestigkeit	β_{HZ}	0,5 ... 0,8 $\beta_{HZ, Substrat}$
<p>Die Anforderungen sind auf die Eigenschaften des Substrats bezogen. β_{HZ}: Abreiß-Zugfestigkeit der Oberfläche (Ein Versagen der Haftung im Steinerergänzungsstoff ist wünschenswert) Der Steinerergänzungsstoff soll auf Null auslaufend angetragen werden können. Angaben i. w. nach ibac, Poster beim Workshop Mörtel in der Denkmalpflege, Fulda, 1993. Siehe auch SASSE & SNETHLAGE (1997).</p>		

Wie bereits bei den Prüfungen für Fugenmörtel gilt auch für Steinersatzstoffe, dass die Haftung beim Zugversuch an der Grenzfläche oder im Steinersatzstoff versagen soll. Dies kann nur eintreten, wenn die Haftzugfestigkeit des Steinersatzstoffs kleiner ist als die Abreißfestigkeit der Steinoberfläche. Durch eine gute Oberflächenvorbereitung, eine gute Pflege während der Verarbeitung und gegebenenfalls durch die Zugabe von Kunststoffdispersionen, welche die Haftung verbessern, kann man auch erreichen, dass die Trennung im Steinersatzstoff erfolgt. Allerdings muss gleichzeitig davor gewarnt werden, dass durch ein Zuviel an Kunststoffdispersion die Haftung so stark ansteigt, dass die Ablösung doch im Stein eintritt und dadurch die Oberfläche in Mitleidenschaft gezogen wird.

STEINDLBERGER (2010) hat am Beispiel des Schalsteins fast das komplette Eigenschaftsspektrum des Gesteins bestimmt und mit den Daten eines handelsüblichen Steinerergänzungsmörtels verglichen. Die gestellten Anforderungen werden bis auf die feuchtetechnischen Eigenschaften gut erfüllt. Diese Untersuchung kann als Beispiel für ein Messprogramm und dessen Auswertung dienen.

An dieser Stelle soll auf ein weiteres Problem der Probenpräparation hingewiesen werden. Die im Labor hergestellten Proben erreichen aufgrund der normierten Präparationstechnik einen höheren Grad an Gleichmäßigkeit als die Muster am Objekt. Dies muss so sein, weil sonst eine sinnvolle Eigenschaftsprüfung nicht möglich wäre. Die am Objekt verarbeiteten Steinersatzstoffe weichen aufgrund praktischer Verarbeitungsschwierigkeiten sowohl von den Labormustern als auch untereinander in weit stärkerem Maße ab. Für die gestellten Qualitätsanforderungen bedeutet dies, dass die genannten Zahlenwerte nicht als absolut scharfe Grenzbedingungen aufzufassen sind, sondern dass eine gewisse Streuung um die Grenzwerte herum vertretbar ist.

9.4.3.1 Probenpräparation

Je nach Bedarf wird man im Labor eine möglichst praxisgerechte Probenpräparation durchführen. Einfache Antragungen können auf unregelmäßigen Steinoberflächen ausgeführt werden, sodass Haftzugfestigkeitsmessungen vorgenommen werden können. Die Injektion hinter hohl liegende Schalen kann simuliert werden, indem zwei raue, staubbedeckte Gesteinsscheiben mit Hilfe von Abstandshaltern miteinander verklebt und die offenen Seiten geschlossen werden. Von der Stirnseite her kann dann injiziert werden. Nach der Aushärtung lassen sich Bohrkernentnahmen, welche die Gestalt einer Sandwichprobe besitzen, an der die Haftzugfestigkeit gemessen werden kann. Die Herstellung der Proben für die anderen Versuche entspricht den Vorgaben der DIN Normen, d. h., es müssen Formkörper mit entsprechenden Maßen hergestellt werden.

9.4.3.2 Grenzbedingungen für Spannung und Verformung im Verbundsystem Naturstein – Restauriermörtel. Ein Beispiel.

In gleicher Weise, wie sich die zulässigen Spannungen für den Übergang gefestigt – ungefestigt im Gestein abschätzen lassen (siehe Bild 105), kann man eine Näherung der zulässigen Spannungen für ein Verbundsystem Stein – Mörtel anstellen. Auch hier stoßen zwei Bereiche mit verschiedenen Spannungs-Verformungs-Eigenschaften aufeinander. Zum besseren Verständnis von Bild 106 und Bild 107, welche als Beispiele für konkrete Berechnungen die Gesteine der Alten Pinakothek in München (APM) und von Schloss Schillingsfürst (SSF) zum Inhalt haben, wird auf Tabelle 12 verwiesen, in welcher die benützten Kenndaten aufgeführt sind.

Tabelle 12: Kenndaten für Spannung und Verformung für je eine Varietät Schilfsandstein vom Schloss Schillingsfürst (SSF) und von der Alten Pinakothek (APM) sowie für verschiedene Modellmörtel; KH = Kalkhydrat, HK = Hydraulischer Kalk, HHK = Hochhydraulischer Kalk, KSE = Kieselgelmörtel

	B_D (MPa)	B_{HZ} (MPa)	E (kMPa)	ΔE (kMPa)	α_{hyg} (mm/m)	$\Delta \alpha_{hyg}$ (mm/m)
SSF		1,5	3	0	1,2	0
KH	2	0,5	4	1	0,2	1,0
HK	7	1,0	10	7	0,5	0,7
HHK	10	2,0	13	10	0,8	0,4
KSE	6	1,5	5	2	0,6	0,6

	B_D (MPa)	B_{HZ} (MPa)	E (kMPa)	ΔE (kMPa)	α_{hyg} (mm/m)	$\Delta \alpha_{hyg}$ (mm/m)
APM		4	24	0	0,75	0
KH	2	0,5	4	20	0,2	0,55
HK	7	1,0	10	14	0,5	0,25
HHK	10	2,0	13	11	0,8	0,05
KSE	6	1,5	5	19	0,6	0,15

Zur Darstellung wurden zunächst, ebenso wie bei Bild 104, die zu erwartenden Spannungen mit Hilfe angenommener Verformungs- und E-Modul-Differenzen zwischen Stein und Restauriermörtel berechnet. In die Diagramme wurden die in Tabelle 12 enthaltenen Kennwerte der betreffenden Steinarten und Mörtel eingetragen. Diese Werte sind wiederum auf die Messungen an einer bestimmten, zufällig ausgewählten Gesteinsprobe bezogen. Die vertikalen Linien in Bild 106 repräsentieren die Verformungsdifferenzen, die man in Tabelle 12 nachlesen kann.

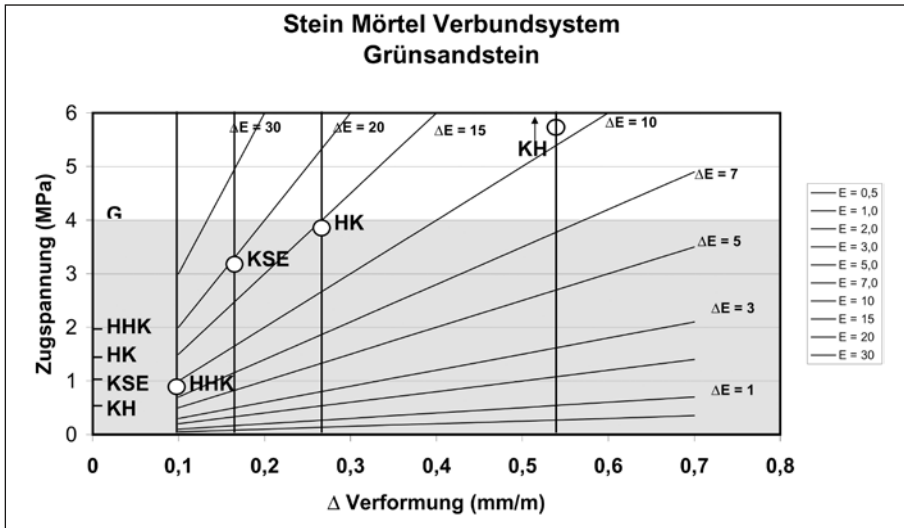


Bild 106: Spannungs-Verformungs-Diagramm des Verbundsystems Grünsandstein – Steinersatzmörtel. Die Kreise repräsentieren die Differenz ΔE -Modul (kMPa) und Δ Verformung (= hygri sche Dehnung) für die betreffenden Mörtelarten. An der Ordinate sind die Zugfestigkeiten von Grünsandstein und Mörteln angetragen. KH = Kalkhydrat, HK = Hydraulischer Kalk, HHK = Hochhydraulischer Kalk, KSE = Kieselgel Mörtel. Die Fläche unterhalb der Zugfestigkeit des Grünsandsteins ist grau hinterlegt. Alle E-Modul-Differenzen und Verformungen innerhalb der grauen Fläche führen nicht zu einer Schädigung des Grünsandsteins und sind zulässig. Im Schadensfall versagen alle Systeme aufgrund der zu geringen Zugfestigkeit der Mörtel. Kalkhydrat ist nicht geeignet, weil die E-Modul-Differenz ($\Delta E = 20$ kMPa) zu groß ist.

Bild 106 zeigt das Beispiel eines Regensburger Grünsandsteins von der Alten Pinakothek. Dessen Haftzugfestigkeit beträgt 4 MPa; es handelt sich um ein qualitativ sehr hochwertiges Material. Die Berechnungen beziehen sich auf einen Durchfeuchtungsvorgang mit seiner dazugehörigen hygri schen Dilatation. Man erkennt, dass die darstellenden Punkte der Verformungs- und E-Modul-Differenzen für alle Bindemittel mit Ausnahme der Kalkmörtel KH innerhalb der grau hinterlegten Zone liegen. Die auftretenden Spannungen führen nicht zur Schädigung des Grünsandsteins. Das Versagen wird an der Grenzfläche auftreten, weil die Haftfestigkeit der Mörtel überschritten wird. Die höchsten Spannungen wären bei reinem Kalkmörtel KH zu erwarten, weil hier die Differenz der hygri schen Dilatation am größten ist. Allerdings versagt dieses System sehr bald aufgrund der geringen Haftzugfestigkeit des Kalkmörtels.

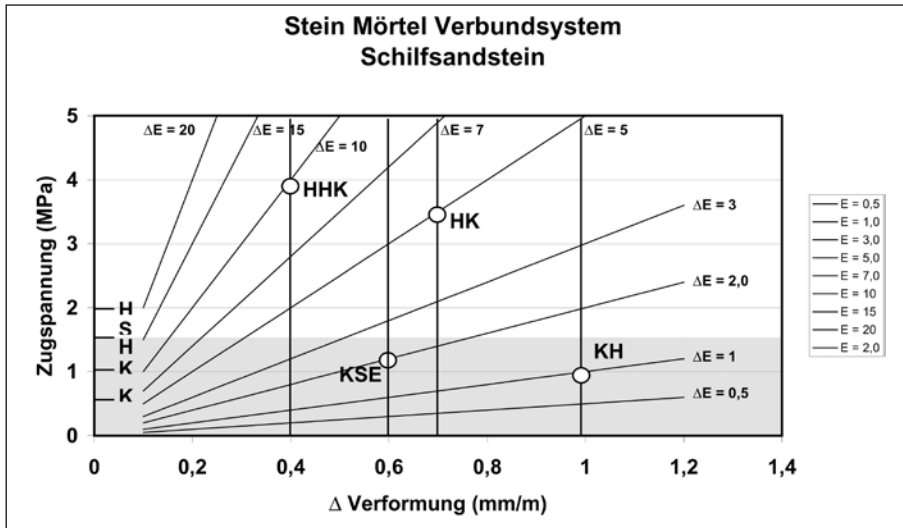


Bild 107: Spannungs-Verformungs-Diagramm des Verbundsystems Schilfsandstein – Steinersatzmörtel. Die Kreise repräsentieren die Differenz ΔE -Modul (kMPa) und Δ Verformung (= hygische Dehnung) für die betreffenden Mörtelarten. An der Ordinate sind die Zugfestigkeiten von Schilfsandstein und Mörteln angetragen. Als Beispiel wurde eine sehr weiche Varietät des Schilfsandsteins gewählt. KH = Kalkhydrat, HK = Hydraulischer Kalk, HHK = Hochhydraulischer Kalk, KSE = Kieselgel Mörtel. Die Fläche unterhalb der Zugfestigkeit des Schilfsandsteins ist grau hinterlegt. Alle E-Modul-Differenzen und Verformungen innerhalb der grauen Fläche führen nicht zu einer Schädigung des Schilfsandsteins und sind zulässig. Im Schadensfalle sind nur Kalkmörtel und KSE Mörtel positiv zu beurteilen, weil sie wegen der zu geringen Zugfestigkeit der Mörtel versagen. Hydraulischer Kalk und Hochhydraulischer Kalk liegen außerhalb des zugelassenen Bereichs.

Beim Beispiel des Schilfsandsteins von Schloss Schillingsfürst in Bild 107 liegen die Verhältnisse anders, weil der ausgewählte Schilfsandstein eine viel geringere Haftzugspannung verträgt als der Grünsandstein. Das Diagramm wurde in gleicher Weise wie Bild 106 berechnet, wobei die Zahlenwerte aus Tabelle 12 Verwendung fanden. Aus den Zustandspunkten der hygischen Verformungs- und der E-Modul-Differenzen kann man ablesen, dass KSE-Mörtel und Kalkmörtel KH gut geeignet sind, weil die zu erwartenden Zugspannungen an der Grenzfläche niedriger sind als die Haftzugfestigkeit des Schilfsandsteins. Die anderen Bindemittel sind nicht geeignet, weil höhere Spannungen als die Haftzugfestigkeit des Schilfsandsteins auftreten können. Mit Ausnahme von hochhydraulischem Kalk versagt das Verbundsystem Stein – Restauriermörtel an der Materialgrenze oder im Restauriermörtel. Hydraulischer Kalk hat in diesem Beispiel eine identische Haftzugfestigkeit, sodass man nicht vorher-sagen kann, in welchem Material das Verbundsystem sich trennen wird.

Die an dieser Stelle gemachten Aussagen über Grenzwerte von Spannung und Verformung in Verbundsystemen »ungefestigt – gefestigt« oder »Stein – Mörtel« stellen

relativ einfache Näherungen dar und sollten deshalb näher erörtert werden. Rechnerisch beruhen sie auf dem Hook'schen Gesetz

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

σ = Spannung (MPa)

E = Elastizitätsmodul (kMPa)

ε = Verformung (mm/m)

Zunächst ist es angebracht, sich darüber Rechenschaft zu geben, welche Größen in die Berechnungen einfließen. Vereinbarungsgemäß wird der E-Modul als Tangente an der Spannungs-Verformungskurve bei 1/3 der Bruchlast gemessen. Die dieser Stelle entsprechende Verformung sollte im elastischen Bereich der Spannungs-Verformungslinie liegen und ist deshalb ein gutes Stück kleiner als die Bruchverformung.

Trägt man in einem Diagramm Spannung σ gegen E-Modul auf, wie in Bild 102 und Bild 103 geschehen, so erhält man, sofern sich eine lineare Korrelation herstellen lässt, eine für alle Materialzustände offenbar charakteristische Verformung (sogenannte spezifische Verformung). Deren Zahlenwert ist in jedem Fall geringer als die Bruchverformung, sodass man sich im sicheren Bereich bewegt, wenn man diese spezifische Verformung als Belastungsgrenze annimmt.

Auch die Frage nach dem Eintreten eines Schadens bedarf einer differenzierteren Betrachtung. Die Rissempfindlichkeit wird definiert als das Verhältnis von Zugfestigkeit β_z (in vielen Fällen auch Haftzugfestigkeit β_{hz}) zu tatsächlich wirkender Spannung σ_z :

$$K_R = \beta_z / \sigma_z$$

Zur Berechnung der Spannung σ_z muss das Hook'sche Gesetz um eine Relaxationszahl ψ erweitert werden, welche die gleiche Bedeutung wie die Kriechzahl ψ besitzt:

$$\sigma_z = E_z (\varepsilon_s + \varepsilon_T) \psi$$

ε_s = Schwinden bzw. Feuchtedehnung

ε_T = Temperaturdehnung

Die Relaxationszahl ist stets kleiner als 1 und berücksichtigt die Geschwindigkeit der Verformung. Sie muss experimentell bestimmt werden. Der Laborversuch zur Bestimmung von Bruchkraft, E-Modul und Bruchverformung, der z. B. im Fall der Druckfestigkeit gemäß EN 1926 durchgeführt wird, verlangt eine konstante Spannungszunahme von 1 MPa/s bzw. eine konstante Zunahme der Verformung von 1 mm/min, weil diese Materialkennwerte geschwindigkeitsabhängig sind und sich nur untereinander vergleichen lassen, wenn die Versuchsbedingungen identisch sind. Je langsamer die Kraftzunahme oder die Verformung anwächst, desto kleiner ist die entstehende Spannung, weil das Material Zeit hat, sich durch Kriechen (Relaxation) auf den veränderten Spannungszustand einzustellen.

Thermische oder hygrische Dehnungen in der natürlichen Umgebung laufen jedoch mit weitaus geringerer Geschwindigkeit ab als die vorgegebene Verformungsgeschwindigkeit im Druck- oder Zugversuch, sodass die resultierenden Belastungen des Gesteins viel geringer sind als im Laborversuch. Die Folge davon ist, dass in der Natur entweder viel weniger Schäden auftreten oder viel später eintreten als nach den Berechnungen zu erwarten wäre. Setzt man die scharfen Grenzwerte des Laborversuchs jedoch als Bewertungskriterium ein, befindet man sich immer auf der sicheren Seite und hat keine Schäden zu befürchten, sofern keine Verarbeitungsfehler gemacht werden.

Eine Durchfeuchtung führt aber andererseits auch zu einer Erweichung des Gefüges mit einer verminderten Festigkeit, sodass bei nassen Gesteinen eher mit Schäden zu rechnen ist. Eine systematische Untersuchung der Rissempfindlichkeit bei verschiedenen Feuchtegehalten wäre im Sinne der Nachhaltigkeit von Restaurierungsmaßnahmen ein sehr verdienstvolles Unterfangen, das bisher leider immer noch nicht in Angriff genommen werden konnte.

9.4.4 Ziel der Untersuchungen

Wie im Falle der Fugenmörtel ist es das Ziel des Untersuchungsprogramms, für die weitere Erprobung an der Musterfläche ein oder zwei Empfehlungen zu formulieren. Im Untersuchungsbericht sind die Eigenschaften des Gesteins denen der Steinersatzstoffe gegenüberzustellen und im Vergleich zu bewerten. Auf Besonderheiten bei der Verarbeitung ist gesondert hinzuweisen. Die in Tabelle 11 genannten Anforderungen sind möglichst genau einzuhalten, da Steinersatzstoffe größere Flächen einnehmen können und sich aus diesem Grund Anpassungsmängel nicht nur auf das optische Erscheinungsbild, sondern auch auf die Haltbarkeit gravierend auswirken.

9.5 Schlämmen und Putze auf Naturstein

9.5.1 Allgemeines

Putze und Schlämme gestalten die Oberfläche eines Natursteinmauerwerks und schützen es vor zu starker Durchfeuchtung. Dieser Schutz besteht aber nur, wenn sie neben einer geringeren Saugfähigkeit auch eine ausreichende Wasserkapazität besitzen, was eine gewisse Mindeststärke voraussetzt. Ist der Putz oder die Schlämme dagegen zu dünn, sättigen sie sich selbst zu schnell mit Wasser und geben dieses dann nach innen an den Stein weiter.

Schlämme überziehen ein Mauerwerk in einer dünnen, einschichtigen Lage, sodass die Struktur des Mauerwerks darunter hindurchscheint. Sie besitzen eine Dicke

um 5 mm. Putze verdecken dagegen die Struktur des Mauerwerks. Sie sind meist zweilagig aufgebaut und erreichen Stärken bis 20 mm, im Falle von Sanierputzen von 30–40 mm. In weit größerem Maß als bei Schlämmen ist ihre Oberfläche handwerklich-künstlerisch gestaltet. Bevorzugt wurden perfekt gestaltete Steinquader imitiert, indem eine entsprechende Bemalung mit Abschattungen und hellen Flächen gestaltet wurde. Eine andere Technik eine Quaderung vorzutäuschen bestand darin, mit einem Seil eine horizontale und vertikal verlaufende Eintiefung in den noch weichen Putz einzuschlagen, die dann dunkler ausgemalt wurde, um eine Fuge vorzutäuschen. Diese Fassadengestaltung war im Klassizismus sehr beliebt (Ludwigstraße in München).

Auf der Schlämme oder dem Putz liegt meist noch eine Farbschicht, es gibt aber auch durchgefärbte Schlämmen und Putze. Historisch kann man davon ausgehen, dass Bruchsteinmauerwerk wohl immer verputzt war, aber nicht allein aus optischen Gründen, um die Heterogenität des Mauerwerks zu verdecken, sondern auch, um das aus vielen dicken und saugfähigen Fugen bestehende Mauerwerk trocken zu halten. Ein Sichtsteinmauerwerk aus gut gefügten Quadern aber dürfte nur in seltenen Fällen verputzt, eher dagegen geschlämmt oder farbig gefasst gewesen sein, um die Verschiedenartigkeit des Steinmaterials zu verbergen und der Fassade ein einheitliches Aussehen zu verleihen. Steinsichtiges Mauerwerk ist hauptsächlich eine Domäne des 19. und 20. Jh.

Die Vielfalt der heute lieferbaren Schlämmen und Putze ist der Verschiedenartigkeit der Fragestellungen angemessen. Die Putzsysteme basieren meist auf hydraulischen Kalken als Bindemittel mit den entsprechenden Zusätzen zur Verminderung der Saugfähigkeit, Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens sowie der Minderung der Reißneigung. Es gibt aber auch auf Kunststoffdispersion mit Silikonharz aufgebaute Putze, die sehr dünn aufgetragen werden können. Diese Putze eignen sich stilistisch nicht für historische Denkmalfassaden.

9.5.2 Spezialputze

Sonderaufgaben bei feuchte- und salzbelastetem Mauerwerk erfüllen die sogenannten Sanierputze, Opferputze und Wärmedämmputze. Sanierputze nach WTA-Richtlinie 2-9-04/D (bzw. dem Entwurf E-2-9-18/D) bestehen aus Spritzbewurf, Porengrundputz (nicht hydrophob) und eigentlicher Sanierputz-Oberschicht (hydrophob). Ihre Stärke beträgt rund 30 mm, was bei historischem Mauerwerk im Anschlussbereich an Fenstergewände und Altputze zu Problemen führt. Eingesetzt werden Sanierputze bei stark mit Salzen und Feuchtigkeit belastetem Mauerwerk, wenn herkömmliche Putze nicht mehr ausreichend haltbar sind. Der Name Sanierputz ist in gewissem Grade irreführend, weil die Schadensursachen nicht behoben, sondern nur verdeckt werden. Weitergehende Informationen über Sanierputze sind bei HILBERT et al. (1992) und SNETHLAGE (1997) zu finden.

Wärmedämmputze verdanken ihre Eigenschaften vor allem Luftporenbildnern und hoch porösen Leichtzuschlägen, welche für die sehr hohe Porosität von 50–60 Vol.-% verantwortlich sind. Damit das mineralische Gerüst noch genügend stabil bleibt, muss Zement als Bindemittel eingesetzt werden. Dennoch besitzen diese Putze aufgrund der hohen Porosität eine niedrige Druckfestigkeit und sind in allen Eigenschaften nicht mit normalen Zementputzen zu vergleichen.

Opferputze dagegen sind bewusst darauf ausgelegt, ihre Funktion nur über einen begrenzten Zeitraum zu erfüllen. Sie werden aufgetragen, damit die Kristallisation von Salzen nicht an der Gesteinsoberfläche, sondern in der Putzschicht erfolgt. Wenn die Opferputze zerstört sind, werden sie abgenommen und entsorgt, damit das eingefangene Salz nicht wieder in das Mauerwerk zurückwandern kann. Im Gegensatz zu Sanierputzen sind sie nicht hydrophob ausgerüstet, damit sie möglichst viel Salz aufnehmen können. Die hohe Porosität wird wiederum durch Luftporenbildner und hoch poröse Leichtzuschläge (z. B. Blähton, Bims) erzielt. Die Eigenschaften von Opferputzen können durch verschiedene Bindemittel gesteuert werden [siehe HILBERT (1995)].

Um sprachlich unschöne Wortgebilde und Wiederholungen zu vermeiden, wird für die weiteren Ausführungen nur noch der Begriff Schlämme verwendet, da diese in der Natursteinkonservierung eine größere Bedeutung aufweisen als reguläre Putze. Alle Aussagen beziehen sich aber voll inhaltlich auch auf die Untersuchung und Rezeptur von Putzen.

9.5.3 Befund

Werden an historischen Bauwerken Schlämmen gefunden, so sind die Befunde zunächst zu kartieren und unter restauratorischen sowie materialtechnischen Gesichtspunkten zu beschreiben (Stratigrafie, Struktur, Farbe, Beimengungen, Zustand). Sie sind nach Möglichkeit unter Zuhilfenahme archivalischer Studien und materialkundlicher Analysen zeitlich einzuordnen. Von besonderer Bedeutung ist der Befund zu den handwerklich-künstlerischen Techniken zur Oberflächengestaltung, sei es Abreiben, Glätten u. v. a.

9.5.4 Untersuchungsprogramm

An den restauratorischen Befund schließen sich naturwissenschaftliche Analysen an, welche die Zusammensetzung und physikalisch-mechanischen Eigenschaften der entnommenen Proben bestimmen. Diese Untersuchungen können dem Zweck dienen, weitere Argumente für die zeitliche Einordnung zu gewinnen; sie müssen jedoch auch darauf ausgerichtet sein, die für die Anpassung der Reparaturschlämmen erforderlichen Kennwerte zu bestimmen. Gerade die Bestimmung der physikalischen und

mechanischen Eigenschaften kann mitunter unmöglich sein, wenn kein geeignetes Probenmaterial entnommen werden kann. Die Prüfung von Putzen ist in der DIN 18555 geregelt. Alle erforderlichen Angaben für ein umfassendes Testprogramm finden sich in KNÖFEL & SCHUBERT (1992b, 1993).

Notwendige Untersuchungen zur Zusammensetzung sind z. B.

- Sieblinie und Mineralbestand des Zuschlags
- Art des Bindemittels, Gehalt an hydraulischen Anteilen
- Verhältnis Bindemittel/Zuschlag
- Färbung durch natürliche Pigmentierung des Sandes oder Zugabe von Pigmenten
- Zusätze zum Bindemittel wie Kasein, Albumin, Öl etc.

Diese Angaben legen zunächst einmal die Mörtelklasse fest, der die Reparaturmörtel angehören sollen.

9.5.4.1 Probenpräparation

Die zu untersuchenden physikalischen und mechanischen Eigenschaften betreffen das Feuchtetransportverhalten und die Festigkeits-Verformungseigenschaften (Tabelle 13). Da die neuen Putze oder Schlämmen sowohl mit ihren historischen Vorläufern als auch mit dem Naturstein als Untergrund in Verbindung stehen, müssen ihre Eigenschaften auf beide Materialien abgestimmt sein. Es sind deshalb bei der Präparation der Proben besondere Vorkehrungen zu treffen. Für die Messung der Feuchtetransporteigenschaften werden Formkörper nach ISO 12572 hergestellt. Für die Messung der Festigkeitseigenschaften empfehlen sich Verbundkörper, indem die Schlämm-Muster auf die Gesteinsoberfläche aufgetragen werden (DIN 18555).

Tabelle 13: Qualitätsprüfungen für Schlämmen und Putze auf Naturstein

Eigenschaft	Prüfmethode	Anforderung/Richtwert
β_D Druckfestigkeit	DIN 18555-3 zurückgezogen	$\beta_D(\text{Putz, Schlämme}) < \beta_D(\text{Stein})$
Luftporengehalt L des Frischmörtels	DIN 18 555-2 zurückgezogen	$L = 5\text{--}10\%$
Wasseraufnahmekoeffizient der geschlämmten Fassade	ISO 15148	$w \leq 1\text{--}3 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$
β_{HZ} Schlämme – Untergrund	DIN 18 555, Teil 6	$\beta_{HZ} = 0,2\text{--}1,0 \text{ N/mm}^2$
Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl Schlämme	ISO 12572 μ dry/wet cup	$\mu \leq 50$ Vergrößerung s_d max. 20%
β_{HZ} = Haftzugfestigkeit; ein Versagen der Haftung in der Schlämme ist wünschenswert. Angaben nach ibac, Poster beim Workshop Mörtel in der Denkmalpflege, Fulda, 1993 [siehe auch SASSE & SNETHLAGE (1997)]		

9.5.4.2 Struktur und Farbe

Die Anpassung der neuen Schlämmen erfordert Geschick und Erfahrung. Deshalb sollten bereits bei den Labormustern Restaurator und Materialprüfer Hand in Hand arbeiten, damit schon von Anfang an nur Systeme mit praktischen Erfolgsaussichten ausgewählt werden. Die Befunde zu handwerklich-künstlerischen Techniken der Oberflächengestaltung sind in Betracht zu ziehen, damit nicht Zusammensetzungen ausgesucht werden, die wegen eines falschen Bindemittels oder einer ungünstigen Sieblinie ungeeignet sind.

Mineralischen Systemen sind relativ enge, natürliche Grenzen gesetzt, innerhalb derer die Eigenschaften variiert werden können. Da es sich aber bei historischen Schlämmen um rein mineralische Systeme handelt, wird man mit Sicherheit auch heute mit der Verwendung von ausschließlich mineralischen Bindemitteln zum Erfolg zu kommen.

Größtkorn und Sieblinie des Sandes und dessen Einbettung in das Bindemittel bestimmen zusammen mit der handwerklich-künstlerischen Bearbeitung das Erscheinungsbild (Struktur, z. T. auch Farbe). Die neuen Deckschichten sollten in allen Punkten den Vorgaben des Originals entsprechen. Das Größtkorn wird durch den Befund vorgegeben; die Sieblinie kann dagegen durchaus in Richtung einer besseren Korngrößenabstufung geändert werden.

Die Farbe historischer Schlämmen ist meist durch eine natürliche Färbung des verwendeten Sandes hervorgerufen. Ungewaschene Natursande können auch heute noch verwendet werden, wenn der schlämbare Anteil nicht zu hoch liegt (DIN EN 1996 und DIN 18550). Ist diese Forderung nicht erfüllt, so steigen der Bindemittelbedarf und das Erhärtungsschwinden an. Es bilden sich Risse, die Festigkeit, Haftung und auch die Frostsicherheit der Schlämme werden unzureichend sein. Werden rein gewaschene Sande verwendet, kann der Fall eintreten, dass die Feuchtmörteleigenschaften einen plastischen Schlämmauftrag nicht zulassen.

Daraus geht hervor, dass man bei Struktur und Farbe durchaus in ein Dilemma kommen kann, aus dem ein Ausweg weniger mit Hilfe der Analytik als vielmehr mit Hilfe der praktischen Erfahrung gefunden wird.

9.5.4.3 Bindemittel

Die aus historischer Sicht für eine Auswahl in Frage kommenden Bindemittel bewegen sich im Dreieck Kalk – Zement – hydraulische Zusätze. Die meisten historischen Schlämmen enthalten wegen der Verunreinigungen im Branntkalk hydraulische Anteile und sind deshalb den Wasserkalken oder sogar den hydraulischen Kalken zuzuordnen. Aus heutiger Sicht können insbesondere bei der Festigung fein abschup-pender Sandsteinoberflächen sehr dünne Kieselgel-gebundene Schlämmen eingesetzt werden [ETTL et al. (1996)]. Auch in dem kommerziellen Modulsystem, das auf

einem vorhydrolysierten, hoch bindemittelhaltigen Kieselsäureester basiert, sind Rezepturen für Schlämmen auf Naturstein vorgesehen.

9.5.4.4 Kriterien für die Verträglichkeit Alt – Neu

Die Anpassung des neuen Systems an die historischen Schlämmen erfolgt anhand der in Tabelle 13 genannten Parameter. Das neue System soll stets etwas »weicher« eingestellt sein als die historische Schlämme und der Untergrund. Von entscheidendem Einfluss für die Verträglichkeit beider Materialien sind die Saugfähigkeit und der E-Modul. Unterschiede in Saugfähigkeit (gemessen durch den w-Wert) und Trocknungsgeschwindigkeit führen auf Dauer zu unterschiedlicher mikrobiologischer Besiedlung, unterschiedlicher Verschmutzung und deshalb zu farblichen Differenzen zwischen Alt- und Neubestand.

Der E-Modul bestimmt die Steifigkeit des Materials. Differieren die E-Moduln der aneinandergrenzenden Materialien zu sehr, so werden aufgrund der thermischen und hygri-schen Dehnungen Risse an den Materialgrenzen entstehen. Die Verwendung von Zement und Trass erhöht den E-Modul beträchtlich, sodass die Gefahr besteht, dass die neuen Schlämmen zu hart geraten. Trocknen diese auch noch zu schnell, liegt ein weiteres Risiko darin, dass der noch nicht ausreagierte Trass die gleichen negativen Folgen nach sich zieht wie ein überhöhter Feinanteil im Zuschlag. Sofern die Porosität es zulässt, könnte überlegt werden, den E-Modul durch eine Zugabe von Luftporenbildnern an die Erfordernisse anzupassen.

Neben dem Bindemittel (Kalk, hydraulischer Kalk, Weißzement, Trass) können die Eigenschaften auch durch den Zuschlag verändert werden. Quarzsand mit scharfkantiger oder splittriger Körnung erhöht z. B. den E-Modul und die Festigkeit, Kalkstein- oder Marmorsand erniedrigen den E-Modul. Eine ideale Sieblinie vermindert den Bindemittelbedarf und reduziert das Schwinden.

9.5.4.5 Organische Zusätze

Die Wirkung von historischen Zusätzen wie Kasein, Kollagen oder Albumin sind nicht einheitlich, wie die umfangreichen Untersuchungen von Knöfel und Mitarbeitern nachweisen [BOENKENDORF et al. (1995); KNÖFEL & WINNEFELD (1995); WINNEFELD & KNÖFEL (1996, 1997)]. Im Normalfall vermindern derartige Zusätze die Druckfestigkeit und damit auch den E-Modul, erhöhen aber von Fall zu Fall die Saugfähigkeit. Es kann deshalb nicht darauf verzichtet werden, den Einfluss dieser Zusätze gesondert zu untersuchen, da ihre Wirkung stark von der Körnung des Sandes und dem Bindemittel abhängt. Einen Überblick über die Eigenschaften verändernden Wirkungen historischer Zusatzstoffe im Falle von Wasserkalkhydrat gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Wirkung von historischen und modernen Zusatzmitteln auf Putz- und Mörtteleigenschaften (Wasserkalkhydrat)

	B_Z	B_D	B_{BZ}	B_D/B_Z	B_{HZ}	E	W/B	W	ϵ_{s1}	WRV	μ
Kasein	↓	↓	↓	↓	n. b.	↓	↓	↑	↓	n. b.	↓
Molkeeiweiß	↓↑	↓	↓	↓	n. b.	↓↑	↓	↓	↓	n. b.	↓
Kollagen	↓↑	↓	↓	↓	n. b.	↓↑	↓	↓	↓	n. b.	↓
Dispersion	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓↑	↓	↓	n. b.	↓
Holzkohle	↓↑	↓	↓↑	↓	n. b.	↓	n. b.	n. b.	n. b.	↓↑	n. b.
Faser	n. b.	↓	n. b.	n. b.	n. b.	↓	↑	↑	↑	n. b.	↓
Fließmittel LP	n. b.	↓	↓↑	↓	n. b.	n. b.	↓	↑	↑	n. b.	↓
Methylzellulose	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	↓	n. b.	n. b.	n. b.	↓↑	n. b.
Plastifizierer LP	n. b.	↓	↓↑	↓	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	↓

B_Z : Zugfestigkeit, B_D : Druckfestigkeit, B_{BZ} : Biegezugfestigkeit,
 B_D/B_Z : Verhältnis Druckfestigkeit/Zugfestigkeit, B_{HZ} : Haftzugfestigkeit
E: Elastizitätsmodul, W/B: Wasserkapazität, W: Wasseraufnahmekoeffizient
 ϵ_{s1} : Erhärtungsschwinden, WRV: Wasserrückhaltevermögen
 μ : Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
Die Pfeile bedeuten eine Erniedrigung bzw. Erhöhung des Materialkennwertes, nicht eine Verbesserung oder Verschlechterung der Eigenschaft (zusammengestellt nach KNÖFEL und Mitarbeitern 1995, 1996, 1997).

9.5.4.6 Porenraumeigenschaften

Die Porenraumeigenschaften bestimmen das Feuchteverhalten der Schlämme. Der Luftporengehalt soll zwischen 5 und 10% liegen, damit ausreichende Dampfdiffusion und Frostsicherheit gegeben sind. Der Wasseraufnahmekoeffizient w soll immer unter dem des Natursteins liegen, insgesamt aber nicht über $3 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$ betragen, damit der geforderte Regenschutz gegeben ist. Der s_d -Wert der durchfeuchteten Oberflächenzone soll durch die Schlämme um nicht mehr als 20% zunehmen, damit für eine ausreichende Trocknungsgeschwindigkeit gesorgt ist.

9.5.4.7 Festigkeitsmessungen

Für die Verbindung zum Naturstein ist als erste Voraussetzung zu erfüllen, dass die Gesteinsoberfläche selbst eine ausreichende Haftfestigkeit aufweist, damit die neue Schlämme überhaupt halten kann. Unter Umständen muss deshalb eine Festigung (siehe dort) vorgenommen werden und die Abzugfestigkeit der Steinoberfläche ohne Schlämme bestimmt werden. Das System ist dann so zu wählen, dass die Haftzugfestigkeit im Bereich von $0,2$ bis $1,0 \text{ N/mm}^2$ liegt, wobei ein Wert von $1,0 \text{ N/mm}^2$ als sehr hoch einzustufen ist und für eine sichere Haftung nicht benötigt wird. Von Fall

zu Fall können auch Haftzugfestigkeiten von weniger als $0,2 \text{ N/mm}^2$ als vollkommen ausreichend beurteilt werden. Beim Abzugstest soll die Abrissfläche in der Schlämme selbst oder an der Grenze Stein – Schlämme liegen, auf keinen Fall jedoch im Naturstein.

9.5.4.8 Hinweise zur Verarbeitung

Für die Qualität von Schlämmen sind nicht allein die verwendeten Materialien an sich, als vielmehr die Qualität der Ausführung selbst entscheidend. Bestimmte Bindemittel und Zusätze wie Kalk oder Trass erfordern eine gründliche Nachsorge, die je nach Wetterbedingungen das Abhängen mit feuchten Planen oder sogar das regelmäßige Besprühen erfordert. Für das Nachstellen bestimmter Techniken der Oberflächengestaltung müssen verschiedene Muster angelegt werden, um die durch den restauratorischen Befund belegten ästhetischen und verarbeitungstechnischen Ansprüche zu erfüllen.

9.5.5 Schlussfolgerungen

Die Entscheidung, ob eine Schlämme bzw. ein Putz konservatorisch oder denkmalpflegerisch notwendig ist und deshalb aufgebracht werden soll, kann nur auf der Grundlage eines schlüssigen Gesamtkonzepts getroffen werden, in welches die Bauphysik in entscheidender Weise eingebunden sein muss. Zu diesem Gesamtkonzept gehört die Klärung von Fragen wie

- historischer Befund
- Ausschluss von offensichtlichen Schadensquellen (defekte Eindachungen und Regenableitungen)
- Vorhandensein von aufsteigender Feuchte
- Ausmaß von Schlagregenbelastung oder Kondensatbildung
- Ausmaß der Salzbelastung und Art der Salze.

Erst wenn diese Fragen mit Hilfe der in diesem Leitfaden genannten Untersuchungen beantwortet sind, kann beurteilt werden, ob das Mauerwerk und der Stein einen Oberflächenschutz (Regenschutz) benötigen, und welche Eigenschaften die Schlämme oder der Putz besitzen müssen, um dieser Schutzfunktion gerecht zu werden.

9.6 Farbanstriche auf Stein

9.6.1 Allgemeines

Farbe auf Stein dient als Gestaltungselement und als Schutz vor der Witterung. In früherer Zeit waren die meisten Gebäude und Skulpturen im Freien farbig gefasst. Erst im Klassizismus entwickelt sich die sogenannte »Steinsichtigkeit« zur vorherrschenden Auffassung und die Romantik vertieft dieses Ideal mit ihren Vorstellungen über Materialgerechtigkeit und Patina verwitterter Oberflächen.

Als Gestaltungselement dient Farbe zum einen dem Ausgleich von Materialinhomogenitäten, um z. B. einer Fassade einen einheitlichen Charakter zu verleihen, zum anderen einer naturalistischen Gestaltung der Oberflächen, indem z. B. Inkarnate und Stoffe bei Skulpturen so naturgetreu wie nur möglich dargestellt werden. Ein weiteres Ziel ist die Materialimitation, wenn Vasen und Terracotten in Gärten beispielsweise »à la porcelain« gefasst wurden oder Sandsteine durch eine weiße Farbfassung wie Marmor erscheinen sollten.

Dient die Farbe dem Schutz vor Witterung, dann können die Übergänge zwischen Farbschicht und Schlämme fließend werden. Die Aufgabe der Farbe ist dann, die Wasseraufnahme zu reduzieren. Zwei grundverschiedene Farbsysteme stehen hierfür zur Wahl:

9.6.2 Farbsysteme: Aufbau und Eigenschaften

- **Filmbildende Farbsysteme:** Sie versiegeln die Oberfläche, verhindern das Eindringen von Wasser, aber auch den Transport von Wasserdampf. Diese Systeme bleiben nur bei ständiger Pflege und Überwachung wirksam. Mangelnde Pflege führt zu gravierenden Schäden. Zu den filmbildenden Farbsystemen gehören die für die Denkmalpflege wichtigen Leinöl-Bleiweiß-Farben, die Latexfarben, die inzwischen aber vom Markt verschwunden sind, sowie auf Harz-Öl-Mischungen aufbauende Lacke.
- **Nicht filmbildende Farbsysteme:** Sie reduzieren die Wasseraufnahme, behindern den Wasserdampftransport aber nur wenig, sodass eingedrungene Feuchtigkeit wieder entweichen kann. Diese Systeme sind gegenüber regelmäßiger Pflege unempfindlicher. Moderne Farbsysteme für poröse Baustoffe und Natursteine besitzen in der Regel die geforderte Wasserdampfleitfähigkeit, sodass das Risiko einer Dampfsperre nicht besteht. In dieser Gruppe finden sich die Kalkfarben (im Außenbereich immer mit Dispersionszusätzen), die auf Wasserglas aufbauenden Silikatfarben (reine Zweikomponenten Silikatfarbe, Einkomponente Silikat-Dispersionsfarbe) und die Silikonharzemulsionsfarben. Letztere enthalten als Bindemittel Silikonharz und Acryldispersion sowie sehr feine Füllstoffe wie Quarzpulver,

Calcitpulver oder Talcum. Chemisch definiert stellt dieses Farbsystem eine Öl-in-Wasser-Emulsion dar. Die hohe Wasserdampfleitfähigkeit wird dadurch erreicht, dass die Pigment-Volumen-Konzentration (PVK) so hoch ist, dass das Kunststoffbindemittel aufgebrochen wird und keinen Film bilden kann.

Um einen gleichmäßigen Farbauftrag zu gewährleisten, muss die Steinoberfläche eine homogene Saugfähigkeit aufweisen. Um dies zu erreichen, wird in einem ersten Arbeitsschritt eine Grundierung aufgetragen. Diese besteht im Fall der Silikatfarben aus dem reinen Bindemittel Wasserglas, bei den Silikonharzemulsionsfarben entweder ebenfalls aus Kaliwasserglas oder aus Kaliumsilikat und Kaliumsilikonat, welches hydrophobierend wirkt.

Farbsysteme werden zusätzlich auch mit unterschiedlichen Füllgraden und Füllstoffen angeboten. Verschiedene Körnungen erlauben die Herstellung von glatten bis rau-feinsandigen Farboberflächen. Schlämm-lasuren sind dahingehend formuliert, dass sie Unebenheiten des Untergrunds ausgleichen können. Die Struktur der Farbschicht kann als gestalterisches Element eingesetzt werden, sollte sich aber in erster Linie am historischen Befund orientieren.

Mitunter müssen Farben lasierend aufgetragen werden. Bei der Auswahl ist darauf zu achten, dass das ausgesuchte Farbsystem in dieser Technik auch verarbeitet werden kann. Oft bieten die Hersteller auch spezielle Verdünner an, die dann den lasierenden Farbauftrag ermöglichen. Im Bereich der Silikatfarben sind seit einiger Zeit sogenannte Silikatkreiden auf dem Markt, die für Lasuren und Retuschen gut geeignet sind. Die Farbe wird von der Silikatkreide auf die Oberfläche abgerieben und mit einem Fixativ (Kieselsäureester oder Wasserglas) im Sprühverfahren fixiert.

Um eine baldige biologische Besiedlung zu verhindern, enthalten die Silikonharzemulsionsfarben häufig Algizide und Fungizide. Bei den Silikatfarben verhindert die hohe Alkalität zumindest für eine gewisse Zeit eine biologische Besiedlung.

9.6.3 Befund

Die Untersuchung historischer Farbfassungen gehört zu den Grundforderungen der Denkmalpflege, da meist nur über sie Informationen zur Geschichte und zu früheren Konservierungen eines Objektes gefunden werden können. Häufig sind die Befunde sehr vereinzelt und allein das Auffinden der geeigneten Stellen erfordert große Erfahrung. Komplizierte Farbstratigrafien müssen trotz farblicher Veränderungen entschlüsselt und in eine Zeitfolge gebracht werden. Die Kooperation zwischen Restaurator und Naturwissenschaftler muss von Beginn an gewährleistet sein, damit optischer Befund und Analyse Hand in Hand gehen können.



Bild 108: Spätgotische Kalkmalerei auf einem Sandsteinfragment aus dem ehemaligen Zisterzienserkloster Himmelkron/Oberfranken (Aufnahme: A. Held)

In schwierigen Fällen müssen Querschnitte angefertigt werden, um die einzelnen Schichten trennen zu können und um Schmutzschichten zwischen einzelnen Farbschichten als Zeichen einer längeren Standzeit erkennen zu können. Die Befunde sind auf Folien oder in Plänen sorgfältig einzutragen. Für die Dokumentation eignen sich spezielle Befundprotokolle aus dem Bereich der Skulpturen- oder Wandmalerei-restaurierung, welche Raum für farbige und schriftliche Informationen lassen [z. B. PURSCHE (1992)].

Die elektronische Bildverarbeitung gestattet die Kartierung und – wenn gewünscht – visuelle Rekonstruktion verschiedener Farbfassungen im Laufe der Jahrhunderte.

9.6.4 Chemische Analyse

Die chemische Analyse dient zur Unterstützung des restauratorischen Befundes. Sie gibt Hilfen bei der Materialkunde und bei der zeitlichen Einordnung. Sie erfordert große Erfahrung und Geschick, da mit kleinsten Probenmengen gearbeitet werden muss. Ohne mikrochemische Bindemittelnachweise wird man kaum zum Erfolg kommen [siehe KÜHN (1981); SCHRAMM & HERING (1988)]. Im Einzelfall muss darüber entschieden werden, ob ein größerer apparativer Aufwand (XRD, FT-IR, DC, GC-MS)

angebracht ist. Im Einzelnen sollte jede Farbschicht durch folgende Eigenschaften beschrieben werden:

- Aufbau: Farbschichten, Grundierungen, Dicke der Schichten
- Pigmente: farbbestimmende Pigmente, Abmischungen
- Bindemittel: Öl, Kalk, Tempera, Silikat
- Füllstoffe: Kreide, Baryt, Flussspat, Quarzmehl u. a.
- Zusatzstoffe: Kasein, tierische/pflanzliche Leime, Leinöl, Albumin, Harze, Kunststoffdispersion u. a.
- Bemerkungen: Pigmentumwandlungen, Schmutzlagen etc.
- Spuren früherer Konservierungen wie Polyvinylacetat, Acrylat u. a.

Tempera stellt eine Wasser-Öl-Emulsion dar. Zur wässrigen Phase gehören Leime, Kasein, Eigelb, Stärke oder Gummi Arabicum, zur öligen Phase vorwiegend Leinöl, Mohnöl, Walnussöl, Sonnenblumenöl. Bei der fetten Tempera überwiegt der Ölanteil, bei der mageren der wässrige Anteil. Zusätzliche Modifikationen ergeben sich durch Hinzufügung von Harzen und Wachsen.

Die FT-IR Spektroskopie mit Mikroskop hat sich gerade bei Farbschichtuntersuchungen als überlegen erwiesen. Mit Hilfe des Mikroskops können enge Bereiche eines Querschnitts ausgewählt und analysiert werden, sodass es möglich wird, einzelne Farbschichten separat zu untersuchen, sofern diese nicht zu dünn sind. Mit der Diamantzelle können im FT-IR winzige Farb- oder Bindemittelpartikel erfolgreich bestimmt werden. Allerdings bereitet die Präparation der zu untersuchenden Partikel aus der Farbschichtprobe einige Mühe.

Steht kein FT-IR Mikroskop zur Verfügung, so ist zu bedenken, dass sich eine Stratigraphiebestimmung im Querschnitt und eine chemische Analyse mehr oder weniger ausschließen, weil hierfür die Farbschichten mechanisch getrennt werden müssen, was nach der Einbettung eines Querschnitts nicht mehr möglich ist. Um dennoch beides zu bekommen, sind also zwei Proben notwendig.

Die vor kurzem am Westportal des Regensburger Doms nachgewiesene dünne Leinölasur wirft die interessante Frage auf, ob diese Lasur als Grundierung für eine nachfolgende Fassung gedacht war – die dann nicht ausgeführt wurde – oder ob sie die Funktion eines vereinheitlichenden Oberflächenschutzes hatte.

9.6.5 Untersuchungsprogramm

Ebenso wie Putze und Schlämmen müssen Farbfassungen auf den Natursteinuntergrund abgestimmt sein. Als Regel sollte gelten, dass die Wasserdampfdurchlässigkeit des Untergrunds nicht beeinträchtigt wird. In manchen Gegenden haben sich aber – ganz im Gegensatz zur Expertenmeinung – auch filmbildende Ölfarben bewährt, allerdings nur dann, wenn eine ständige Nachsorge gewährleistet ist, bei der auf-

tretende Fehlstellen sofort ausgebessert werden. Die großen Figurengruppen vor dem Schloss Seehof bei Bamberg sind dafür ein treffendes Beispiel. Vor einigen Jahren wurden sie im Winter nicht mehr durch Zelte geschützt, was heute aber wieder gemacht wird. Trotzdem schreiten die Schäden an der Leinöl-Bleiweißfarbe immer noch in beängstigendem Tempo voran (Bild 109 und Bild 110).



Bild 109: Figurengruppe Jupiter im Kampf mit Giganten im Park von Schloss Seehof bei Bamberg; die mehrere Jahre fehlende Wintereinhausung wurde seit einigen Jahren wieder installiert.



Bild 110: Figurengruppe Jupiter im Kampf mit Giganten im Park von Schloss Seehof bei Bamberg; gravierende Schäden an der Leinöl-Bleiweißfarbe

Da bei Farbfassungen auf Oberflächen im Freien neben dem optischen Effekt auch Fragen des Feuchteschutzes und der Beständigkeit angesprochen sind, ist die Beteiligung von Fachleuten aus der Bauphysik unerlässlich. Die in jüngster Zeit entwickelten Möglichkeiten einer rechnerischen Feuchtesimulation haben die Möglichkeiten zur Beurteilung geeigneter Farbsysteme beträchtlich erweitert [KÜNZEL (1994); KÜNZEL & KRUS (1995); KÜNZEL et al. (1995)]. Die numerischen Simulationsprogramme für den instationären Feuchte- und Wärmetransport »WUFI« oder »DELPHIN« sind käuflich zu erwerben.

HERM et al. (1992) und BRANDES (1995) haben durch Messungen gezeigt, dass die Eigenschaften der einzelnen Farbsysteme vom Natursteinuntergrund abhängig sind. Die Kennwerte w , B , μ und s_d sind also für ein und dasselbe Farbsystem je nach Gestein mitunter beträchtlich verschieden. Die von den Firmen auf Glasfritten oder am freien Film bestimmten Kennwerte sind dagegen nur bedingt auf Natursteine übertragbar. Gesonderte Messungen für jedes Gestein haben deshalb ihre volle Berechtigung.

Ob ein Farbsystem hydrophobe Eigenschaften aufweisen sollte oder nicht, kann nicht generell, sondern nur für den Einzelfall beantwortet werden. Grundsätzlich gelten hier dieselben Überlegungen wie bei der farblosen Hydrophobierung.

9.6.5.1 Probenpräparation

Für die Messung verwendet man am besten Scheiben, deren Durchmesser so gewählt wird, dass die Messfläche als repräsentativ für das Gestein angesehen werden kann. Die feuchtetechnische Beurteilung einer Farbe ist wesentlich auf den s_d -Wert abgestimmt. Mit hinreichender Genauigkeit lässt sich dieser gemäß

$$s_d(\text{Farbe}) = s_d(\text{Farbe} + \text{Gestein}) - s_d(\text{Gestein})$$

ermitteln, wenn die Streuung des s_d -Wertes des Gesteins kleiner als 0,02 m ist. In der Praxis treten hier aber Probleme auf, weil diese Voraussetzung in mehrfacher Hinsicht nicht erfüllt ist.

Vor dem Farbanstrich wird eine Grundierung (mitunter auch Lösche genannt) vorgenommen, um die Saugfähigkeit des Untergrundes zu homogenisieren. Steinuntergrund, Grundierung (Lösche) und pigmentierte Farbschicht beeinflussen sich aber gegenseitig, weil das Bindemittel unterschiedlich in den Porenraum eindringt und dort selektiv adsorbiert wird. Diese selektive Adsorption ist für jedes Gestein verschieden und stellt letztlich den Grund für das unterschiedliche gesteinspezifische Verhalten der Farbsysteme dar. Als Folge davon ist die Schichtdicke der einzelnen Lagen nicht mehr definiert und die zur Auswahl stehenden Farbsysteme müssen auf dem zur Diskussion stehenden Originalgestein getestet werden.

Die Proben sind aus den genannten Gründen in besonderer Weise zu präparieren. Bei einer Messung am freien Film entspricht die Schichtdicke der Dicke des Farbfilms, der die beiden Luftvolumina mit der unterschiedlichen Luftfeuchte (dry cup oder wet cup) voneinander trennt. Trägt man den Farbfilm auf eine poröse Fritte auf, so kann der s_d -Wert mit der obigen Formel berechnet werden, da der Diffusionswiderstand der Fritte konstant oder sogar so gering ist, dass er vernachlässigt werden kann.

Bei einem Gestein ist dagegen der Diffusionswiderstand im Vergleich zu dem des Farbfilms nicht mehr zu vernachlässigen. Um den dry cup- bzw. wet cup-Laborversuch den realen Gegebenheiten am Gebäude anzupassen, ist es deshalb erforderlich, die Dicke der Gesteinsschicht abzuschätzen, welche das Außenklima der Umgebungsluft von dem Bereich des Konstantklimas im Gesteinsinneren trennt. Diese Dicke beträgt etwas mehr als die Tiefenlage des Maximums der mittleren Feuchte [siehe SNETHLAGE & WENDLER (1996, 1997)]. Sie ist vom w-Wert abhängig und sie entspricht zahlenmäßig in etwa den für die Eindringtiefe von Steinschutzstoffen geforderten Werten (Tabelle 7).

Als Konsequenz dieser Überlegungen resultieren also für gut feuchteleitfähige Gesteine dickere Prüfscheiben als für schlecht leitfähige Gesteine. Eine gesteins-

spezifische Messung des s_d -Wertes wird also mit einer dem betreffenden Gestein angepassten Scheibendicke d ausgeführt, die etwa folgende Maße besitzt:

- gering saugend: $w = 0,1 \dots 0,5 \text{ kg/m}^2\text{v h}$ $\mapsto d = 1,0 \text{ cm}$
- mittel saugend: $w = 0,5 \dots 3,0 \text{ kg/m}^2\text{v h}$ $\mapsto d = 3,0 \text{ cm}$
- gut saugend: $w > 3,0 \text{ kg/m}^2\text{v h}$ $\mapsto d = 6,0 \text{ cm}$

Zu Vergleichszwecken sollten die Muster dennoch zusätzlich auch auf Glasfritten aufgetragen werden, damit später bei ausreichendem Datenmaterial vielleicht ganz auf die Untersuchung mit Natursteinen verzichtet werden kann.

9.6.5.2 w-Wert, s_d -Wert, Künzel-Zahl

Die einschlägigen Beurteilungskriterien basieren auf DIN EN 1062, in der in Anlehnung an bereits bestehende Übereinkünfte die folgenden Zahlenwerte für w und s_d genannt werden:

Man differenziert für die Saugfähigkeit:

- stark saugend: $w \geq 0,5 \text{ kg/m}^2\text{v h}$
- mittel saugend: $w = 0,1 \dots 0,5 \text{ kg/m}^2\text{v h}$
- gering saugend: $w \leq 0,1 \text{ kg/m}^2\text{v h}$

und für die Wasserdampfleitfähigkeit:

- hoch wasserdampfdurchlässig: $s_d \leq 0,14 \text{ m}$
- mittel wasserdampfdurchlässig: $s_d = 0,14 \dots 1,4 \text{ m}$
- gering wasserdampfdurchlässig: $s_d \geq 1,4 \text{ m}$.

Die Anforderungen an die Anpassung eines Farbsystems an den Steinuntergrund sind in Tabelle 15 aufgeführt. Überwiegend betreffen sie die Feuchtetranseigenschaften des Materialverbundes Naturstein – Farbe, also die Kennwerte Wasseraufnahmekoeffizient w , Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und s_d -Wert ($s_d = \mu \cdot s$, s = Schichtdicke). Diese Größen beschreiben das Wasseraufnahme- und das Trocknungsverhalten. Je größer der w -Wert ist, desto kleiner muss s_d sein, damit das Gestein nach einem Regen wieder vollständig austrocknen kann. Diese Forderung lässt sich nach KÜNZEL (1969) in der nach ihm benannten Künzelzahl K in dem Produkt

$$K = w \cdot s_d \leq 0,1 \text{ kg/mv h}$$

ausdrücken, wobei als Grenzwerte gelten: $s_d \leq 2 \text{ m}$ und $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ v h}$. Das Beurteilungskriterium für Farbanstriche lautet deshalb, dass das Produkt $w \cdot s_d$ nach einem Farbanstrich zumindest den gleichen Wert besitzt wie vorher, vorzugsweise jedoch sogar abgenommen hat. Da jeder Farbanstrich aber zwangsläufig den s_d -Wert erhöht, muss auf der anderen Seite die Wasseraufnahme reduziert werden, damit das Wirkungskriterium erfüllt werden kann.

Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, besteht die begründete Gefahr, dass das Gestein unter der Farbschicht zunehmend durchfeuchtet wird. Gleiches gilt auch für Schlämmen und Putze, welche ebenfalls die Wasseraufnahme reduzieren müssen, da sonst der Feuchtegehalt im Gestein kontinuierlich ansteigen kann. Nach KÜNZEL (1969) weisen feuchtetechnisch günstig zu bewertende Beschichtungen einen s_d -Wert von kleiner als 0,14 m und einen w -Wert von kleiner 0,1 kg/m²/h auf.

Aus der Definition nach Künzel geht hervor, dass auch filmbildende, dichte Anstrichsysteme die Anforderungskriterien erfüllen können. Auf die Langzeitprobleme, die solchen Farbsystemen inhärent sind, ist eingangs bereits deutlich hingewiesen worden, sodass von ihrer Verwendung abgeraten wird.

Tabelle 15: Qualitätsprüfungen für Farbanstriche auf Naturstein

Symbol	Eigenschaft	Dimension	Prüfmethode	Anforderung
–	Foto mit Farbkarten			relative Anforderung; Aufnahme dient für zukünftige Vergleiche
CIE LAB	X, Y, Z: Standard Farben, L*, a*, b*, c*: CIE-LAB Koordinaten, ΔE^* , ΔH^* , ΔL^* , ΔC^* : Farbdifferenzen	–	ISO 11664 Teil 3 und 4	relative Anforderung; Messung dient für zukünftige Vergleiche
w	Wasseraufnahme-koeffizient	kg/m ² /h	ISO 15148 oder Karsten	$w_i \leq w_o$ (siehe s_d)
B	Wassereindringkoeffizient	cm/vh	ISO 15148	$B_i \leq B_o$ (siehe s_d)
μ	Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl	–	ISO 12572 dry + wet cup	siehe s_d
$s_d = \mu \cdot s$	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke	m	ISO 12572 dry + wet cup	$s_{di} \approx s_{do}$ möglichst geringe Zunahme
$w \cdot s_d$	Künzel-Zahl	kg/mv/h	–	$(w \cdot s_d)_i \leq (w \cdot s_d)_o$
–	biologische Besiedlung	Zellen n/g Gestein	MPN Test etc.	mindestens keine schnellere Besiedlung als unbehandelt
–	Trocknung	h	20/65 $v \leq 2$ m/s	Trocknungszeit bis zur Ausgleichsfeuchte $t_i \leq 1,2 t_o$
<p>Erläuterung für s_d: Da für das Gestein keine Schichtdicke d definiert ist, muss als Schichtdicke die Dicke der von kurzfristigen Feuchteschwankungen erfassten Oberflächenzone eingesetzt werden. Diese ist etwas größer als die Lage des Maximums der mittleren Feuchte. Als Faustregel kann gelten: $w = 0,1 \dots 0,5$: $d = 1,0$ cm; $w = 0,5 \dots 3,0$: $d = 3,0$ cm; $w > 3,0$: $d = 6,0$ cm. (w = unbehandeltes Gestein)</p>				

Andererseits erfüllen auch die reinen Silikatfarben, deren Beständigkeit sich seit mehr als 100 Jahren erwiesen hat, die Anforderungskriterien nicht, da ihr w -Wert zu

hoch liegt. Diese Tatsache möge zeigen, dass Bewertungsmaßstäbe immer mit Umsicht interpretiert werden müssen.

9.6.5.3 Trocknungsverhalten

Als weiterer Parameter, mit dem ein geeignetes Farbsystem bestimmt werden kann, bietet sich das Trocknungsverhalten an. Als Grenzwert kann eine Verlängerung der Trocknungszeit (z. B. im Normklima 20/65, Windgeschwindigkeit $\leq 2\text{ m/s}$) gegenüber dem unbeschichteten Gestein im Rahmen von 20 % hingenommen werden. Hierbei ist wiederum zu berücksichtigen, dass eine reduzierte Wasseraufnahme den Nachteil der verminderten Dampfdiffusion ausgleichen kann.

Abschließend sei auch hier nochmals auf die verbesserten Möglichkeiten hingewiesen, Feuchtetransportprozesse auf der Grundlage von Messdaten durch eine rechnerische Simulation zu bestimmen [KÜNZEL (1994); KÜNZEL & KRUS (1995); KÜNZEL et al. (1995)].

9.6.5.4 Biologische Besiedlung

Für ein langes und gutes Erscheinungsbild einer Farbe stellt das Problem der biologischen Besiedlung einen wichtigen Gesichtspunkt dar. Es ist im Zweifelsfall durch mikrobiologische Testreihen zu prüfen, ob ein Farbsystem einen Nährboden für das Wachstum von Organismen darstellt. Bakterien, Algen und Pilze gelten als Erstbesiedler, es folgen verschiedene Arten von Flechten, die eine Symbiose von Algen und Pilzen darstellen. Pilze und Flechten können mit ihren Hyphen einige Millimeter in den Porenraum und in Kristallspaltflächen eindringen, um sich mit der nötigen Feuchtigkeit zu versorgen. Moose besitzen keine echten Wurzeln. Ihre Rhizome dienen nur der Verankerung auf dem Untergrund. Moose sind für die Steinsubstanz ungefährlich. Bei zu starker biologischer Besiedlung können die metabolischen Produkte der Organismen die Dauerhaftigkeit der Farbe negativ beeinflussen. Das biologische Wachstum hängt aber nicht nur von den chemischen Eigenschaften des Farbsystems, sondern in wohl noch größerem Maße von den Feuchtetransporteigenschaften ab. Lässt die Farbe eine im Mittel höhere Feuchte direkt an ihrer Oberfläche zu, wird sich dieser Bereich sehr schnell z. B. mit Grünalgen und dunklen Pilzen besiedeln.

9.6.5.5 Absolute Farbmessung

Neben den physikalischen Eigenschaften können für spätere Vergleiche messtechnisch absolute Farbwerte von Bedeutung sein. Zur Auswahl stehen »farbgetreue« Aufnahmen mit Farbkarten oder Farbmessungen nach CIE LAB, wie sie in Tabelle 15 aufgeführt sind. Die Farbwerte werden jedoch immer vom Tageslicht und den vorherrschenden Farben in der Umgebung beeinflusst, sodass Aufnahmen mit Farbkarten nicht unbedingt »farbgetreu« sind. Die mit Farbmessgeräten bestimmten Farbwerte

werden dagegen in einem abgeschlossenen System mit genau definiertem Weißlicht und gegen ein Standardweiß gemessen und sind aus diesem Grund verlässliche Bezugsgrößen.

9.6.6 Konservierung von Polychromie

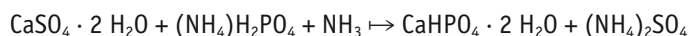
Die Erhaltung historischer Polychromie stellt mitunter gravierende Probleme. Meist sind die Farbschichten stark verschmutzt, locker, teilweise abgelöst und aufgebogen. Obwohl hier die Hauptarbeit nur direkt am Objekt an Musterflächen getan werden kann, sollte überlegt werden, wodurch die Objektmuster mit Laboruntersuchungen ergänzt und vorbereitet werden können. Die folgende Liste der restauratorischen Arbeiten ist sicher nicht vollständig und wäre deshalb immer mit einem Fachrestaurator abzuklären:

- Reinigung: Tupfer, Lösungsmittel, Mikrosandstrahl o. Ä.
- Festigung: Aufweichen und Niederlegen mit Quellmittel und Kleber
- Sicherung und Anböschung der Farbschollen mit Feinmörtel und Festigungsmittel (Bestimmung geeigneter Materialien durch Versuche wie bei Steinersatzstoffen und Festigung)
- Freilegung: Skalpell, Mikrosandstrahl, Lösungsmittel.

Historische Kalkfarben im Freien sind in den meisten Fällen als Folge der hohen Schadstoffbelastung der Luft mit Schwefeldioxid im 19. und 20. Jh. zu einem hohen Prozentsatz in Gips umgewandelt. Da Gips relativ gut wasserlöslich ist und die Gefahr besteht, dass die gesamte Farbschicht abgewaschen wird, kann eine Umwandlung von Gips in Calcit mit Hilfe von Ammoniumcarbonat $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ in Betracht gezogen werden. Andererseits werden in Gips umgewandelte Kalkfarben vorwiegend im regen-geschützten Milieu angetroffen, sodass die Gefährdung durch Regen vor Einleitung von Maßnahmen abgeschätzt werden muss. Die dieser Umwandlung zugrunde liegende Reaktion lautet:



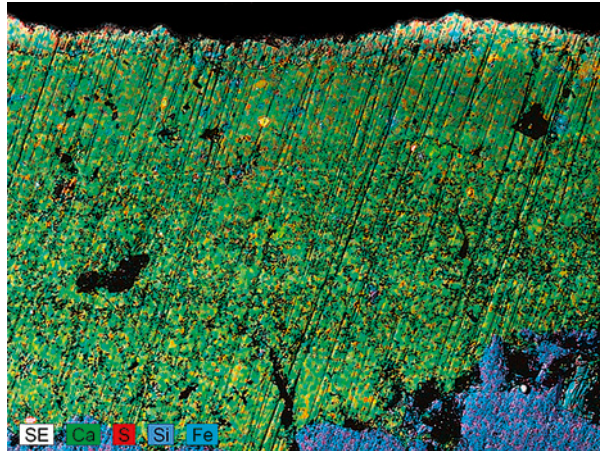
Die Reaktion verläuft bei einem Überschuss von $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ vollständig ab und es wird Calcit gebildet. Dieser ist jedoch, wie REM Aufnahmen zeigen, sehr feinkörnig und kann durch CO_2 -haltiges Regenwasser sehr leicht wieder aufgelöst werden. Eine andere, unter Umständen besseren Erfolg versprechende Methode beschreiben SNETHLAGE et al. (2008). Sie verwenden an Stelle von Ammoniumcarbonat ein Ammoniumdihydrogenphosphat, sodass als Umwandlungsprodukt von Gips das Hydrogenphosphat Brushit $\text{CaHPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ gemäß der folgenden Reaktionsgleichung entsteht.



Die Umwandlung von Gips in Brushit erfolgt mit einer größeren Ausbeute als beim Ammoniumcarbonat. Die entstehenden Brushitkristalle sind wesentlich besser aus-

gebildet, was auf Bild 111 und Bild 112 gut zu erkennen ist. Die Löslichkeit von Brushit (0,31 g/l) ist zwar höher als die von Calcit, sie ist aber rund 10 mal geringer als die von Gips (2,41 g/l), sodass die Stabilität der Farbschicht deutlich verbessert wird.

Bild 111: Umwandlung von Gips mit Ammoniumdihydrogenphosphat in Brushit; Elementanalyse eines Querschnitts durch die Farbfassung am Weltgerichtsportal von Sankt Sebald in Nürnberg



Die Einfärbung der Elementanalyse in Bild 111 ist so gewählt, dass Gips als Additionsfarbe von Grün und Rot in Orange erscheint. Es ist klar zu erkennen, dass die Umwandlung in Brushit praktisch vollständige erfolgt ist, weil nur noch wenige kleine orange Punkte zu erkennen sind. Beiden Methoden ist jedoch gemeinsam, dass als Nebenprodukt Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ entsteht. Dieses Salz besitzt eine hohe Löslichkeit und zersetzt sich erst ab 235 °C. Es soll deshalb vorschriftsmäßig entweder mit Kompressen entfernt oder mit Hilfe von Barytwasser in unlösliches Bariumsulfat umgewandelt werden. Beide Behandlungen sind jedoch nur in Teilen erfolgreich, besonders wenn Ammoniumsulfat tiefer in das unterliegende Gestein hat eindringen können. Es besteht deshalb die Gefahr, die Farbschicht und das Gestein an Stelle von Gips mit einem anderen bauschädlichen Salz zu befrachten. Die Konvertierung von Gips in Calcit bzw. Brushit ist deshalb genau hinsichtlich ihrer Notwendigkeit und ihrer Vor- und Nachteile zu überlegen.

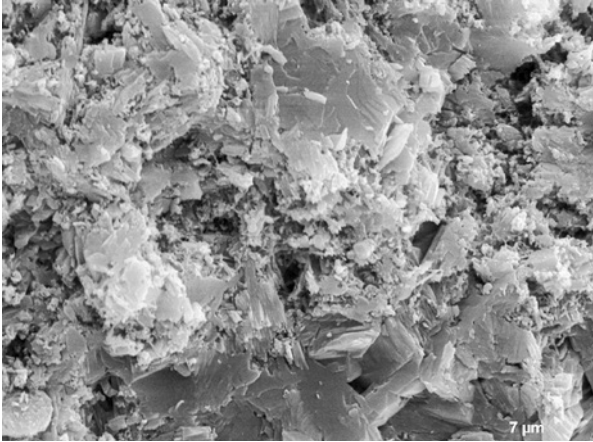


Bild 112: Umwandlung von Gips mit Ammonium-dihydrogenphosphat in Brushit. Die REM Aufnahme zeigt die gut ausgebildeten Brushitkristalle.

Bei ölgebundenen oder Tempera-Farbschichten stellt sich oft das Problem der Ablösung vom Untergrund in kleinen Schollen oder größeren Flecken. In den meisten Fällen ist für diesen Schaden die ungenügende Festigkeit der Grundierung die Ursache. Um die raue Steinoberfläche für eine Bemalung vorzubereiten, wird zuerst eine feine mit Leim gebundene Grundierung aus Bologneser Kreide oder Calcitkreide aufgebracht. Die saugfähige Grundierung wird dann mit einer lackartigen Isolierschicht abgedichtet, welche zum Beispiel aus einem Harz-Ölgemisch besteht. Auf diese Schicht werden dann die ölgebundenen Farbschichten aufgetragen. Durch diesen Farbschichtaufbau ist nun vorgegeben, dass die spannungsreiche Ölfarbe auf einer weichen, leimgebundenen Schicht aufliegt. Wird nun im Laufe der Jahrzehnte oder Jahrhunderte der Leim durch mikrobielle Aktivität abgebaut, verliert die Ölmalerei die Haftung zum Untergrund und löst sich ab. Ein Querschnitt durch eine Farbschichtenabfolge mit Grundierung zeigt das folgende Bild 113.

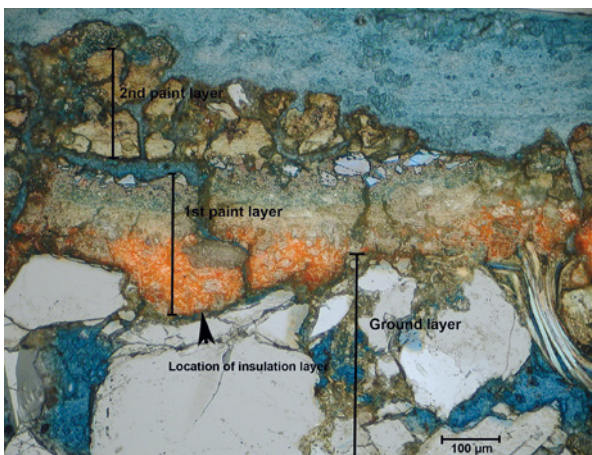


Bild 113: Abfolge der Farbschichten einer Ölmalerei mit leimgebundener Grundierung; Weltgerichtsportal Sankt Sebald Nürnberg (Aufnahme: Drewello)

Eine Konservierung solcherart geschädigter Farbschichten kann nicht von oben durch die Farbschichten hindurch, sondern nur von den Rändern oder durch die feinen Risse des Kraquele vorgenommen werden. In einem derart komplexen chemischen System mit unterschiedlichsten mechanischen Eigenschaften sollten die häufig eingesetzten Acrylharze nicht verwendet werden, weil die Gefahr besteht, dass die Festigkeit und Elastizität der behandelten Bereiche zu stark ansteigt. WENDLER & SNETHLAGE [in EXNER & SNETHLAGE (2008). DBU-Projekt 23065] haben deshalb mit Kieselsäureester, modifiziert mit reaktiven Silanen zur Haftvermittlung, auf chemisch unterschiedlichsten Untergründen experimentiert und gute Festigungserfolge erzielt.

9.6.7 Probleme der Dauerhaftigkeit

Liegen Salzbelastungen vor, so sollte das Verhalten der ausgewählten Farbsysteme auch in Gegenwart der betreffenden Salze untersucht werden. Testreihen mit Luftfeuchtewechseln, die ein In-Lösung-Gehen und Kristallisieren der Salze hervorrufen, sind geeignet, die relative Beständigkeit der Farbsysteme untereinander abzuschätzen. Als Versuchsanordnung kann bei hydrophoben Farbsystemen die invers-cup-Methode gewählt werden. In der Praxis muss man sich allerdings darüber im Klaren sein, dass bei gravierenden Salzgehalten auch die Gesteinsschäden so erheblich sind, dass kein Farbsystem eine ansprechende Beständigkeit erreichen wird. Vielmehr sollten dann immer zuerst Maßnahmen gegen die Salzbelastungen ergriffen werden, bevor über eine Farbgebung gesprochen wird.

Aufgrund der Bedeutung der Frage wird nochmals darauf hingewiesen, dass Farbsysteme, die diffusionsoffen sind, ein geringeres Risikopotential für den Naturstein darstellen als diffusionsdichte Farbschichten. Diffusionsdichte Anstriche sind weniger auf sehr dichten als vielmehr auf porösen Gesteinen risikobehaftet und sollten grundsätzlich nur dann verwendet werden, wenn deren Pflege auf Dauer gesichert ist. Ist dies nicht der Fall, dann wird durch die sich bildenden Risse Feuchtigkeit nach innen eindringen, die sich dann an der Unterseite der Farbschicht ausbreitet. Spätere, großflächige Abplatzungen unter Verlust der originalen Steinoberfläche sind die Folge.

9.6.8 Kriterien der Denkmalpflege

Wichtigstes Kriterium für die Standortbestimmung der Denkmalpflege ist die Bewahrung der Originalsubstanz. Konservierung hat Vorzug gegenüber Restaurierung oder gar Renovierung. Farbbefunde sind als historische Dokumente genauso zu erhalten und zu konservieren wie die Gesteinssubstanz. Neufassungen oder Teilfassungen haben sich am Befund zu orientieren. War der Farbanstrich deckend oder lasierend, in jedem Fall haben sich die neuen Farbgebungen an diesen Vorgaben auszurichten.

Stellt eine Farbschicht aber aufgrund negativer Eigenschaften eine Bedrohung für das Gestein dar, kann eine Entfernung möglicherweise nötig werden.

Aus der Sicht der Denkmalpflege erfüllt die Kalkfarbe eine Reihe von Kriterien, die sie für historische Bauwerke besonders geeignet macht: Sie wittert im Lauf der Zeit ab, ohne das darunter liegende Gestein in Mitleidenschaft zu ziehen, und erfüllt auf diese Weise das Kriterium der Kompatibilität und der Reversibilität. Diese Aussage gilt aber nur unter der Voraussetzung, dass der gebildete Gips abgewaschen wird und sich nicht im Porengefüge verteilt. Kalkfarben erfordern eine sorgfältige Verarbeitungstechnik, sodass die Verwendung von Kalkfarben auch den Auftrag der Pflege historischer Techniken erfüllt. Zusätzlich verleihen sie mit ihrer Leuchtkraft historischen Oberflächen einen Ausdruck, welcher von anderen Farbsystemen nicht erreicht wird.

Kalkfarbe ist jedoch auf exponierten Teilen wie Gesimsen oder Pfeilerköpfen nicht beständig, sondern wird durch Gipsbildung und Kalklösung sehr schnell, womöglich bereits in einem Winter, abgetragen. Es muss also sehr genau geprüft werden, wo Kalkfarben mit zufrieden stellender Dauerhaftigkeit zum Einsatz kommen können. Untersuchungen von STADLBAUER & BRANDES (2003) haben gezeigt, dass Kalkfarben mit modernen Dispersionszusätzen erheblich beständiger sind. Die Wirksamkeit einer Hydrophobierung ist dagegen in Frage zu stellen. Sobald nämlich der Abperleffekt nachgelassen hat, werden die feinen Calcitkristalle von der Oberfläche her beginnend weggelöst. Der Lösungsprozess dringt immer weiter nach innen vor, bis das gesamte Gefüge aufgelöst und die Farbe gänzlich abgespült wird.

Neben der Pflege historischer Techniken, der die Denkmalpflege im Falle der Kalkfarben besonders verpflichtet ist, ist zu gewährleisten, dass die Feuchtetransporteigenschaften des gewählten Farbsystems so beschaffen sind, dass sie die o. g. Kriterien erfüllen und somit keine Gefahr für das Gestein besteht. In früheren Jahren ist dies nicht immer der Fall gewesen, wie die zahlreichen Schäden mit Dispersionsfarben belegen. Auch die historisch bedeutsamen Leinöl-Bleiweiß-Fassungen auf Naturstein sind in diesem Kontext kritisch zu bewerten, da sie ihre Wirkung nur bei beständiger Wartung beibehalten, während aufgrund mangelnder Pflege zahlreiche gravierende Schäden aufgetreten sind.

Reine Silikatfarben (Patent für Adolph Wilhelm Keim im Jahre 1878) können aufgrund ihrer langen Geschichte heute durchaus als eine historische Maltechnik bezeichnet werden. Sie haben sich in der Praxis an zahllosen Objekten als sehr dauerhaft erwiesen, ohne Schäden hervorzurufen, obwohl sie auf bestimmten Substraten das Anforderungskriterium $w \cdot s_d \leq 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}$ nicht erfüllen, da ihr w -Wert zu hoch liegt. Auch moderne Farbsysteme aus der Klasse der Silikat-Dispersionsfarben oder auch der Silikonharzemulsionsfarben können in eine Auswahl einbezogen werden, wenn entsprechende Testreihen die Einhaltung der Anforderungskriterien nachweisen. Silikatfarben sind prinzipiell sehr dauerhaft und werden den Handwerker und Restaurator kaum vor Gewährleistungsprobleme stellen. Bei der Auswahl der Farbsysteme sollte man sich aber immer vergewissern, dass die ausgewählte Farbe nicht zu hohe Anteile

an Kunststoffdispersion enthält, worauf gerade Billiganbieter nicht gern hinweisen. Es kann dann passieren, dass Schäden wie bei nicht gepflegten Ölfarben oder reinen Dispersionsfarben auftreten.

Die Denkmalpflege legt neben ihren Forderungen nach einem denkmalgerechten Bindemittel auch großen Wert auf eine vollständige Analyse der Farbpigmente, damit der historisch überlieferte Farbton möglichst identisch nachgestellt werden kann. Pigmente sind zudem oft wichtige Belege für die Altersstellung einer Farbfassung. Pigmente wie Zinkweiß ZnO oder Titanweiß TiO_2 sind erst im 19. Jh. auf den Markt gekommen und können deshalb nicht Bestandteil einer barocken Bemalung sein.

Da auf historisch gealterten Oberflächen häufig eine Mischung unterschiedlicher Farbschichten oder Farbreste vorliegt, kann sich die Auswahl eines geeigneten neuen Farbanstrichs als sehr schwierig herausstellen. Alte Kalkfarben mit und ohne Kasein, Reste von Ölfarben und Dispersionsfarben schaffen in vielen Fällen einen derart heterogenen Untergrund, dass nur noch Farbsysteme mit organischen Zusätzen eine ausreichende Haftung und Haltbarkeit garantieren. Trotz prinzipieller Bedenken wird der Denkmalpfleger in solchen Fällen der Verwendung von Silikatdispersionsfarben oder Silikonharzemulsionsfarben zustimmen, wenn die geforderte Wasserdampfleitfähigkeit des Produkts sichergestellt ist.

9.7 Hydrophobierung

9.7.1 Allgemeines

Die Hydrophobierung von Naturstein zum präventiven Schutz gegen die Verwitterung ist eine seit langer Zeit mit mehr oder weniger Erfolg vorgenommene Behandlungsmethode. Waren es seit alters Tränkungen mit Leinöl oder Behandlungen mit Wachsen, so wurden diese Mittel seit einigen Jahrzehnten von den fortlaufend verbesserten siliziumorganischen Steinschutzmitteln fast vollständig verdrängt. Bei einer allgemeinen Betrachtung der Hydrophobierung spielt die Wirkungsweise der unterschiedlichen Mittel – filmbildend (dampfsperrend) oder porenaukleidend (diffusionsoffen) – zunächst keine Rolle, da allein die Reduktion der Wasseraufnahme im Mittelpunkt steht.

Moderne Hydrophobierungsmittel sind farblos, verursachen keinen Glanz, sind mit dem bloßen Auge unsichtbar und behindern die Wasserdampfdiffusion nicht. Im Mittelpunkt der Überlegungen, ob eine Hydrophobierung angebracht ist oder nicht, steht immer die Reduktion der Feuchtebelastung bei direkter Beregnung, weniger die Verringerung des Schadstoffeintrags. Das mitunter vorgebrachte Argument, eine Hydrophobierung könne die Wiederverschmutzung verringern, hat sich als nicht stichhaltig erwiesen.

Meist geben ältere Bauteile durch entsprechende Schadensbilder wie ausgewaschene Konturen zu erkennen, dass sie stark von Schlagregen betroffen sind. In diesen und ähnlich gelagerten Fällen kann ein Schutz der Originalsubstanz durch eine Hydrophobierung sehr zweckmäßig sein.

Die Hydrophobierungsmittel gehören wie die Steinfestiger auf Basis von Kieselsäureestern zur Klasse der siliziumorganischen Verbindungen. Eine direkt an das zentrale Siliziumatom substituierte Alkylkette ist für die wasserabweisende Wirkung verantwortlich, während die drei anderen Alkoxygruppen durch Reaktion mit Feuchtigkeit im Baustoff hydrolysieren und die entstehenden Silanolgruppen durch Wasserabspaltung zu einem Polysiloxan (Silikonharzfilm) kondensieren (Erläuterungen hierzu siehe Kapitel E3 »Hydrophobierungsmittel: Silane – Siloxane – Polysiloxane«).

Hydrophobierungsmittel kommen zumeist als oligomeres Siloxan (etwa 4–7 Formeleinheiten sind bereits kondensiert), aber auch als Monomere oder Polymere in den Handel. Sie sind in aliphatischen Kohlenwasserstoffen oder Ethanol gelöst. Der Wirkstoffgehalt beträgt zwischen 5 und 7 Vol.-%. Daneben gibt es auch wässrige Mikroemulsionen (sogenannte SMK Technologie) entweder als Konzentrat oder mit 10 % Alkoxysiloxan Wirkstoffkonzentration. Die Konzentrate sind vor der Anwendung entsprechend zu verdünnen. Sie können ebenso wie die in Ethanol gelösten Siloxane dort in Betracht gezogen werden, wo organische Lösungsmittel sich als unverträglich mit benachbarten Kunststoffteilen erweisen [nähere Informationen siehe SNETHLAGE & WENDLER (2001)].

Flüssige Hydrophobierungsmittel, die im Flut- oder Sprühverfahren aufgetragen werden, sind für Anwendungszeiten über rund drei Minuten nicht geeignet, weil sich in der Baupraxis längere Applikationszeiten kaum realisieren lassen. Auch der Anwendung von Kompressen sind Grenzen gesetzt, zumal die dünnflüssigen Hydrophobierungsmittel zu leicht aus dem Kompressenmaterial heraustropfen.

Eine neuere Entwicklung stellen die Hydrophobierungscremes dar. Ihr Wirkstoffgehalt liegt mit 40 bis 100 % viel höher als bei den in Lösungsmitteln gelösten normalen Hydrophobierungsmitteln (ca. 7 % Wirkstoffgehalt). Hydrophobierungscremes bauen auf Mikroemulsionen auf. Die disperse Phase mit den eigentlichen Silan/Siloxan Wirkstoffgemischen wird durch Tenside, im vorliegenden Fall Silane mit funktionellen, hydrophilen Gruppen, und Co-Tenside (Silane/Siloxane) stabilisiert. Diese dienen dann bei der späteren Reaktion im Gestein als Haftvermittler zum Substrat. Werden Mikroemulsionen mit wenig Wasser hergestellt, so kann dieses als in der Tensidphase gelöstes Wasser angesehen werden. Es entstehen stabile, lagerungsfähige Produkte [SNETHLAGE & WENDLER (2001)]. Die zur Bildung der cremigen Konsistenz (Emulsion) benötigten Kohlenwasserstoffgemische besitzen einen hohen Dampfdruck und verdunsten schnell, sodass keine unerwünschten Rückstände verbleiben. Für Natursteine oder andere poröse Materialien, die einen w-Wert von kleiner als 0,8 (kg/m²Vh) besitzen, sind die Hydrophobierungscremes nicht geeignet. Der Vorteil der Hydrophobierungscremes liegt darin, dass ohne großen Aufwand lange Applika-

tionszeiten möglich sind. Aufgrund der hohen Wirkstoffkonzentration sind insgesamt geringere Auftragsmengen möglich als bei normalen Hydrophobierungsmitteln. Wie bei anderen Produkten auch, sollen Hydrophobierungscremes nie ohne Vorversuche und Testflächen angewendet werden.

Der Vollständigkeit halber sei noch auf die oleophobe-hydrophobe Behandlung hingewiesen. Diese Imprägnierung hilft gegen das Eindringen von unpolaren, öligen Flüssigkeiten und stellt in gewissen Grenzen auch einen Graffitienschutz dar. Die Wirkstoffe bestehen aus fluorierten Kohlenwasserstoffen (z. B. Teflon) und fluorierten Acrylaten sowie Copolymeren dieser Stoffgruppen. Um Missverständnissen vorzubeugen sei nochmals betont, dass im Folgenden immer nur von siliziumorganischen Hydrophobierungsmitteln ausgegangen wird.

9.7.2 Teilhydrophobierung

Obwohl mit Hilfe von Simulationsrechnungen bereits weitreichende Vorhersagen getroffen werden können [KÜNZEL (1994); KÜNZEL & KRUS (1995); KÜNZEL et al. (1995)], sind alle Auswirkungen einer Hydrophobierung auf den Feuchtehaushalt und das Verhalten von Natursteinen noch nicht bekannt. Eine Hydrophobierung soll jedoch immer als ein umfassender Regenschutz angelegt sein und nur bei tatsächlicher intensiver Regen- oder Schlagregenbelastung eingesetzt werden. Es dürfen auch nicht einzelne Fassadenabschnitte oder gar einzelne Bauteile behandelt werden, da ansonsten die angrenzenden Bereiche umso mehr mit Feuchtigkeit belastet werden. Die langfristigen Auswirkungen am Übergang hydrophobiert – nicht hydrophobiert lassen sich nicht mit Sicherheit vorhersagen.

9.7.3 Wirkungsweise einer Hydrophobierung

Die Hydrophobierung verhindert nur das Eindringen von flüssigem Wasser; Wasserdampf kann dagegen beinahe ungehindert aufgenommen und abgegeben werden. Deshalb stellt eine Hydrophobierung keine Dampfsperre dar.

Auf der anderen Seite bedeutet diese vorteilhafte Eigenschaft, dass eine Hydrophobierung die Mobilität von Salzen nur eingeschränkt verhindern kann, da alle Salze bereits im Luftfeuchtebereich in Lösung gehen und wieder kristallisieren können. Stark versalzte Fassadenabschnitte zu hydrophobieren ist deshalb sowohl zwecklos als auch langfristig möglicherweise risikobehaftet, da der Kristallisationshorizont der Salze in das Gesteinsinnere an die Grenze der hydrophobierten Schicht verlagert wird, sodass Schalenbildung und Verlust der Oberfläche eintreten können.

Bild 114 zeigt beispielhaft das Wasseraufnahmeverhalten dreier Modellsandsteine mit und ohne Hydrophobierung in Abhängigkeit von der Zeit, aufgetragen im Wurzelmaßstab. Im Beispiel von Sandstein SS-1 erreicht die kapillar aufsteigende Wasser-

front die Oberseite der Probe nach vier Stunden (zwei Stunden im Wurzelmaßstab). Die weitere Zunahme des Wassergehalts in der Probe wird durch das sogenannte Nachsaugen verursacht, welches dadurch entsteht, dass sich die Mikroporen erst langsam mit Wasser füllen.

Die Probe SS-3-H ist mit einem voll wirksamen Hydrophobierungsmittel behandelt. Die Wasseraufnahme bleibt während 24 Stunden unter 1 Gew.-%. Probe SS-2-H ist mit einem nur temporär wirksamen Mittel behandelt. Nach anfänglicher Wirkung verliert das Mittel nach vier Stunden seine Wirksamkeit; die Wasseraufnahme nimmt stetig zu und erreicht nach 24 Stunden zwei Drittel der Sättigungsfeuchte.

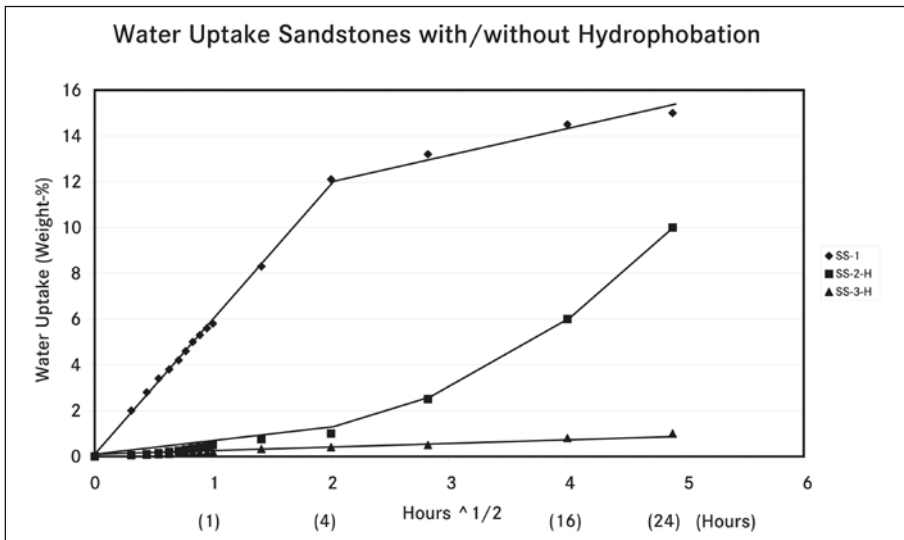


Bild 114: Beispielhafter Verlauf der Wasseraufnahme an Sandsteinen mit und ohne Hydrophobierung

9.7.4 Selektive Wirksamkeit, Unterschiede Sandstein – Kalkstein

Die Wirksamkeit von Hydrophobierungsmitteln ist je nach Natursteinart unterschiedlich und kann nicht von vornherein als gesichert angesehen werden. Die Laborversuche sollen deshalb klären, welche Mittel auf der betreffenden Gesteinsart tatsächlich wirksam sind.

Zwischen Kalksteinen und Sandsteinen bestehen gegenüber einer Hydrophobierung grundsätzliche Unterschiede, die sich in erster Linie aus dem Chemismus ableiten. Günstigere Voraussetzungen bieten Sandsteine, da sie ein silikatisches Grundgerüst besitzen, an das sich die siliziumorganischen Hydrophobierungsmittel besser anlagern können. Auch die Porositätseigenschaften sind bei Sandsteinen meist günstiger. Bei Kalksteinen hat man dagegen festgestellt, dass die Reaktivität der silizium-

organischen Hydrophobierungsmittel durch die carbonatische Matrix negativ beeinflusst wird, sodass sich die Polysiloxanfilme nicht mit den Porenwandungen verbinden und die erhoffte Wirkung unterbleibt.

Anders als die gängige Silikatoberfläche, die durch das überreichliche Angebot von Silanolgruppen (Si-OH Gruppen) gekennzeichnet ist, an welche sich die siliciumorganischen Konservierungsmittel aufgrund ihrer chemischen Verwandtschaft gern ankoppeln, weist die Carbonatoberfläche eine regelmäßige Anordnung von positiven und negativen Ladungszentren auf, welche durch die Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} und das Carbonation CO_3^{2-} repräsentiert werden. Den Nachteil, dass sich siliciumorganische Schutzmittel nicht oder nur sehr begrenzt mit der Carbonatoberfläche verbinden, versucht man mit Hilfe folgender Behandlungsschritte zu umgehen:

- Kalklasuren oder Kalkanstriche in der Funktion von Verschleißschichten. Um eine einigermaßen vertretbare Standzeit zu erreichen, muss Kunststoffdispersion zu gegeben werden, wobei es sich meist um Acrylatdispersionen handelt. In dieser Hinsicht besteht ein fließender Übergang zu den Silikonharzemulsionsfarben.
- Anwendung von verdünnten Kunstharzlösungen, meist Paraloid B72 in 3–7 %-iger Konzentration, gelöst in Butylacetat oder Ähnlichem
- Vorbehandlung mit Kieselsäureester, um ein SiO_2 -reiches Substrat im Porenraum zu erzeugen. Diese Behandlung ist vor allem für eine wirkungsvollere Hydrophobierung gedacht.
- Vorbehandlung mit Weinsäure, um eine hydroxylierte Oberflächenschicht aus Calciumtartrat-tetrahydrat zu erzeugen, auf der siliciumorganische Verbindungen gut anbinden können [WEISS et al. (2000)]
- Vorbehandlung oder Zugabe mit Haftvermittlern zu den siliciumorganischen Schutzmitteln, meist aus der Familie der Aminosilane
- pigmentierte, nicht pigmentierte, mehr oder weniger gefüllte Oberflächenüberzüge auf Basis von Silikonharzemulsionsfarben. Diese Systeme sind diffusionsoffen, nicht filmbildend und besitzen feinsten Calcit als Füllstoff, sodass sie in derselben Weise wie eine Kalklasur als Verschleißschicht wirken.
- kombinierte Behandlung aus Oberflächenschutz und Immobilisierung des calcitischen Porenraums mit Tensiden. Der Grundgedanke dieser Behandlungsmethode folgt aus der experimentell gewonnenen Erfahrung, dass die Kinetik der Calcitauflösung durch Tenside verringert wird. Da die Tenside bei stärkerem Säureangriff versagen, muss der Porenraum durch eine hydrophob wirkende Oberflächenbeschichtung geschützt werden. Zum Oberflächenschutz eignen sich nicht pigmentierte Silikonharzemulsionsfarben. Die bisher getesteten Tenside gehören überwiegend zu den Organophosphaten.

Konsequenterweise hat man seitens der Industrie speziell für Kalksteine formulierte Hydrophobierungsmittel entwickelt, welche neben dem Wirkstoff Siloxan noch Haftvermittler enthalten, welche die Anbindung der Polysiloxane auf den Carbonatoberflächen vermitteln. Eine andere Möglichkeit wäre die oben erwähnte Vorbehandlung mit einem stark verdünnten Kieselsäureester. Das gebildete Kieselgel fungiert dann

als Substrat für die Anbindung des Hydrophobierungsmittels. Die Kombination von vorhydrolysiertem Kieselsäureester mit Silan/Siloxan Hydrophobierungsmittel gibt es auch als anwendungsfertiges Produkt im Handel.

Bei der Entscheidung für eine bestimmte Behandlungsmethode ist es unerlässlich, die Porenraumeigenschaften und das Ausmaß der Schäden des Kalksteins zu berücksichtigen. Sehr dichte Kalksteine verwittern rein von der Oberfläche her. Die Schadstoffe dringen nicht in das Innere des Gesteins ein, sodass die Oberfläche mit der konstanten Geschwindigkeit von 10–20 µm pro Jahr zurückwittert. Poröse Kalksteine, die in manchen Varietäten der Ooidkalke Porositäten von 40 % und mehr aufweisen können, zeigen dagegen die von Sandsteinen her bekannte Tiefenverwitterung mit Schadensbildern wie Absanden, Schuppenbildung und Schalenbildung. Verstärkt werden diese Schäden noch durch das Vorhandensein von dicken Schmutzkrusten.

Bei wertvollen, bildhauerisch gestalteten Oberflächen muss man daher die Lage der Originaloberfläche zu rekonstruieren versuchen, weil sich die Verwitterung so tief in das Gefüge eingefressen hat, dass die Originaloberfläche zu einem Bestandteil der Gipskruste geworden ist. Die Konservierung solcherart geschädigter Gesteine verändert sich dann zu einem Problem der Konservierung von Gips-Calcit-Mischungen mit entsprechend neuen Problemen, die individuell gelöst werden müssen.

Beispielhafte Fortschritte auf diesem Gebiet hat das von der DBU geförderte Modellprojekt zur Kalksteinkonservierung am Westportal des Halberstädter Doms gebracht (IDK 2002). So wurden verbesserte Steinfestiger mit Haftvermittlern erprobt und optimierte Hinterfüll- und Anböschmörtel zur Fixierung mürber Oberflächen eingesetzt. Über modifizierte Applikationstechniken mit Packern, Vakuum- und Druckanwendung gelang es, auch tief liegende Schadenszonen zu erreichen. Die Erfolge der Hinterfüllung wurden mit hoch auflösendem Georadar überprüft.

Alle aufgeführten Methoden der Kalksteinkonservierung sind in der Praxis noch nicht Stand der Technik. Sie befinden sich im Erprobungszustand und lassen sich nicht ohne Weiteres auf andere Objekte übertragen. Kalksteinkonservierungen müssen deshalb immer mit größer angelegten Untersuchungsprogrammen gekoppelt werden, um erfolgreiche und denkmalverträgliche Lösungen zu finden.

Grundsätzlich sollte aber die Notwendigkeit einer Hydrophobierung immer kritisch hinterfragt werden, da sie wie sonst keine andere Konservierungsmaßnahme in die Feuchtetransporteigenschaften des Gesteins eingreift. Diese Überlegung gilt in besonderem Maße für dichte Kalksteine, da diese durch Anlösung der Calcite direkt an der Oberfläche verwittern. Sobald der Abperleffekt der Hydrophobierung verschwunden ist, können die an der Oberfläche liegenden Calcitkristalle wieder weggelöst werden, womit die Rückwitterung wieder in Gang gesetzt wird.

Auch die Hydrophobierung von Kalkanstrichen ist mit erheblichen Fragezeichen verbunden (vgl. Arbeitsschritt 9.6). Nur so lange der Abperleffekt intakt ist, besteht ein

wirkungsvoller Oberflächenschutz. Kann der Wasserfilm die Oberfläche wieder benetzen, lösen sich die Calcitkristalle auf, wodurch immer tiefer liegende Schichten des Anstrichs freigelegt werden, bis sich letztlich die gesamte Farbschicht aufgelöst hat.

9.7.5 Untersuchungsprogramm

Die Liste der erforderlichen Prüfungen ist in Tabelle 16 wiedergegeben. Es sind nur diejenigen Tests aufgeführt, auf die unter keinen Umständen verzichtet werden darf. Für die Erprobung neuer Produkte sind dagegen wesentlich umfangreichere Messungen erforderlich, die in SNETHLAGE & WENDLER (1996) oder in SASSE & SNETHLAGE (1997) erläutert sind.

Tabelle 16: Qualitätsprüfungen für Hydrophobierungsmittel

Symbol	Eigenschaft	Dimension	Prüfmethode	Anforderung
–	visuelle Eigenschaften	–	visuelle Beobachtung, quant. siehe Tab. 12, Kap. 9.4.3.2	mögl. keine Farbänderung mögl. keine Dunklung kein Glanz keine erhöhte Neigung zur Verschmutzung
w	Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² v/h	ISO 15148 DIN EN 1925 EN 15801	w ≤ 0,1
w	Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² v/h	Karsten	w ≤ 0,1
B	Wassereindringkoeffizient	cm/v/h	ISO 15148 DIN EN 1925 EN 15801	keine sichtbare Durchfeuchtung
s	Eindringtiefe WTA Arbeitsgruppe 3.17	mm	Nassauftrag bis 300 s, darüber Hydrophobierungscreme	w ≤ 0,5: Prüfen, ob Hydrophobierung erforderlich w ≤ 2,0: s = 7 mm w ≥ 2,0: s ansteigend bis max. 40 mm (w = unbehandeltes Gestein)
a _{hy}	hygrische Längenänderung	µm/m	hygrischer und überhygrischer Bereich [siehe SNETHLAGE & WENDLER (1996)]	keine Zunahme gegenüber unbehandeltem Gestein
µ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	–	ISO 12572 EN 15803 dry + wet cup	Zunahme ≤ 20 %

9.7.5.1 Probenpräparation

Zur Durchführung der Tests verwendet man am besten Bohrkerne, welche zur Bestimmung des Kapillartransports an den Zylinderseiten versiegelt werden können. Manche der nachfolgend aufgeführten Testmethoden verlangen die Messungen an Bohrkernscheiben, die im Anschluss an die ersten Prüfungen von den noch ganzen Bohrkernen abgetrennt werden können. Es ist leider unumgänglich, dass für diese Messungen ausreichend Steinmaterial zur Verfügung steht, da nicht alle Kenngrößen mit zerstörungsfreien Methoden bestimmt werden können. Hierdurch wird das Untersuchungsprogramm auf solche Objekte eingeschränkt, die aus Sicht der Denkmalpflege eine entsprechende Beprobung zulassen.

9.7.5.2 Visuelle Eigenschaften

Wie bei anderen Tränkstoffen auch sollen die farblichen Änderungen in einem hinnehmbaren Rahmen bleiben. Die Beurteilung bleibt dem visuellen Empfinden überlassen; strenge Festlegungen gibt es nicht. Die Wirkung auf das Erscheinungsbild wird später an der Musterfläche nochmals geprüft und kann dort weit genauer bewertet werden als im Labor.

9.7.5.3 Eindringtiefe

Für die Hydrophobierung von mineralischen Baustoffen hat die WTA Arbeitsgruppe 3.17 (WTA 2010) präzisere Anleitungen zur Angabe von Eindringtiefe und Anwendungszeit (Benetzungszeit) herausgegeben. Die wichtigsten Aussagen sind nachfolgend zusammengefasst.

Ausgehend vom w -Wert ($\text{kg/m}^2\text{h}$) kann die erforderliche Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels mit Hilfe der in Bild 115 gezeigten linearen Abhängigkeit ermittelt werden. Es gelten jedoch folgende Randbedingungen:

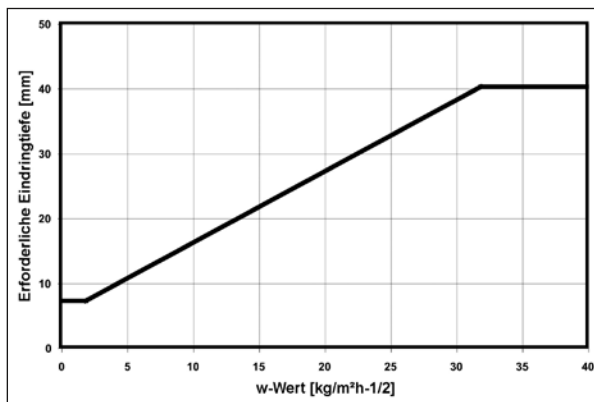


Bild 115: Diagramm zur Ermittlung der erforderlichen Eindringtiefe aus dem w -Wert (WTA 3.17, 2010)

Eine Hydrophobierung ist normalerweise nicht erforderlich, wenn der w -Wert kleiner als $0,5 \text{ (kg/m}^2\text{vh)}$ beträgt. Eine allgemein gültige Regel gibt es diesbezüglich aber nicht. Es ist zu berücksichtigen, ob zum Beispiel eine oberflächliche Abwitterung vorliegt, die mit Hilfe einer Hydrophobierung unterbunden werden kann, oder ob das betreffende Bauteil stark dem Regen ausgesetzt ist.

Die Mindesteindringtiefe beträgt bis zu einem w -Wert von $2 \text{ (kg/m}^2\text{vh)}$ immer 7 mm . Damit ist sichergestellt, dass die wasserabweisende Wirkung nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Porenraum vorhanden ist. Eine größere Eindringtiefe als 40 mm ist nicht nötig, weil w -Werte größer als $30 \text{ (kg/m}^2\text{vh)}$ bei Gesteinen kaum realisiert sein dürften.

Neben der geforderten Eindringtiefe interessieren den Anwender jedoch vor allem die Auftragsmenge (L/m^2) und die Applikationszeit (Benetzungszeit). Beide Werte sind vom Porenvolumen des Baustoffs und vom w -Wert abhängig. Diese beiden Größen müssen also bekannt sein, um die gewünschten Angaben machen zu können. Wie die WTA-Arbeitsgruppe vorschlägt, muss der Deutlichkeit halber zwischen hoher und mittlerer Saugfähigkeit unterschieden werden. Besondere Beachtung verdient der Hinweis, dass der für Wasser ermittelte w -Wert von dem Aufnahmekoeffizienten für das Hydrophobierungsmittel abweichen kann.

Beispiel hohe Saugfähigkeit

Aus Bild 116 a liest man zunächst mit Hilfe der vorher bestimmten Eindringtiefe (vgl. Bild 115) und der bekannten Porosität die dazugehörige Auftragsmenge ab. (Der Bereich der Mindesteindringtiefe von 7 mm ist hervorgehoben.) Mit dieser Größe geht man in das Bild 116 b und leitet aus dem Schnittpunkt mit der passenden w -Wert-Kurve die erforderliche Benetzungszeit ab. Der Bereich bis 200 s ist farblich unterlegt. Diese Zeit von rund drei Minuten ist in der Praxis realistisch für einen Nassauftrag mit einem flüssigen Hydrophobierungsmittel. Sind längere Anwendungszeiten erforderlich, so kann auf Kompressenanwendung oder Hydrophobierungscremes zurückgegriffen werden.

Beispiel: Aus Bild 115 ergibt sich für $w = 10 \text{ (kg/m}^2\text{vh)}$ die geforderte Eindringtiefe 15 m . Wechsel zu Bild 116 a. Bei 20 Vol.-% Porosität wird die Auftragsmenge von 3 L/m^2 bestimmt. Wechsel in das zweite Diagramm. Auftragsmenge 3 L/m^2 und Schnittpunkt mit der Kurve $w = 10 \text{ (kg/m}^2\text{vh)}$ ergibt die Benetzungszeit 325 s . Diese Anwendungsdauer ist für einen Nassauftrag nicht geeignet.

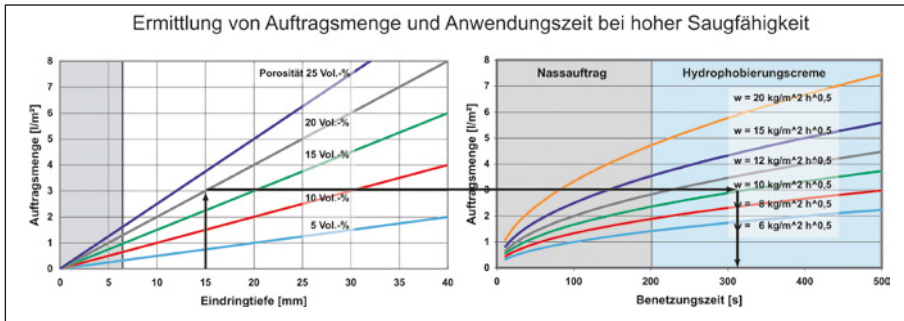


Bild 116a (links) und 116b (rechts): Ermittlung von Auftragsmenge und Anwendungszeit (Benetzungszeit) bei hoher Saugfähigkeit; zum Anwendungsbeispiel siehe Erläuterungen im Text

Beispiel mittlere Saugfähigkeit

Die Vorgehensweise ist analog zu der bei hoher Saugfähigkeit.

Beispiel: Aus Bild 115 resultiert bei einem w -Wert 5 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$) die Eindringtiefe 10 mm. Wechsel in Bild 117 a. Der Eindringtiefe von 10 mm ist bei einer angenommenen Porosität von 10 Vol.-% eine Auftragsmenge von 1 L/m^2 zugeordnet. Wechsel in die Bild 117 b. Für die Auftragsmenge 1 L/m^2 und den Schnittpunkt mit der Kurve $w = 5$ ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$) ergibt sich eine Benetzungszeit von 150 s. Dieser Wert ist für den Nassauftrag geeignet.

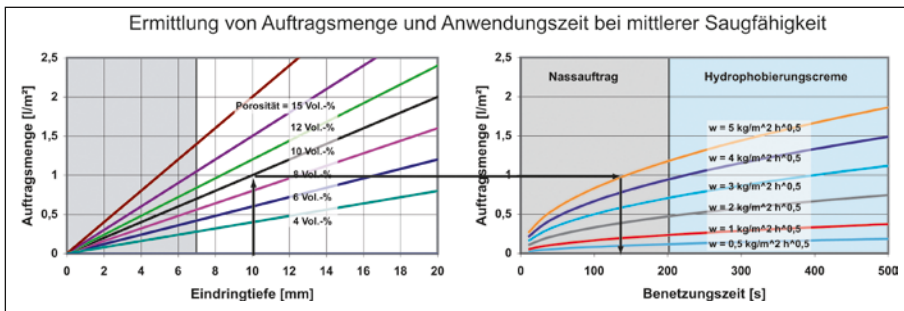


Bild 117a (links) und 117b (rechts): Ermittlung von Auftragsmenge und Anwendungszeit (Benetzungszeit) bei mittlerer Saugfähigkeit; zum Anwendungsbeispiel siehe Erläuterungen im Text

9.7.5.4 w -Wert, B -Wert (ISO 15148; DIN EN 1925; EN 15801)

Der Wasseraufnahmekoeffizient w und der Eindringkoeffizient B können gleichzeitig in einer Messung bestimmt werden. Als Anforderung gilt, dass der w -Wert nach der Hydrophobierung kleiner als $0,1 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}$ ist und keine sichtbare Durchfeuchtung des Gesteins zu erkennen ist.

Es wird eindringlich dazu geraten, die Gewichtszunahme der Probe grafisch aufzutragen, um Unregelmäßigkeiten im Kurvenverlauf zu erkennen. Nicht alle Hydrophobierungsmittel bleiben über den gesamten Messzeitraum von 24 oder besser 48 Stunden wirksam. Häufig kommt es vor, dass bestimmte Produkte die kapillare Wasseraufnahme nur anfangs ausreichend reduzieren, dass sie aber nach einer bestimmten Zeit wirkungslos werden, sodass am Ende des Versuchs die Wasseraufnahme genauso hoch liegt wie bei den nicht behandelten Gesteinsproben.

9.7.5.5 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (ISO 12572; EN 15803)

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ ist an Bohrkernscheiben zu bestimmen, die vollständig getränkt sind und geeigneter Weise von den behandelten Bohrkernen entnommen sind. Eine Zunahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wird nicht vermeidbar sein, jedoch sollte sie eine Größenordnung von 20% nicht überschreiten.

So wünschenswert die Einhaltung des 20%-Kriteriums auch immer ist, so stellt doch die Zunahme des Wasserdampfdiffusionswiderstands für sich allein genommen keinen absoluten Maßstab dar. Aus dem Porenraum muss ja nur so viel Wasser durch Diffusion entweichen, wie vorher kapillar aufgenommen worden ist. Bei entsprechend niedrigem Wasseraufnahmekoeffizienten w kann sich so trotz zum Teil erheblicher Reduktion der Wasserdampfdiffusion in der Gesamtheit eine Verbesserung der Situation ergeben. Maßgebend für die Gefahr einer Feuchteakkumulation im Inneren sind deshalb nicht der w -Wert allein, sondern der s_d -Wert und die Künzel-Zahl (vgl. Arbeitsschritt 9.6).

9.7.5.6 Hygrische Längenänderung α_{hy}

Die hygrische Dehnung ist eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Schadensanfälligkeit von Gesteinen. Wird durch eine Behandlung die hygrische Dehnung nach Betrag und Geschwindigkeit reduziert, so bedeutet das eine Risikominderung gegenüber künftigen Schäden. Gerade bei Hydrophobierungsmitteln ist es wichtig, diese Kenngröße zu bestimmen, da manche dieser Stoffe die Feuchtedehnung erhöhen. Da die Feuchtedehnung sowohl im hygroskopischen als auch im überhygroskopischen Bereich auftritt, muss in beiden Bereichen gemessen werden. Als Anforderung wird gestellt, dass keine Zunahme gegenüber dem unbehandelten Gestein auftritt. Zur Durchführung der Messungen wird auf SNETHLAGE & WENDLER (1996) hingewiesen.

9.7.5.7 Mikrobiologische Beständigkeit

Sofern über die Beständigkeit der in Frage kommenden Mittel gegenüber mikrobiologischem Befall noch keine Erkenntnisse vorliegen, sollte die Notwendigkeit derartiger Untersuchungen unter der Beteiligung eines Mikrobiologen eingehend beraten

werden. In diesem Zusammenhang interessiert aber nicht nur die strukturelle Resistenz des Stoffes gegenüber einem mikrobiologischen Angriff, sondern auch die Frage, inwieweit bei einem oberflächlichen Nachlassen der Hydrophobierung das Wachstum von Mikroorganismen gefördert wird. Da die dünne, nicht mehr hydrophobe Oberflächenschicht bei jedem Niederschlag von Regen oder Tau schnell mit Wasser gesättigt ist (da dieses nicht nach innen abgesaugt wird), kann es zu einer intensiveren Grünfärbung durch Algenwachstum kommen. Für weiterreichende Informationen wird auf STERFLINGER (2011b) verwiesen.

9.7.6 Ziel der Untersuchungen

Der abschließende Laborbericht soll die Wirksamkeit der angewendeten Mittel im Vergleich unbehandelt – behandelt darstellen und zwei, höchstens drei Hydrophobierungsmittel für die weitere Erprobung an der Musterfläche festlegen.

9.8 Natursteinaustausch

9.8.1 Allgemeines

Die Auswechslung geschädigter Werksteine ist die klassische Methode der Instandsetzung, die vor allem von den Dombauhütten heute noch in großem Stil durchgeführt wird. Aus Sicht der Denkmalpflege stellt ein umfangreicher Austausch eine Verfälschung des originalen Zustands dar, indem ein Bauwerk mit der Zeit sozusagen ein zweites Mal errichtet wird. Diese Sichtweise beleuchtet aber nur die eine Seite des Problems. Denn die Tatsache, dass die betreffenden Bauteile einer Kathedrale vielleicht erst wieder in 30 oder gar 50 Jahren eingerüstet werden, zeigt die ungeheure Tragweite der den Dombaumeistern abverlangten Entscheidungen. In Anbetracht der bislang immer noch unzulänglichen Kenntnisse über die Dauerhaftigkeit von Konservierungsmaßnahmen erscheint es deshalb gerechtfertigt, der traditionellen Methode der Steinauswechslung den Vorzug zu geben, immer vorausgesetzt, dass mit Gesteinsmaterial sehr guter Qualität gearbeitet wird, das optisch dem Original gut angepasst ist.

Nicht vergessen werden darf bei dieser Frage aber auch, dass die Dombauhütten eine wichtige Funktion in der qualifizierten Ausbildung und Traditionspflege im Steinmetzhandwerk erfüllen, die auch im Interesse der Denkmalpflege fortgeführt werden muss. Außerdem gehen Dombauhütten heute sehr sorgfältig mit der Originalsubstanz um, indem sie jeden noch funktionstüchtigen Werkstein erhalten, und den Austausch auf diejenigen Stücke beschränken, die bereits so stark zerstört sind, dass sie ihre Aufgabe im Mauerwerksgefüge nicht mehr erfüllen. Zu Steinaustausch und »Vierungen« siehe auch Kap. 11.1.3.

9.8.2 Auswahl der Gesteine

Soweit die Brüche des Originalgesteins nicht bekannt sind, soll zunächst in Archiven nach seiner Herkunft gesucht werden. Wenn die Brüche noch in Betrieb sind, empfiehlt es sich im Regelfall, dieses Gestein auch wieder für Austausch Zwecke zu verwenden, soweit seine mineralogischen, feuchtetechnischen und mechanischen Eigenschaften keine gravierende Verwitterungsanfälligkeit erkennen lassen. Ist das Originalgestein nicht mehr verfügbar, ist man gezwungen, ein geeignetes Ersatzgestein zu finden, das in Farbe und Struktur dem Originalgestein möglichst nahe kommt. Man sollte mehrere Gesteine in die Auswahl einbeziehen, um mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen das am besten passende zu bestimmen. Diese Auswahl darf nicht allein auf optischen Kriterien beruhen, da unterschiedliche Gesteinseigenschaften an den Grenzflächen zu beträchtlichen Schäden führen können.

Allerdings macht es auch keinen Sinn, in ein Mauerwerk aus anfälligem Gestein vereinzelte, neue Quader aus einem völlig inerten und regional fremden Gestein zu setzen. Wenn immer möglich, sollte der regionale Bezug mit Priorität berücksichtigt werden. Gesteine aus exotischen Ländern, auch wenn sie preislich noch so günstig sind, sollten nicht in Betracht gezogen werden, da nicht garantiert werden kann, dass sie nach Jahren noch im Handel sind. In vielen Fällen hat es sich als hilfreich erwiesen, das gleiche Steinmaterial zu wählen, das bei früheren Austauschmaßnahmen schon einmal verwendet wurde, sodass die aktuellen Maßnahmen in einen historischen Bezug gestellt werden.

Die grüne, rote oder ocker Färbung von Sandsteinen ist an Tonminerale gebunden, in welche feinste Eisenoxidpigmente eingestreut sind. Überschreitet der Tonmineralgehalt ein bestimmtes Maß, welches zusätzlich durch die Porengrößen und die Kornverzahnung beeinflusst wird, so resultiert daraus immer ein feuchttempfindliches und verwitterungsanfälliges Gestein. So kann man nicht erwarten, ein grünes, verwitterungsresistentes Ersatzgestein für einen Schilfsandstein zu finden, weil die grüne Färbung immer an Tonminerale gebunden ist, welche dem Gestein schlechte Verwitterungseigenschaften verleihen. In derartigen Fällen kann man nur einen Kompromiss machen und dasjenige Gestein auswählen, das die vergleichsweise besten Eigenschaften aufweist.

9.8.3 Untersuchungsmethoden

Die Kriterien, mit denen die Verträglichkeit von Alt- und Neugestein beurteilt werden kann, sind:

- Struktur: grob – mittel – feinkörnig; eventuelle Textur beachten
- Gefüge: Grenzen die Mineralkörner aneinander (korngestütztes Gefüge) oder sind sie durch ein Bindemittel getrennt (Matrix gestütztes Gefüge)?

- Mineralbestand: Besondere Aufmerksamkeit ist auf die Art des Bindemittels zu legen (z. B. carbonatische oder tonige Bindung), aber auch auf den Zustand der Feldspäte.
- Porositätsklassen:
hoch (> 20 Vol.-%)
mittel ($20\text{--}10$ Vol.-%)
niedrig (<10 Vol.-%)
- Porenradienverteilungsklassen:
Porenradienmaximum im Bereich der Grobporen $> 50\text{ }\mu\text{m}$
Porenradienmaximum im Bereich der Mittelporen $50 \dots 1\text{ }\mu\text{m}$
Porenradienmaximum im Bereich der Feinporen $< 1\text{ }\mu\text{m}$
- w-Wert-Klassen:
gering saugend: $w < 0,5\text{ kg/m}^2\text{Vh}$
mittel saugend: $w = 0,5 \dots 3,0\text{ kg/m}^2\text{Vh}$
stark saugend: $w > 3,0\text{ kg/m}^2\text{Vh}$
Müssen beanspruchte Bauteile wie Gesimse, Kreuzblumen, Balustraden etc. ausgetauscht werden, die original aus stark saugenden Werksteinen bestehen, so sollte als Neugestein ein gering oder mittel saugendes Gestein gewählt werden.
- B-Wert-Klassen:
Der B-Wert ist keine unabhängige Größe; er folgt aus dem w-Wert und der wasserzugänglichen Porosität. Liegt der B-Wert des Originalgesteins jedoch sehr hoch (etwa $B > 5,0\text{ cm/Vh}$), dann sollte man nicht zögern, ein dichteres Ersatzgestein zu wählen.
- s-Wert:
Der Sättigungswert sollte immer $< 0,70$ sein.
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl:
 μ (wet und dry cup) ± 10 (absolute Einheiten des Originalgesteins)
- Druckfestigkeit und E-Modul: 80 bis 120 % des Originalgesteins.

Das Neugestein sollte bei jeder der Eigenschaften in derselben Klasse liegen wie das Originalgestein. Die genannten Parameter gestatten es, neben der Kompatibilität auch die »Patinierung« des Gesteins abzuschätzen. Im Vergleich zum Originalgestein zu stark saugende, im zeitlichen Mittel feuchtere Quader werden schneller biologisch besiedelt, verschmutzen schneller und stellen deshalb im Mauerwerk bleibende Fremdkörper dar. In welchen Grenzen die Eigenschaften voneinander abweichen dürfen, kann nicht absolut gesagt werden. Es ist deshalb besser, sich an Eigenschaftsklassen wie oben gezeigt zu halten als zu strikt auf absolute Zahlenwerte fixiert zu sein. STEINDLBERGER (2010) hat am Beispiel des Alten Turms in Mettlach mit Hilfe des genannten Kriterienkatalogs passende Ersatzgesteine für das Originalgestein des Turms ermittelt.

9.8.4 Anastylose

Bei der Anastylose werden die vor Ort liegenden Steinblöcke verwendet, um ein Objekt in Teilen oder fast zur Gänze wieder erstehen zu lassen. Vorausgegangen ist meist ein Erdbeben oder eine mutwillige, feindliche Zerstörung. Die Anastylose ist eine beliebte Methode in der Archäologie, um dem Besucher einer Ausgrabungsstätte einen Eindruck vom Aussehen und der Großartigkeit der zerstörten Bauten zu vermitteln. So sind die Säulen des Poseidontempels in Kap Sunion oder die des Apollontempels in Delphi Beispiele für eine Anastylose. Auch die Frauenkirche in Dresden kann in gewisser Hinsicht als eine solche angesehen werden, wenn auch die Zahl der wiederverwendeten Gesteinsblöcke sehr gering ist.

Im Vorfeld einer Anastylose ist zunächst zu untersuchen, ob die verfügbaren Blöcke sich zu einem harmonischen Gesamteindruck verbinden lassen und ob sie noch die erforderlichen Materialqualitäten aufweisen. Bei Säulen und Mauerwerk ist hier vor allem die Druckfestigkeit, aber bei Architraven auch die Biegezugfestigkeit zu bestimmen.

Die Flächen der verwendbaren Steinblöcke weisen nur in seltenen Fällen eine ebene Form auf. Die Teile können also nicht ohne weiteres aufeinandergesetzt werden. Die Vierungen oder Antragungen mit Restauriermörtel müssen ebenfalls die nötigen Festigkeitswerte aufweisen, die zum Errichten des Bauwerks nötig sind. Wenn man alle Originalsubstanz retten will, können die Antragungen in Gestalt eines »Inlays« ausgeführt werden, das aber auf alle Fälle verankert werden muss (siehe Kapitel 9.4 und 11.1.7). Neuteile aus Naturstein sind so auszuwählen, dass sie in Optik und in Materialeigenschaften dem Original möglichst nahe kommen, jedoch immer noch als Neuteile erkennbar sind.

Für die Anker zwischen den Trommeln einer Säule sind Edelstahlanker zu verwenden, die keinesfalls fest eingegossen werden dürfen. Viel besser geeignet ist ein Steckverbund, der wieder gelöst werden kann, ohne das Gestein zu beschädigen.

9.9 Mikrobiologische Prüfungen

9.9.1 Allgemeines

In der folgenden Betrachtung geht es weniger um die ästhetische Beeinträchtigung, die der Betrachter beim Anblick von schwarz oder grün verfärbten Denkmälern empfinden mag. Eine optische Beeinträchtigung kann jedoch niemals ein quantitativer Maßstab sein, und ist aus diesem Grund strikt vom Problem des tatsächlichen physikalischen und chemischen Angriffs auf die Gesteinssubstanz zu trennen, die hier im Mittelpunkt der Erörterung stehen soll.

Der Einfluss von Mikroorganismen auf den Steinzerfall ist im Einzelfall und mit statistischen Auswertungen vielfach bestätigt und untermauert worden. Informative Überblickartikel, die einen Einstieg in weiterführende Literatur vermitteln, sind von BOCK & FAHRIG (1993); BOCK et al. (1994, 1996); KRUMBEIN et al. (1992); WARSCHIED et al. (1992) und STERFLINGER (2011a) verfasst worden. Auf chemischem Wege greifen Mikroorganismen das Gestein durch die Bildung starker anorganischer (Stichwort »Nitrifikanten«) oder organischer Säuren (Essigsäure, Oxalsäure) an. Vielleicht noch wichtiger sind die Einflüsse der Mikroorganismen auf den Feuchtehaushalt, indem sie durch ihre Fähigkeit, biologische Schleimfilme auszubilden, die Sorption von Schadgasen und die Fixierung von Stäuben fördern und durch die Verstopfung von Poren die Trocknung behindern.

Besonders wichtig ist die Rolle der Mikrobiologie im Bereich von Stallungen und mit Fäkalien belasteten Mauern, da alle dort gefundenen Nitrate durch die Aktivität von Mikroorganismen gebildet worden sind. Nach der primären Besiedlung der Gesteine durch Bakterien folgen in späteren Stadien höhere Organismen wie Pilze, Algen und Flechten nach, die sich durch Farbveränderungen der Gesteinsoberflächen zu erkennen geben. Über die Beteiligung von Mikroorganismen bei der Entstehung von Schmutzkrusten (sogenannte Feucht- und Trockenkrusten) ist bereits unter Arbeitsschritt 6.4 berichtet worden. Bild 118 bietet ein instruktives Beispiel des Auftretens und Aussehens solcher Krusten [siehe insbesondere NEUMANN (1994)].



Bild 118: Feucht- und Trockenkruste auf Sandstein an der Kirche Sankt Moriz in Coburg

Anders als von vielen Seiten vermutet, ist die Besiedlung mit Moosen und Flechten keine unbedingte Gefahr für das Gestein [Pick et al. (2002)]. Moose besitzen keine echten Wurzeln, sondern nur Haftwurzeln, mit denen sie sich im Porenraum festhalten. Sie scheiden keine Stoffe aus und schädigen das Gestein nicht. Flechten, eine Symbiose aus Pilzen und Algen, besitzen Wurzeln, mit denen sie oberflächlich in das Gestein eindringen und die Körner an der Oberfläche unterwandern. Sie lockern somit das Gefüge und stellen in gewissen Graden eine Gefahr für das Gestein dar. Diese Aussage trifft jedoch nicht auf alle Arten von Flechten zu. Es gibt auch solche, die nur auf der Oberfläche, zum Beispiel von dichten Kalken sitzen, ohne dass die Hyphen in die Gesteinsmatrix eindringen. Besteht der Wunsch, die Flechten zu entfernen, sollte in Betracht gezogen werden, dass die Entfernung der Flechten einen größeren Schaden anrichten kann als deren Belassen, weil zugleich mit den Flechten die obersten Kornlagen des Gesteins mit entfernt werden. Auch sollte man sich vor einer Maßnahme bei Experten versichern, ob die betreffende Flechtenart nicht geschützt ist, und außerdem bedenken, dass Flechten auch einen Schutz gegen starke Durchfeuchtung darstellen.

9.9.2 Prüfeempfehlungen der VDI Richtlinie 3798 (Auswahl)

Mikrobiologische Untersuchungen können sich auf alle Bereiche der Konservierung erstrecken. Wegen ihres Gefährdungspotentials ist es erforderlich, das Wachstum der Mikroorganismen so weit wie möglich einzudämmen. In diesem Sinne müssen natürlich auch die verwendeten Konservierungsmittel wirken, wobei als Mindestanforderung gelten muss, dass sie keinen Nährboden für das Wachstum von Mikroorganismen darstellen und durch mikrobiologischen Angriff ihre Wirksamkeit nicht verlieren.

In der VDI Richtlinie 3798 sind die wichtigsten Prüfungen zur Beurteilung mikrobieller Belastung wie folgt benannt:

- Identifizierung von Mikroorganismen, z. B. Moose, Pilze, Flechten, Algen, Cyanobakterien, Bakterien, Aktinomyzeten
- Analyse von organischen Säuren, z. B. Essigsäure, Zitronensäure, Oxalsäure, Gluconsäure, Lichensäuren, chelatisierende Mono- und Dicarbonsäuren, flüchtige Fettsäuren
- Keimzahlbestimmungen auf verschiedenen Nährmedien
- Bestimmung biogener Mineralsäuren z. B. Kohlensäure, Salpetersäure, Schwefelsäure, Schwefelwasserstoffsäure
- Analyse von z. T. den Werkstoff beeinträchtigenden organischen Substanzen, z. B. Chlorophyll und Chlorophyllderivate, Proteine, DNA, Zucker, insbesondere Polysaccharide, organische Pigmente
- Analyse und Bestimmung von Nährstoffen und sekundären Stoffwechselprodukten
- Bestimmung eventueller Schutzfunktionen der biogenen Patina, z. B. durch Flechten

Ohne im Besonderen auf die Testreihen einzugehen, sollte eine mikrobiologische »Unbedenklichkeitsprüfung« bei kontaminierten Objekten und bei der Markteinführung von Produkten in jedem Fall vorgenommen werden. Diese Empfehlung schließt demnach alle Konservierungsmittel ein, die organische Substanzen enthalten oder im Verlauf der Polymerisierung abspalten, da sie das Wachstum der Mikroorganismen fördern können. Dabei sollten die Tests am besten mit dem am Objekt vorgefundenen Spektrum von Mikroorganismen durchgeführt werden. Da die Tests sehr zeitaufwendig sind, ist eine frühzeitige Planung unerlässlich.

PETERSEN et al. (2018) haben die Bestimmungsmöglichkeiten der verschiedenen mikrobiologischen Spezies ausführlich dargelegt. Sie weisen besonders darauf hin, dass zunächst die Unterscheidung wichtig ist, ob man es mit lebenden oder toten Biofilmen zu tun hat. Chlorophyll-führende Arten zeigen im UV-Licht eine typische Fluoreszenz, die von vertrockneten Spezies nicht abgegeben wird. Vertrocknete Organismen können aber durch Feuchtigkeit erneut belebt werden, sodass dann die Fluoreszenz wieder erscheint.

Es gibt noch eine Reihe anderer Anfärbemethoden, bei denen die Zellwände oder Nukleinsäuren reagieren und deren Fluoreszenzen nach Anregung mit UV-Licht im roten Bereich des Lichtspektrums erkannt werden können. Für solcherart Nachweise, die jedoch nicht artspezifisch sind, wird ein UV-Mikroskop mit entsprechenden Rotlichtfiltern benötigt. Das Feld mikrobiologischer Untersuchungsmethoden ist eine ganze Wissenschaft für sich und kann deshalb hier nur grob umrissen dargestellt werden. Wenn Untersuchungsbedarf besteht, ist in jedem Fall der Rat eines Fachlabors einzuholen.

Biozide Behandlungen werden von den meisten Mikrobiologen grundsätzlich abgelehnt, weil es sich um Umweltgifte handelt. Da diese biologisch abbaubar sein müssen, ist ihre Wirksamkeit zeitlich sehr kurzfristig. Grüne Algenbeläge z. B. wachsen sehr schnell wieder nach, sobald der biozide Effekt nachlässt. Als Schutz vor der Besiedlung durch Algen oder Pilze propagieren manche Wissenschaftler den Einsatz von dünnen Messing- oder Bronzedrähten. Das in geringen Mengen im Ablaufwasser gelöste Kupfer verhindert das Wachstum von Mikroorganismen, sodass die gespülten Flächen sauber erscheinen. Der Effekt ist z. B. auf vielen Grabsteinen mit Bronzebuchstaben zu beobachten. Als großflächiger Schutz ist diese Methode aber wenig geeignet.

9.10 Abschließende Bemerkungen zu den Laboruntersuchungen

9.10.1 Finanzieller Nutzen von Laboruntersuchungen

Auch wenn die Kosten für Laboruntersuchungen aus Sicht des Bauherrn auf den ersten Blick als unnötig verausgabtes Geld erscheinen mögen, werden sie sich auf lange Frist immer auszahlen. Dies wird sich mit Sicherheit schon bei der Ausführung zeigen, da wegen der gründlichen Vorbereitung unnötige Arbeiten entfallen und damit Kosten eingespart werden können. In der Zukunft werden durch die bessere Qualität Bauschäden vermieden und die Reparaturphasen hinausgezögert.

Im Ablauf der Voruntersuchungen sind die beschriebenen Laboruntersuchungen nötig, um diejenigen Konservierungsmethoden herauszufinden, welche die beste Aussicht auf Erfolg haben und welche dann an einer Musterfläche erprobt werden können. Damit die Musterfläche nicht zu groß wird und die Untersuchungen am Objekt nicht ins Uferlose wachsen, müssen die zur Auswahl stehenden Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden mit Hilfe der Voruntersuchungen im Labor bereits vorher auf einige wenige eingegrenzt werden.

Ein weiterer wichtiger Grund für die Laboruntersuchungen ist die Aufstellung der Beurteilungskriterien, nach denen der Erfolg oder Misserfolg einer Konservierungsmethode bewertet werden kann. Geeignete Parameter sind für jede in Frage kommende Maßnahme in den Tabellen 1–14 aufgeführt. Es wurde bereits weiter oben erläutert, dass aus den zur Auswahl stehenden Untersuchungsmethoden die für die Fragestellung wirklich relevanten Parameter ausgesucht werden müssen, sodass bei geschickter Wahl Untersuchungskosten eingespart werden können.

9.10.2 Begrenzung der Probenanzahl

Für die Durchführung der Laboruntersuchungen sind, auch wenn dies für Denkmalpfleger noch so bedauerlich erscheinen mag, Proben erforderlich. Bevor aber mit der Entnahme von Bohrkernen begonnen wird, sollte man klären, ob sich nicht geeignete Quader in einem nahe gelegenen Steinbruch oder von einem anderen Mauerstück finden lassen, damit das Denkmal geschont werden kann. Scheidet diese Möglichkeit aber aus, dann müssen die Bohrkern an möglichst unsichtbaren Stellen oder von Quadern entnommen werden, deren Auswechslung im Zuge der Maßnahmen unumgänglich erscheint. Die Anzahl der Bohrkern oder sonstiger Proben ist auf das nötigste Minimum zu beschränken und der Durchmesser der Kerne ist so gering wie möglich zu halten.

Untersuchungen zur Feuchte-Salz-Belastung, von Mörteln, mikrobieller Besiedlung und Verwitterungsprofilen (Festigkeitsprofile) müssen aber, unabhängig von der

Verfügbarkeit von Parallelgestein, in jedem Fall am Objektmaterial ausgeführt werden und erfordern deshalb immer eine Probenentnahme. Die hinteren Abschnitte der Kerne sind aufzubewahren, um damit die Bohrlöcher wieder verschließen zu können.

9.10.3 Laboruntersuchungen erhöhen die Planungssicherheit

Laboruntersuchungen verursachen zunächst einmal Kosten, die auf den ersten Blick überflüssig erscheinen mögen. Im Verlauf des Projekts werden sie sich aber als unverzichtbare Voraussetzung für einen störungsfreien Ablauf der Arbeiten erweisen. Die Gefahr, durch unliebsame Überraschungen aus der Planung geworfen zu werden, sinkt beträchtlich, insbesondere wenn die Untersuchungen mit einem ausreichenden zeitlichen Vorlauf abgewickelt werden können.

9.10.4 Das Konzept Risikoziffer

Das System »Risikoziffer« stellt eine Methode dar, aus vorliegenden Messwerten, wie sie zum Beispiel durch die hier beschriebenen Untersuchungen gewonnen wurden, das Risiko zu ermitteln, dem das betreffende Objekt ausgesetzt ist, weiteren irreparablen Schaden zu nehmen. Es ist bis jetzt für Skulpturen entwickelt, könnte aber auch auf alle anderen Arten von Einzelobjekten angewendet werden.

Wie wir gesehen haben, werden Konservierungsmaßnahmen an Denkmälern in einem Diskurs zwischen Eigentümer, Denkmalpfleger, Restaurator und Fachgutachter besprochen und entschieden. Die in Fachgutachten vorliegenden Ergebnisse bilden die Grundlage zur Entscheidungsfindung. Für die Diskussion und Entscheidungsfindung werden aber die messtechnisch gewonnenen Befunde in eine sprachliche Form umgesetzt, die sich subjektiver Formulierungen wie »gering/stark in Mitleidenschaft gezogen« oder »wenig/höchst gefährdet« bedient. Auf diese Weise geht der messtechnische, objektive Befund der Zustandserfassung verloren und wird durch eine subjektive Bewertung ersetzt.

Das Ziel der Risikoziffer vor diesem Hintergrund ist, die quantitativen und objektiven Messwerte in den Gutachten so umzuformen, dass sie als Zahlenwerte in der Auswertung erhalten bleiben und dass subjektive Bewertungen vermieden werden. Dies geschieht durch die konsequente Nutzung der in den Fachgutachten vorliegenden, messtechnisch erfassten Befunde.

Formal ist die Definition der Risikoziffer an die allgemeine Definition für Risiko angelehnt, wie sie auch in der Versicherungswirtschaft Anwendung findet. Die Risikoziffer $R(i)$ ist definiert als das Produkt aus einer Messwertzahl $M(i)$ und einer Bewertungszahl $B(i)$:

$$R(i) = M(i) \cdot B(i)$$

Die **Messwertzahl** $M(i)$ drückt den Messwert eines Parameters (i) in Form einer dimensionslosen Zahl aus. Diese wird entweder durch Normierung auf einen Ausgangszustand des Materials berechnet oder sie bildet einen Messwert, der nicht auf einen Ausgangszustand bezogen werden kann, in Form einer Zahl zwischen Null und Eins ab. Vier Beispiele sollen die Umformung von Messdaten in die normierte Messwertzahl verdeutlichen:

- Normierung durch direkten Bezug auf einen Ausgangszustand:
Beispiel: Ultraschallgeschwindigkeit (US):

$$M(US) = [vp(i) - vp(o)] / vp(o)$$

$vp(i)$ = Ultraschallgeschwindigkeit am Messpunkt

$vp(o)$ = Ultraschallgeschwindigkeit im unverwitterten Zustand

- Normierung durch Bezug auf Gesamtoberfläche
Beispiel: Relative Oberfläche (OF).

Die von einer Verwitterungsform betroffene Oberfläche $OF(i)$ wird in Bezug zur Gesamtoberfläche $OF(ges)$ gesetzt.

$$M(i) = OF(i) / OF(ges)$$

- Normierung durch Skalierung einer Messgröße:
Beispiel : Niederschlag (NS):

> 1 000 mm/y:	$M(NS) = 1$
1 000 – 800 mm/y:	$M(NS) = 0,7$
800 – 600 mm/y:	$M(NS) = 0,5$
< 600 mm/y:	$M(NS) = 0,3$

- Normierung bei Ja-Nein Bezügen
Beispiel: Mechanische Schäden an Skulpturen

Hand unbeschädigt = 0

Hand abgeschlagen = 1

In allen genannten Fällen ist die Messwertzahl $M(i)$ eine Zahl zwischen Null und Eins.

$M(i) = 0$ bedeutet kein Risiko, $M(i) = 1$ bedeutet maximales Risiko des betreffenden Parameters.

Die **Bewertungszahl** $B(i)$ gibt an, als wie wirkmächtig der betreffende Parameter (i) für die Verwitterung und die Schadensgefährdung einzustufen ist. Die Bewertungszahl $B(i)$ ist für die Berechnung vorgegeben und wird nicht verändert. Sie kann zwischen den Zahlen Null und Zehn variieren. Ihr Zahlenwert ist durch intensive Beratungen mit den erfahrenen Mitgliedern des DBU-Projekts »Risikoziffer« festgelegt worden.

Alle Zahlen des Systems Risikoziffer sind dimensionslos. Mit dem beschriebenen Konzept ist es möglich, die quantitativen und objektiven Aussagen der Messwerte zu erhalten. Für die Berechnung der Gesamt-Risikoziffer für eine Skulptur werden 104 verschiedene Parameter (i) verwendet. Für jeden dieser Parameter wird eine gesonderte Risikoziffer $R(i)$ berechnet. Die 104 Risikoparameter sind in zehn Excel-Datenblättern sortiert, die nach Themengebieten geordnet sind:

1. Objektinformation
2. Kunsthistorische Bewertung
3. Restaurierungsgeschichte
4. Umwelt/ Exogene Risikofaktoren
5. Naturstein/ Endogene Risikofaktoren. Getrennt für Marmor und Sandstein
6. Gefahr durch Menschen/ Vandalismus
7. Mechanische Schäden/ Materialverlust
8. Veränderungen der Oberfläche
9. Ultraschalldiagnostik
10. Gesamtbewertung Gesamt-Risikoziffer

In den Rechenprozess gehen nur die Datenblätter 3 bis 10 ein. Es brauchen nur die zuvor berechneten Messwertzahlen $M(i)$ in die betreffende Spalte eingetragen zu werden. Die gesamte Berechnung erfolgt bis in die Gesamtauswertung automatisch. Die Verlinkungen dürfen nicht verändert werden. Zunächst wird für jedes Datenblatt eine Risikoziffer $R(\text{Datenblatt})$ mit Hilfe der darin enthaltenen Parameter (Teilrisiko $R(i)$) gebildet.

$$R(\text{Datenblatt}) = \text{Summe } R(i) / \text{Summe } B(i)$$

Durch die Normierung auf das Höchstisiko, das gleichbedeutend mit Summe $B(i)$ ist, wird auch die Risikoziffer jedes Datenblatts immer eine Zahl zwischen null und eins. Das Höchstisiko ergibt sich dann, wenn alle $M(i) = 1$ sind, was dann gleich der Summe aller $B(i)$ des Datenblatts entspricht.

Für die Gesamtbewertung werden die Risikoziffern der einzelnen Datenblätter addiert und anschließend der Mittelwert gebildet. Dieser stellt letztendlich die Gesamt-Risikoziffer $R(\text{ges})$ für das betreffende Objekt dar und ist ebenfalls eine Zahl zwischen null und eins. Null bedeutet kein Risiko, Eins das Höchstisiko.

$$R(\text{gesamt}) = \text{Summe } R(\text{Datenblätter}) / \text{Anzahl } n \text{ der Datenblätter}$$

Durch die rein rechnerische Umsetzung der Messwerte stellt die Risikoziffer eine objektive und quantitative Beurteilung des Schadenszustands und der Schadensgefährdung dar. Zusätzlich werden in dem System auch die sogenannten Höchstisikoziffern abgeleitet. Diese geben Hinweise auf besondere Gefahrenpunkte, die ein sofortiges Eingreifen erfordern. Als Höchstisikoziffer zählt jeder Parameter, dessen Messwertziffer $M(i)$ einen Wert $> 0,75$ erreicht. Auf dem letzten Excel Datenblatt, auf dem die Gesamt-Risikoziffer $R(\text{ges})$ berechnet wird, ist auch die Anzahl der Höchstisiken geordnet nach Datenblättern vermerkt, sodass man sofort den Überblick hat,

wo und wie viele Stellen es gibt, bei denen Sofortmaßnahmen entschieden werden müssen.

Das System Risikoziffer eignet sich besonders gut für die Risikoeinstufung von Skulpturen in einer Sammlung von Marmorskulpturen. Es stellt eine gute Entscheidungshilfe dar, welche der Skulpturen als erste behandelt werden sollten. Weitere Einsatzmöglichkeiten liegen beim Monitoring, indem man die Veränderung der Risikoziffer im Verlauf der Jahre verfolgt. Besonders interessant dürfte die Möglichkeit sein, die Veränderungen des Risikos durch Translozieren in den Innenraum zu berechnen. Wegen weiterer Informationen siehe Kapitel E4. Wer Interesse an einer Anwendung hat, möge sich wegen der Excel-Files an die Autoren wenden.

9.10.5 Zeitlicher Vorlauf

Der zeitliche Vorlauf darf nicht zu eng begrenzt werden. Wie bei allen Untersuchungen kann es auch hier geschehen, dass man mit der ersten Versuchsserie noch nicht die geeignete Lösung findet. Nachmessungen und möglicherweise weitere Modifizierungen von Konservierungsmitteln sind dann die Folge. Dies erfordert zusätzlich Zeit, die deshalb zur Sicherheit bei jedem Projekt eingeplant sein sollte. Als Grundregel kann man davon ausgehen, dass eine »Normalserie« von Laboruntersuchungen ein halbes Jahr in Anspruch nimmt. Mit der entsprechenden Sicherheit für einen zweiten Durchlauf wäre also in allen Fällen für die Voruntersuchungen ein Vorlauf von einem ganzen Jahr einzuplanen.

Auch wenn viele Projekte in einem kürzeren Zeitraum abgeschlossen werden können, so sollte man nicht meinen, dass der hier empfohlene zeitliche Vorlauf von einem Jahr überzogen wäre. Nicht in jedem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Versuchsablauf zügig und in kürzerer Zeit zum gewünschten Erfolg führt. Im Normalfall müssen immer einige experimentelle Details wiederholt oder nachgeschoben werden, sodass der genannte Zeitrahmen mit Sicherheit benötigt werden wird.

9.10.6 Wer kann Voruntersuchungen durchführen?

Die für die Steinkonservierung erforderlichen Untersuchungen können nur von einem Fachlabor ausgeführt werden, das entsprechend ausgerüstet und qualifiziert ist. Bei umfangreichen Aufgabenstellungen kann es unter Umständen von Vorteil sein, verschiedene Fachlabors in eine Arbeitsgemeinschaft zusammenzuführen.

Damit der Untersuchungsbericht der Gutachter auch tatsächlich die aufgeworfenen Fragen beantwortet, seien hier nochmals einige Anmerkungen im Vorfeld der Auftragsvergabe an das Fachlabor gemacht:

- Wurden Zweck und Ziele der Untersuchungen ausreichend genau definiert?
- Wurde ausreichend klargestellt, was mit Hilfe der Untersuchungen entschieden werden soll?
- Wurden alle für die Bearbeitung der Aufgabe wichtigen Unterlagen bereitgestellt?
- Hatte das Untersuchungslabor ausreichend Zeit, sich mit der Objektsituation vertraut zu machen?
- Wurde über ein Dokumentationsschema gesprochen, nach dem die Untersuchungsergebnisse eingeordnet werden sollen?

Diese – und durchaus noch weitere – selbstkritische Rückfragen werden mit Sicherheit helfen, dass der Untersuchungsbericht die erwünschten Anforderungen erfüllt, indem er die konkreten Vorgaben liefert, welche für die Erprobung der in die engere Wahl genommenen Schutzmittel und Applikationsmethoden an der Musterfläche, dem nächsten Versuchsabschnitt, benötigt werden.

10 Dritte Sitzung der Projektleitung * * *

Inhalt

10.1	Allgemeines		287
10.2	Festlegung der Musterfläche	***	287
10.3	Bestimmung der Materialien und Applikationsmethoden.	***	287
10.4	Festlegung der Auswertungsmethoden	***	288
10.5	Überprüfung des Zeit- und Kostenplans	***	288
10.6	Zusatzauftrag: Konkreter Maßnahmenplan für ersten Bauabschnitt .	*	289

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

10 Dritte Sitzung der Projektleitung

10.1 Allgemeines

Die dritte Sitzung der Projektleitung hat die Aufgabe, die Ausführungsvorschriften für die Musterfläche festzulegen. Zugrunde liegt der Bericht über die Laboruntersuchungen aus Arbeitsschritt 9. Neben der Projektleitung müssen, da es bei dieser Sitzung hauptsächlich um fachliche Fragen geht, Restauratoren und Naturwissenschaftler beteiligt sein. Die Aufgaben dieser Sitzung sind im Einzelnen:

10.2 Festlegung der Musterfläche

Das Untersuchungslabor legt im Einvernehmen mit einem Restaurator einen Vorschlag vor, an welcher Stelle die Musterfläche angelegt werden soll. Sie soll so bemessen sein, dass alle wichtigen Natursteinvarietäten und Konservierungsprobleme repräsentativ vertreten sind. Möglicherweise wird es nötig sein, die Musterfläche auf verschiedene Objektbereiche zu verteilen, wenn die gestellten Aufgaben nicht an einer einzigen Fläche anzutreffen sind.

Da an der Musterfläche nochmals Proben entnommen werden müssen, sollte der Ort auch in dieser Hinsicht geeignet sein und nicht gerade die wertvollsten Teile eines Objekts beinhalten. Bei den Konservierungsaufgaben sollte man sich eher an einem höheren Schwierigkeitsgrad orientieren, da die Musterfläche die Chance gibt, Anwendungsmethoden zu erproben und zu optimieren. Zu berücksichtigen ist ferner eine gute Zugänglichkeit, da allenfalls ein fahrbares Gerüst mit niedrigen Kosten vertretbar erscheint. Am Ende der Aussprache hat die Projektleitung zu entscheiden, ob der Vorschlag für die Musterfläche angenommen wird.

10.3 Bestimmung der Materialien und Applikationsmethoden

Die Projektleitung befindet weiterhin über die vorgeschlagenen Konservierungsmittel und das Untersuchungsprogramm. Dabei ist Vorsicht geboten, den Rahmen der Untersuchungen nicht zu überfrachten. Häufig wird übersehen, dass mit jeder weiteren Variablen der Umfang der Untersuchungen um den Faktor zwei (Gesteinseigenschaft unbehandelt – behandelt) steigt, sodass sehr schnell ein unrealistischer Untersuchungsaufwand erreicht wird. Es lohnt sich deshalb, die Anzahl der Konservierungsmittel, Applikationsmethoden und zu untersuchenden Gesteinseigenschaften auf das notwendige Mindestmaß zu beschränken.

Bei den vorgeschlagenen Mitteln und den Applikationsmethoden sind die Verfügbarkeit auf dem Markt, der Schwierigkeitsgrad der Verarbeitung und gegebenenfalls auch die Anwendbarkeit auf großen Flächen zu überprüfen. Weitere Auswahlhilfen zur sinnvollen Eingrenzung des Programms liegen etwa darin, von den im Labor getesteten Konservierungsmitteln nur diejenigen weiter zu erproben, welche tatsächlich alle Anforderungen erfüllt haben.

Zum Terminus »Musterfläche«, die aus Gründen des Vergaberechts vielleicht besser »Probefläche« genannt wird, siehe Kapitel 12.4.1.

10.4 Festlegung der Auswertungsmethoden

Zu jeder Fragestellung ist eine geeignete Untersuchungsmethode festzulegen. Dies geschieht am besten auf der Grundlage der Kriterien des Anforderungskatalogs für die einzelnen Konservierungsmaßnahmen, die in den Tabellen 1–14 zusammengestellt sind. Die Prüfmethode sollen möglichst zerstörungsarm sein. Dies wird sich aber nicht gänzlich verwirklichen lassen, da verschiedene Prüfmethode nur im Labor vorgenommen werden können und aus diesem Grund Proben entnommen werden müssen. Gerade die Musterfläche aber soll ja noch einmal die Gelegenheit geben, den Maßnahmenplan zu verfeinern, sodass eine nochmalige Probenahme durchaus vertretbar erscheint.

10.5 Überprüfung des Zeit- und Kostenplans

Wie bei jeder Sitzung ist darüber Rechenschaft zu geben, inwiefern Zeit-, Kosten- und Maßnahmenplan geändert werden müssen. Hinweise in dieser Richtung sind dem Untersuchungsbericht zu entnehmen, der auf besondere Ausführungsvorschriften, die eine Streckung des Zeitplanes oder besondere bauliche Begleitmaßnahmen erfordern würden, hinweisen muss.

Abschließend hat die Projektleitung zu beschließen, den Arbeitsschritt »Anlegen und Auswerten der Musterfläche« offiziell freizugeben. Der Koordinator wird beauftragt, ein Leistungsverzeichnis anzufertigen und Angebote einzuholen.

Wenn alle vorangegangenen Schritte plangemäß verlaufen sind, sollte man mit den Arbeiten an der Musterfläche noch rechtzeitig vor Beginn der Frostperiode beginnen können. Haben die Arbeiten aufgrund verzögerter Auftragsvergabe zu spät begonnen, ist zu entscheiden, ob die Maßnahmen nicht besser in das nächste Jahr verschoben werden.

Um Verzögerungen und nochmalige Besprechungen zu vermeiden, wäre es aber für den Fortgang der Arbeiten günstiger, wenn bereits vor dieser Sitzung das Leistungs-

verzeichnis für die Musterfläche fertiggestellt und Angebote dazu eingeholt wären, sodass beide Punkte bereits besprochen werden können.

10.6 Zusatzauftrag: Konkreter Maßnahmenplan für ersten Bauabschnitt

Eine weitere Beschleunigung kann das Projekt dadurch erfahren, wenn in den Auftrag für die Musterfläche die Aufgabe einbezogen wird, zusammen mit der Auswertung der Musterfläche bereits einen konkreten Maßnahmenplan für den ersten Bauabschnitt auszuarbeiten, wobei in diesem Plan zwingend eine Maßnahmenkartierung und die genaue Materialliste enthalten sein müssen.

11 **Bearbeitung der Musterfläche (Probefläche) * * ***

Inhalt

11.1	Ausführung der Musterfläche (Probefläche)	***	293
11.1.1	Allgemeines		293
11.1.1.1	Zeitlicher Rahmen		293
11.1.1.2	Dokumentation – erste Hinweise		294
11.1.2	Reinigung	***	294
11.1.3	Natursteinaustausch	***	297
11.1.4	Entsalzung	**	300
11.1.5	Festigung	***	305
11.1.6	Fuge und Fugenmörtel	***	309
11.1.6.1	Rezepte, Handwerk und Optik		309
11.1.6.2	Fuge und Statik		312
11.1.6.3	Sonderfall Pressfugen		314
11.1.7	Steinersatzstoffe	***	316
11.1.8	Schlämmen und Putze	**	319
11.1.9	Farbanstriche	**	320
11.1.10	Hydrophobierung	***	322
11.1.11	Konstruktiver Regenschutz	**	324
11.1.12	Prophylaktischer Schutz gegen Graffiti	*	328
11.2	Auswertung der Musterfläche (Probefläche)	***	329
11.2.1	Allgemeines		329
11.2.2	Reinigung	***	330
11.2.3	Festigung	***	333
11.2.4	Fugenmörtel	***	335
11.2.5	Steinersatzstoffe	***	336
11.2.6	Schlämmen und Putze	**	337
11.2.7	Farbanstriche auf Naturstein	**	337
11.2.8	Hydrophobierung	***	338
11.2.9	Mikrobiologische Untersuchung	*	340
11.3	Schlussbericht über die Musterfläche (Probefläche)	***	340
11.3.1	Bericht über die durchgeführten Untersuchungen	***	340
11.3.2	Ausarbeitung eines konkreten Maßnahmenplans	***	341
11.3.3	Vorschläge für die Nachkontrolle	***	346

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

11 Bearbeitung der Musterfläche (Probefläche)

11.1 Ausführung der Musterfläche (Probefläche)

Die Ausführung einer Muster- oder Probefläche gehört zum unverzichtbaren Inhalt einer jeden größeren Konservierungsmaßnahme. Sie ist eine sehr präzise Möglichkeit zur Erprobung der Anwendungsempfehlungen. An ihr sollen die Probleme aufgedeckt werden, welche einer Umsetzung der Laborergebnisse in die Praxis unter Bauwerksbedingungen entgegenstehen, damit letztendlich die gesamte Konservierungsmaßnahme mit Erfolg durchgeführt werden kann. Ihre Auswertung liefert gleichzeitig die Grundlagen für die Aufstellung des Leistungsverzeichnisses. Aus diesem Grunde müssen die in der Musterfläche enthaltenen Steinvarietäten und deren Schadensbilder eine für das Gebäude repräsentative Auswahl darstellen, die alle Schwierigkeitsgrade der Konservierung beinhaltet. Der Auftrag besteht aus zwei Teilen, der Anwendungserprobung und der Auswertung.

11.1.1 Allgemeines

Mit diesem Auftrag werden die im Labor bestimmten und im Projektausschuss gebilligten Behandlungsschritte freigegeben. Die Arbeiten müssen von einer qualifizierten Fachfirma, am besten von einem erfahrenen Restaurator vorgenommen werden, der in der Lage ist, die Vorgaben aus dem Labor praxisgerecht umzusetzen. Bei den einzelnen Behandlungsschritten wird es in besonderem Maße um die Erprobung verschiedener Applikationsbedingungen gehen, sei es in Hinblick auf die Gerätetechnik oder auf die zeitliche Dauer der Anwendung. Auf jeden Fall muss sichergestellt sein, dass sich die zum Einsatz kommenden Geräte auch für die spätere großflächige Anwendung eignen. Es sollte zur Auflage gemacht werden, dass der Restaurator und das Fachlabor, welches später die Auswertung vornehmen wird, die Musterfläche in enger Kooperation ausführen, damit erforderliche Feinkorrekturen eingebracht werden können.

11.1.1.1 Zeitlicher Rahmen

Der zeitliche Rahmen für die Durchführung einer Musterfläche kann sehr unterschiedlich sein. Jedoch sollte zusammen mit der Auswertung mindestens ein Vierteljahr veranschlagt werden, bei größeren Musterflächen nicht selten ein Jahr oder mehr. Nicht alle Maßnahmen können in einem Zug zu Ende gebracht werden. Beispielsweise könnte eine mehrstufige Festigung Arbeitsunterbrechungen von 14 Tagen und mehr erforderlich machen. Es ist deshalb auf jahreszeitliche Bedingungen zu achten.

Zu spät im Jahr, wenn bereits Fröste drohen, sollten Musterflächen nicht mehr in Angriff genommen werden. Reinigungsmuster mit trockenen Reinigungsmethoden können aber durchaus noch durchgeführt werden. Insgesamt sollte es deshalb zur Regel gemacht werden, Musterflächen immer im Jahr vor der eigentlichen Konservierungsmaßnahme anzulegen und auszuwerten.

11.1.1.2 Dokumentation – erste Hinweise

Die Musterfläche stellt sowohl eine praxisgerechte Erprobung der festgelegten Konservierungsschritte als auch die Grundlage für die endgültige Kostenkalkulation dar. Alle Arbeiten müssen deshalb detailgetreu dokumentiert sein. Dazu gehören:

- genaue Bestandskartierung aller Materialien und deren Schäden
- Kartierung aller geplanten Maßnahmen
- fotografische Dokumentation der Schadensbilder und aller wichtigen Arbeitsschritte [siehe SCHMIDT (1997)]
- Kartierung der durchgeführten Maßnahmen
- Zeitpunkt und Dauer der Anwendungen
- laufende Klimamessungen, insbesondere Angaben über Regenereignisse
- Aufstellung einer Materialliste mit vollständigen Angaben über Produkte, Herstellerfirmen und insbesondere Verbrauchsmengen
- Buchführung über geleistete Stunden und Materialkosten.

Im Folgenden erscheint eine Reihe von Tabellen, welche als Hilfestellung anzusehen sind, die Ausführung der Musterfläche und die anschließende Durchführung der Gesamtmaßnahmen (Arbeitsschritt 13) zu überprüfen. Diese Tabellen enthalten in der letzten Zeile eine Bewertung, welche zum Ausdruck bringt, dass immer alle Fragen vollständig ausgefüllt sein müssen, damit die vorgelegte Dokumentation »als in Ordnung« eingestuft werden kann. Sind einzelne Fragen nur unvollständig oder gar nicht beantwortet, so müssen die fehlenden Angaben nachgeliefert werden. Die Spalte »Attest ja/nein« dient lediglich dazu, die Vollständigkeit oder Unvollständigkeit der Angaben zu attestieren.

Die Gesamtkosten für die Musterfläche sind letztlich eine verlässliche Grundlage für die Kalkulation der Gesamtmaßnahme. Dieser Gesichtspunkt wird insbesondere für den Bauherrn und Finanzier von allergrößtem Interesse sein. Schon allein deshalb sollte auf eine Musterfläche nie verzichtet werden.

11.1.2 Reinigung

Während alle anderen Konservierungsmaßnahmen sehr viel umfangreicher durch Laboruntersuchungen vorbereitet werden können, bedürfen die unterschiedlichen Reinigungsverfahren der gewissenhaften Erprobung am Objekt selbst (Bild 119). Die zur Auswahl stehenden Methoden sind bereits in Tabelle 5 genannt worden.

Der Restaurator führt die Tests zunächst entsprechend den Vorgaben aus dem Untersuchungsbericht (Arbeitsschritt 9) aus. Wie eingangs schon gesagt, können Reinigungsmuster, die kein Wasser einsetzen, noch spät im Jahr angelegt werden. Im Vorfeld muss bereits ein Kontakt zwischen dem Untersuchungslabor und dem Restaurator hergestellt sein, damit die Instruktionen auch unmittelbar an die richtige Adresse kommen.



Bild 119: Musterflächen mit Mikropartikelstrahlreinigung an der Kirche Sankt Moriz in Coburg

Der Gutachter hat auch die Aufgabe, den Ausführenden auf besondere Schwierigkeiten hinzuweisen. Liegt beispielsweise eine erhöhte Salzbelastung vor, so wäre zu überlegen, ob vorher eine Entsalzung vorgenommen werden muss. Auf jeden Fall hat unter diesen Umständen eine Wasserreinigung zu unterbleiben, da sonst die Salze noch tiefer in das Mauerwerk einwandern würden.

Die Begutachtung der Musterfläche kann, sollte aber nicht immer nur nach dem visuellen Befund vonstatten gehen. Zunächst ist zu entscheiden, ob das Reinigungsergebnis den gestellten Anforderungen gerecht wird. Die Reinigung sollte nie alle Schmutzablagerungen restlos entfernen, weil eine zu gründliche Reinigung immer einen unvermeidbar großen Materialverlust bedeutet. Die Oberflächen sollen nach wie vor Spuren der Alterung zeigen, indem z. B. in den Vertiefungen graue Reste der ausgedünnten Kruste stehen bleiben. In den meisten Fällen genügt ein gesteuertes Ausdünnen der Krusten, um die Poren zu öffnen und den Wasserdampfdiffusionswiderstand ausreichend zu senken. Zur messtechnischen Überprüfung des Reinigungs-

ergebnisses (siehe Abschnitt 11.2.2) können folgende Messungen durchgeführt werden:

- Farbmessungen mit einem Farbmessgerät; Bestimmung der Farbverschiebung und der Helligkeit,
- Wasseraufnahme und w-Wert Bestimmung mit dem Karsten'schen Prüfrohr; Vergleich der w-Werte vor und nach der Reinigung,
- Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ . Für diese Bestimmung sind Proben erforderlich.
- Salzbestimmung; Entnahme von Schabeproben und Analyse der Konzentrationen von Gips und anderen bauschädlichen Salzen,
- Oberflächenrauheit.

Bei einer Laserreinigung von Kalksteinfassaden wird in manchen Fällen eine gelb bis ocker gefärbte Oberfläche freigelegt, die von manchem Wissenschaftler zunächst so gedeutet wurde, als habe der Laserstrahl die Farbe des Kalksteins verändert (Bild 120). Bei näheren Untersuchungen stellte sich jedoch heraus, dass die gelbe Schicht aus Gips besteht und somit die unterste Lage der schwarzen Kruste darstellt, die wegen ihrer geringen Dicke nicht mehr schwarz, sondern aufgrund der Einlagerungen von öligen und rußigen Verbindungen gelblich erscheint. Diese Schicht absorbiert das Laserlicht nur sehr wenig, sodass ihre Entfernung einen erheblichen Energieeintrag erfordern würde und auch am Kalkstein Schäden auftreten könnten. Es ist deshalb nicht ratsam, die Schicht auch noch abnehmen zu wollen.



Bild 120: Musterfläche einer Laserreinigung am Neuen Rathaus in München. Die Oberfläche ist noch von den Resten der schwarzen Kruste überzogen und erscheint deshalb in gelbliche Farbe.

Sind mehrere Firmen als Anbieter verschiedener Reinigungsmethoden eingeschaltet, was jedoch nicht zu empfehlen ist, so ist darauf zu achten, dass die vergebenen Teilflächen den gleichen Schwierigkeitsgrad aufweisen (vgl. Bild 119). Bei der Abfassung des Berichts über die Reinigungstests darf nicht vergessen werden, die Arbeitsparameter der verwendeten Reinigungsgeräte genauestens anzugeben. Ein Vorschlag, wie eine Tabelle mit den wichtigsten Angaben aussehen könnte, ist in Tabelle 17

gezeigt. Um dem geforderten Qualitätsstandard zu genügen, müssen alle Fragen beantwortet sein.

Tabelle 17: Dokumentation zur Natursteinreinigung

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Gerät			Gerätehersteller
4	Methode			Dampfstrahl, Partikelstrahl, Feinpartikelstrahl, Laser etc.
5	Material			Wasser, Hochofenschlacke, Hohlglaskugeln, Quarzmehl etc.,
6	Parameter			Temperatur, Druck, Körnung, Arbeitsabstand, (bei Laser Puls, Energie, Fokus) etc.
7	Dokumen- tation			Plan mit genauer Bezeichnung der gereinigten Partien, Angaben zu Wirkungsweise der erprobten Metho- den, Hinweise auf besondere Vor- kommnisse wie Verfärbungen, Beschädigungen, Fotodokumen- tation etc.
8	Bewertung			alle sieben Felder müssen das Attest »ja« erhalten

11.1.3 Natursteinaustausch

Auch beim Austausch von Werksteinen oder dem Einsetzen von Vierungen kann auf entsprechende Muster nicht verzichtet werden. Maschinen dürfen nur bei den vorbereitenden Arbeiten zum Einsatz kommen; ansonsten ist die den Regeln der Handwerkskunst entsprechende Ausführung verbindlich, vor allem bei der Gestaltung der Oberflächen. Werden komplette Steine, also von Fuge zu Fuge, ausgetauscht, so spricht man von Neuteilen. Werden nur Teile eines Steines ersetzt, so handelt es sich um Vierungen. Die Vierung ist immer Teil des »Muttersteins«.

Ein großes Problem aus historischer Sicht ist, dass heute neue Gesteinsblöcke mit perfekt gesägten Oberflächen und Kanten auf die Baustelle geliefert werden. Auf solchen Flächen finden Versetz- und Fugenmörtel nur schlecht einen Halt. Sie müssen deshalb aufgeraut werden. Dabei genügt es jedoch nicht, nur einige Kerben einzuschlagen, was häufig zu beobachten ist.

Die Anpassung der Oberfläche an das Original gestaltet sich bei solchen Quadern als besonders problematisch. Es ist nämlich ein großer Unterschied, ob von grober Oberfläche zu feiner oder von feiner nach grober Oberfläche gearbeitet wird. Früher war die Oberfläche eines Quaders grob gespitzt. Die Oberflächengestalt wurde durch Abtragung der Spitzen geformt, eine lebendige leichte Unebenheit blieb immer erhalten. Heute muss die Oberflächenform in eine vollkommen glatte Fläche hineingearbeitet werden. Es dürfen keine Reste der gesägten Oberfläche zurückbleiben, damit das Endresultat nicht optisch unbefriedigend gerät.

Die Versetztechnik, die geeigneten Mörtel (Setzmörtel, Hinterfüllmörtel) und Verankerungen müssen erprobt werden. Zu beachten sind die Maßgenauigkeit und die Präzision des Übergangs zum Originalgestein, die bei Pressfugen von außerordentlicher Güte sein muss. Das vorgezeichnete Fugenmaß soll eingehalten und nicht wegen historisierender Idealvorstellungen abgeändert werden. Vor allem aber soll an der Musterfläche die Anpassung auf die originale Oberflächenbearbeitung eingeübt werden (vgl. den Plan »Bearbeitungsspuren«).

Üblich sind rückwärtige Verdübelungen, um den neuen Stein und vor allem die Vierung zu sichern. Diese Metallstäbe haben keine aktive Haltefunktion. Sie reagieren erst, wenn es zu einer Bewegung oder einem Schaden kommt (siehe dazu Kapitel 4.2 »Stein und Statik«). Dauerhafter und statisch aktiv sind Befestigungen mit Vorspannung, wie in Bild 121 dargestellt [PFANNER et. al. (2010)].

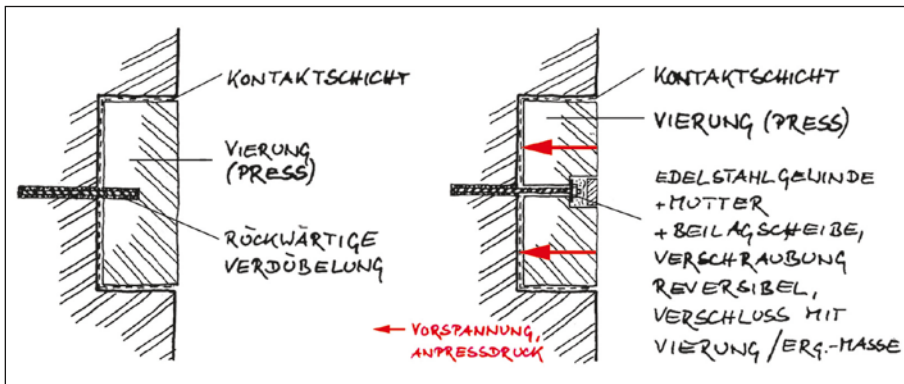


Bild 121: Befestigung von Vierungen. Links: herkömmliche und irreversible Schrauben und Dübel. Rechts: Verschraubung mit aktiver Vorspannung. Das dadurch bedingte äußere Bohrloch kann mit Ergänzungsmasse oder einem Bohrkern verschlossen werden; Systemskizzen ohne Maßstab (Zeichnung: L. Reichenbach).

Da nach dem Einsetzen neuer Steine der Gegensatz zwischen den neuen Quadern und dem abgewitterten Originalmauerwerk scharf hervortreten wird, bietet die Musterfläche eine ausgezeichnete Möglichkeit, sich auf den Wechsel zwischen alt und neu einzustellen und die Qualität der Ausführung nach optischen Entscheidungskriterien zu beurteilen.

Immer wieder wird bei stark zurückgewittertem Mauerwerk diskutiert, auf welchem Bezugsniveau die neu eingesetzten Steine abschließen sollen. Selbst wenn die neuen Steine ein gutes Stück aus der Fläche herausstehen sollten, gilt als Bezugsniveau immer das der originalen Oberfläche, weil das Zurückversetzen der Oberfläche eine Verfälschung des historischen Befundes wäre. Um die Ableitung des Regenwassers zu erleichtern, können die Oberseiten vorstehender Quader leicht nach außen abgeschrägt werden.

Umlaufende Gesimse haben die Funktion, das Regenwasser von der Fassade abzuleiten. Häufig sind jedoch die Abtropfkanten und die Oberseiten der Gesimse durch Frost so stark geschädigt, dass sie diese Aufgabe nicht mehr erfüllen. Weil der Einbau von schmalen Vierungen an den Vorderkanten ein aufwändiges und kostspieliges Unterfangen ist, bieten sich Verwahrungen aus Blei- oder Kupferblech an, welche die verwitterten Oberflächen schützen und das Regenwasser gezielt nach unten ableiten. Auch der prophylaktische Schutz von neuen Gesimsen durch Blechabdeckungen stellt eine sinnvolle und nachhaltige Maßnahme dar. PFANNER & PFANNER (2007) haben die Arbeitsschritte bei der Verarbeitung von Abdeckblechen mit Zeichnungen und Fotos sehr instruktiv dargestellt. (siehe Kapitel 11.1.11).

In statischer Hinsicht werfen Neuteile und Vierungen ziemliche Probleme auf. Wird in einem bestehenden Stein oder im Mauergefüge ein Loch oder eine Öffnung gemacht, lagern sich die Kräfte um. Der neu eingesetzte Stein wird keine Belastung mehr aufnehmen und die Umgebung ist umso mehr belastet (siehe Kapitel 4.2). Insofern ist es sinnvoll, die Anzahl von Neuteilen möglichst gering zu halten und eine Vierung nicht tief auszuarbeiten, sondern eher zu verblenden, wobei gemäß DIN 18332 Pkt. 3.6.2 die Vierung mindestens 4 cm tief sein muss. Auch beim großflächigen Verblenden mit Neuteilen ist Vorsicht geboten, da die vorgeblendete Gesteinsschicht nicht kraftschlüssig mit dem Reststein verbunden ist und auf diese Weise der tragende Mauerwerksquerschnitt verringert wird.

Die Angaben der DIN 18332 für Vierungen sind bei historischer Substanz nur bedingt geeignet, denn laut DIN sind die Ausnehmungen rechtwinklig oder schwalbenschwanzförmig herzustellen, für Restauriermörtel auch gekurvt. Im Sinne der Denkmalpflege sollte aber die Originalsubstanz möglichst vollständig erhalten bleiben. Vierungen haben zudem einen schlechten Ruf, weil sie oft mit zentimeterbreiten Fugen ausgeführt wie Briefmarken aus der Fläche herausstechen (Bild 122 a). Dabei sind Vierungen eine anerkannte historische Reparaturmethode. Eine originale Vierung am Siegestor in München ist perfekt (Bild 122 b): Der Stein ist identisch, die Größe ist auf ein Minimum beschränkt, die Fugen sind so dünn, dass kein Blatt, geschweige Mörtel dazwischen passt. Auch heutzutage gibt es gut ausgeführte Beispiele, wie neue Vierungen an der Befreiungshalle in Kelheim beweisen. Beim Gesims fällt die sorgfältig eingesetzte Vierung kaum auf und der neue Eierstab greift bravourös die alte Formensprache auf (Bild 122 c). Bei den großen Blöcken des Unterbaus folgen die Vierungen dem geschwungenen Lauf der Schäden (»Konturvierungen«) und werden nach einiger Zeit und mit Patina kaum mehr unangenehm auffallen

(Bild 122 d). Wichtig ist, die Fugen absolut press zu halten. Am besten ist, sie nicht mit Mörtel zu verfüllen und ggf. mit einem Klebemittel wie z.B. Paraloid zu schließen. An manchen Stellen wie Fußböden, Treppen oder exponierten Ecken gibt es zu Vierungen kaum eine Alternative. Prinzipiell ist ihre Langlebigkeit gegenüber Ergänzungen mit Restauriermörtel hervorzuheben, [siehe dazu auch Kap. 9.8.1 und BAUER-BORNEMANN IN GRIMM (2018), S. 332 ff.].

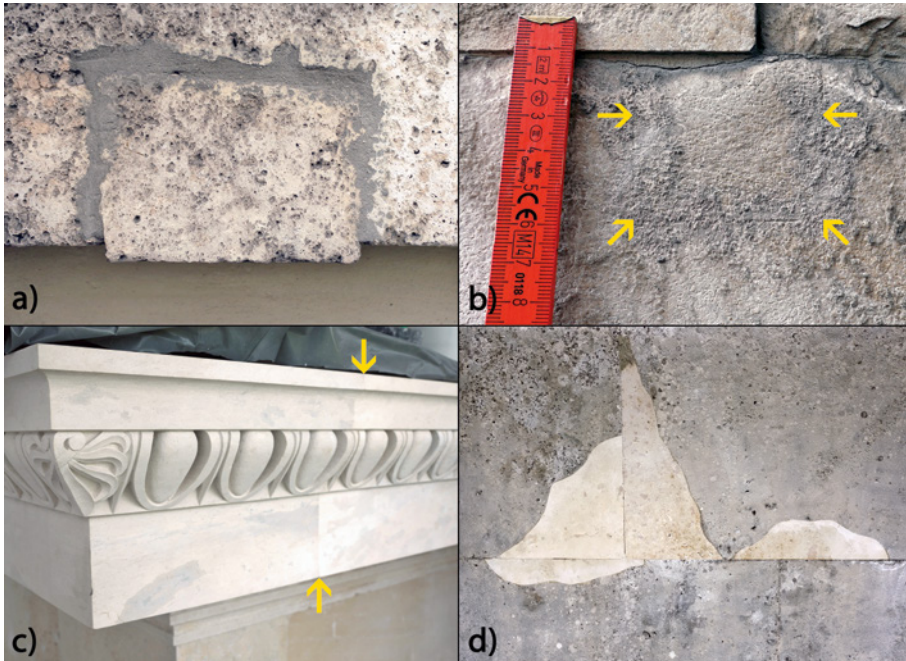


Bild 122: Beispiele für Vierungen a) mangelhaft ausgeführte Vierung, Glyptothek München b) historische Vierung, Siegestor München c) neue Ornament-Vierung an der Befreiungshalle Kelheim (Steinmetz: Thomas Weiland) d) neue Konturvierungen, Befreiungshalle Kelheim (Steinmetz: Sven Hammer) (Aufnahmen: Pfanner)

11.1.4 Entsalzung

Bei Mauerwerk mit hohen Salzgehalten stellt sich die Frage, ob die erforderlichen Maßnahmen wie eine Festigung, das Aufbringen einer Schlämme oder eine Hydrophobierung überhaupt noch möglich sind, oder ob nicht Salze die Wirksamkeit der Behandlungen von vornherein zunichte machen. In solchen Fällen sollte überlegt werden, ob eine Entsalzung durchgeführt werden kann, damit den geplanten Maßnahmen eine ausreichend lange Wirksamkeit beschieden ist. Zweckmäßig sind solche Versuche nur, wenn die Salze vor allem in den Oberflächenschichten angereichert sind, und die Salzmen gen absolut gesehen in einem Rahmen liegen, der die Aufnahmefähigkeit von Kompressen oder Opferputzen nicht vollends übersteigt. Die Eigenschaften von Salzen, die Problematik von Salzbelastungen und deren Reduktion

werden eingehend abgehandelt auf dem Internetportal www.salzwiki.de. Anders als noch vor ein paar Jahren ist die Technik des Kompressenauftrags so weit fortgeschritten, dass auch große Mauerflächen mit Erfolg behandelt werden können, wie in den Jahren 2001 bis 2003 (DBU-Projekt 13890) an der Maxtormauer in Nürnberg gezeigt wurde. Ein Beispiel für die flächenhafte Auftragung einer Kompreze zeigt Bild 123.



Bild 123: Flächenhafter
Kompressenauftrag
auf Mauerwerk
(Aufnahme: Belk)

Vor dem Versuch, eine Entsalzung vorzunehmen, muss das Tiefenprofil der Salze im Mauerwerk quantitativ gemessen werden. Da sich Salze vertikal differenzieren, sind Salzprofile in unterschiedlichen Höhenniveaus erforderlich. Wie viele Profile und bis zu welcher Mauerwerkstiefe diese bestimmt werden müssen, ergibt sich in jedem Einzelfall aus den vorherrschenden Bedingungen. Die horizontale und vertikale Wanderung der Salze resultiert aus der unterschiedlichen Löslichkeit. Die am besten löslichen Nitrate steigen am höchsten, die allgemein schwerer löslichen Sulfate sind in der Sockelzone vorherrschend.

In den meisten Fällen sind auch die Fugenmörtel stark mit Salz durchsetzt. Deren Salzgehalt ist in die Analysen einzubeziehen, um Kenntnis über die Gesamtbelastung des Mauerwerks zu erhalten. Weil in nicht wenigen Fällen die Mörtel sogar die Hauptträger der Salze sind, kann das tiefe Auskratzen der Fugen bereits eine merkliche Linderung der Salzbelastung bringen.

Ein Beispiel für eine halbquantitative Bestimmung der löslichen Anionen und Kationen in Ausblühungen und in Tiefenprofilen wurde in Bild 89 gezeigt. Wenn immer die finanziellen Vorgaben es zulassen, sollte eine quantitative Analyse in Verbindung mit einer Ionenbilanz vorgenommen werden, eine Forderung, die insbesondere bei wertvollen Kulturgütern erfüllt werden sollte. Zusätzlich dazu ist die Bestätigung der

Salzanalysen durch die Röntgenbeugung XRD anzuraten, weil nur mit dieser Methode zweifelsfrei festgestellt werden kann, um welche Salzverbindungen es sich tatsächlich handelt.

Nach WTA-Merkblatt E-3-13-01/D wird die Gefährdung eines Mauerwerks durch bauschädliche Salze an Hand der Konzentrationen in Tabelle 18 beurteilt. Dabei ist zu beachten, dass es sich nur um pauschale Grenzwerte für die drei wichtigsten Anionenarten handelt. Je nach Salz und Gestein oder Mörtel können die Zahlenwerte niedriger oder höher liegen. Es macht nämlich einen großen Unterschied, ob es sich bei einem Sulfat um gering löslichen Gips oder um Natriumsulfat oder gar Magnesiumsulfat handelt. Ebenso ist Calciumnitrat als viel gefährlicher einzustufen als Kaliumnitrat, das häufigste Nitratsalz. Dennoch ist gerade dieses Salz die Ursache zahlreicher feuchter Mauern, weil es wegen seiner großen Löslichkeit und Hygroskopizität die Trocknung verhindert.

Tabelle 18: Belastungskennziffern für die Versalzung von Mauerwerk [WTA-Merkblatt E-3-13-01/D]

Sulfat (M.-%)	Chlorid (M.-%)	Nitrat (M.-%)	Gesamt-konzentration mmol/kg	Wertung
< 0,02	< 0,01	< 0,02	< 2,5	Stufe 0 unbelastet
0,02–0,1	0,01–0,03	0,02–0,05	2,5–8	Stufe 1 gering belastet
0,1–0,2	0,03–0,1	0,05–0,2	8–25	Stufe 2 mittel belastet
0,2–0,8	0,1–0,3	0,2–0,5	25–80	Stufe 3 hoch belastet
> 0,8	> 0,3	> 0,5	> 80	Stufe 4 extrem belastet

Die Möglichkeiten, Salze zu extrahieren, beschränken sich am Objekt auf Kompressen oder auf Opferputze, die eine hohe Porosität aufweisen. Diese bilden einen neuen, künstlichen Verdunstungshorizont, sodass die Salze nicht mehr in der Steinoberfläche kristallisieren.

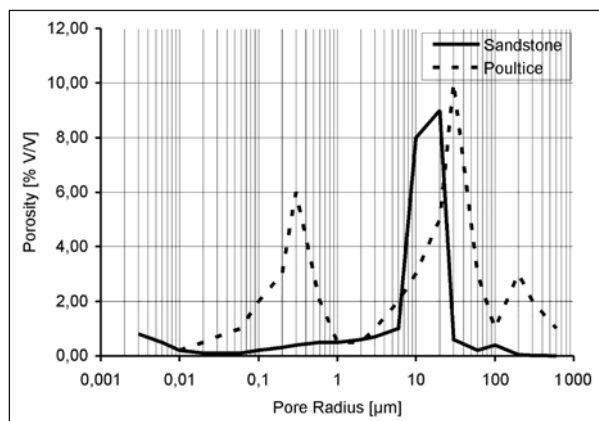
Kompressen bestehen aus Zellulosen, Tonmineralen (Kaolinit, Attapulgit oder Bentonit) und inerten Füllstoffen wie feinem Sand oder porösem Leichtzuschlag (Perlit) oder sind bereits vorgefertigte saugfähige Matten und Vliese aus Schaumstoff, Papier oder Textilien. Besonders effektiv sind sogenannte Superabsorber, die bis zum 1000-fachen ihrer Masse an Wasser aufsaugen können. Extrem aufquellende Stoffe, welche den Kapillartransport behindern, dürfen nicht enthalten sein (z. B. Agar-Agar, Methylzellulose, Gelatine). Kontraproduktiv sind natürlich Hydrophobierungsmittel, Netzmittel und selbstverständlich Füllstoffe, welche selbst Salze absondern.

Eine umfassende Darstellung der Entsalzung mit Kompressen ist in VORONINA (2011) nachzulesen.

Die Kompressen werden nach Vornässen in feuchtem Zustand aufgetragen und so lange belassen, bis sie entweder nass oder getrocknet abgenommen werden. Im ersten Fall spricht man von einer dauernassen, im zweiten Fall von einer abtrocknenden Komresse. Trotz mitunter abweichender Meinungen sollte die abtrocknende Komresse wirkungsvoller sein, weil der Kapillartransport effektiver ist als die Diffusion, welche bei der dauernassen Komresse die Salz-minderung steuert. Im Fall der Trocknungskomresse muss allerdings gewährleistet sein, dass die kapillare Saugspannung der Komresse größer ist als die des Steins, sodass diesem tatsächlich Salzlösung entzogen wird und der Verdunstungshorizont in der Komresse liegt. Weil es keine generelle Regel für eine passende Zusammensetzung von Kompressen gibt, ist durch Vorversuche zu klären, welche Komresse für das betreffende Gestein geeignet ist.

Bild 124 zeigt die Porenradienverteilungen eines Sandsteins und einer auf diesen Stein angepassten Komresse. Der Sandstein besitzt ein Maximum von 10–20 μm , die drei Maxima der Komresse liegen bei 0,3, 30 und 200 μm . Diese Porenabstufung erlaubt den vollständigen Ablauf der Entsalzung sowohl in der Durchnässungs- als auch in der Trocknungsphase. Der vor dem Aufbringen der Komresse befeuchtete Sandstein kann sich aufgrund seiner größeren Saugspannung mit dem Wassergehalt aus den Grobporen der Komresse weiter mit Wasser sättigen. Im Trocknungsprozess besitzen die feinen 0,3 μm großen Poren der Komresse eine größere Saugspannung als die Poren des Sandsteins und werden Salzlösung aus dem Stein in die Komresse saugen.

Bild 124: Gegenüberstellung der Porenradienverteilung eines Sandsteins und einer Komresse [Abbildung nach van Hees IUAV (2006, 2007)]



Kompressenanwendungen müssen im Regelfall mehrmals wiederholt werden, weil sich die Salzgehalte durch einen Arbeitsgang kaum ausreichend entfernen lassen. Um die Wirkung von Kompressen überhaupt sicher zu stellen, müssen diese während

der gesamten Anwendungsdauer in einem guten Kapillarkontakt mit dem zu entsalzenden Gestein stehen.

Opferputze dagegen entfalten ihre Wirkung erst im Laufe mehrerer Jahre. Sie sind als Opferschichten gedacht, welche bis zu ihrer »geplanten« Zerstörung auf der zu entsalzenden Fläche verbleiben. Danach werden sie abgenommen und entsorgt. Die Tiefenwirkung von Kompressen und Opferputzen reicht nur in eine Größenordnung von vielleicht 5 cm, was aber ausreichend sein kann, da die meisten Salze nur an der Oberfläche angereichert sind.

Beispiele für erfolgreiche Entsalzungen an Objekten liegen seit einigen Jahren in vermehrtem Umfang vor. Leider fehlen noch die Langzeitkontrollen, die Auskunft darüber geben könnten, wie schnell die Salze möglicherweise nachgeliefert werden. Hinsichtlich der wissenschaftlichen Grundlagen befindet sich das gesamte Thema eher noch im Stadium von Versuch und Irrtum. Die exaktesten Angaben über den Grad der Entsalzung und die erforderliche Entsalzungsdauer finden sich noch bei GRASSEGGER & GRÜNER (1991) und GISKOW (1987).

Die Verwendung von Opferputzen hat durch die Möglichkeit, hochporöse Putze mit hinreichender Festigkeit herstellen zu können, vermehrt Anwendung gefunden [siehe hierzu HILBERT (1995)]. Opferputze besitzen ein extrem hohes Porenvolumen von 50 Vol.-% und mehr und sind deshalb, unterstützt durch das stabile Bindemittelgerüst, in der Lage, viel Salz einzulagern, ohne zerstört zu werden.

Einfacher kann sich die Entsalzung von transportablen Objekten gestalten. Die immer noch wirkungsvollste Methode ist die Entsalzung im Wasserbad. Dabei muss aber gewährleistet sein, dass die Oberfläche noch so stabil ist, dass sie nicht abgewaschen wird. Hohe Salzgehalte und trotzdem stabile Oberfläche sind aber im Normalfall ein Widerspruch, sodass die Entsalzung im Wasserbad in vielen Fällen nicht in Betracht gezogen werden kann. Liegt also eine starke Oberflächenschädigung vor, so kann auch an transportablen Objekten nur mit allergrößter Vorsicht mit Hilfe von Kompressen versucht werden, den Salzgehalt zu reduzieren.

Eine Vorfestigung mit Kieselsäureester wird zwar das Absanden oder Abschuppen vermindern, auf der anderen Seite aber den Entsalzungseffekt stark einschränken, da ja die Salze in das Gel eingeschlossen werden, und von dort nur äußerst langsam durch Diffusion nach außen wandern können. Systematisch sind die verschiedenen Möglichkeiten der Entsalzung von WINDSHEIMER et al. (1991) im Labormaßstab untersucht worden.

Die Wirksamkeit einer Entsalzung kann durch eine Analyse des flächenbezogenen Salzgehaltes in der Kompressen bzw. im Opferputz (Salzmenge in g/m²) ermittelt werden. Dieser Wert gibt diejenige Salzmenge an, welche dem Stein entzogen worden ist. Ist der volumen- bzw. flächenbezogene Salzgehalt des Gesteins vor der Entsalzung bekannt, kann die Reduktion des Salzgehaltes nach jedem Entsalzungszyklus errechnet werden.

Noch genauer als mit dem Salzgehalt in der Kompressen kann die Reduktion der Salzbelastung mit Hilfe von Salzprofilen durch das Mauerwerk vor und nach der Maßnahme überprüft werden, was aber eine mehr oder weniger umfangreiche, zerstörende Probenahme erforderlich macht und deshalb sehr gut überlegt werden sollte. Zur Frage, welche Anionen und Kationen bestimmt werden sollen, siehe Kapitel 6.4.6. In bestimmten Fällen besteht eine weitere Möglichkeit in der Messung der Saugfähigkeit mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen, aber nur dann, wenn an dem betreffenden Objekt vorher festgestellt wurde, dass hohe Salzeinlagerungen in den Oberflächenporen die Wasseraufnahme und Wasserdampfdiffusion stark eingeschränkt hatten (Beispiel der Terracotten am Schloss Wismar; E. Wendler, pers. Mitteilung). Mit Hilfe einer Entsalzung kann es in solchen Situationen gelingen, die erforderliche Saugfähigkeit für die Applikation eines Steinschutzstoffes wiederherzustellen.

11.1.5 Festigung

Im Ablauf einer Natursteinkonservierung stellt die Erprobung der Festigungsmittel vielleicht die wichtigste Maßnahme dar. An der Musterfläche sollen nun die Empfehlungen der vorangegangenen Laboruntersuchungen in die Praxis umgesetzt werden. Da jedoch die Applikationsmethoden der flüssigen Festigungsmittel im Labor und am Objekt verschieden sind, stellt das Erreichen der Laborresultate auch am Objekt eine besondere Herausforderung dar. Neben der Erprobung der diversen Produkte und Modifizierungen wird möglicherweise auch der Mehrfachanwendung eine große Bedeutung zukommen, um die vorgegebenen Ziele zu erreichen. Wie unterschiedlich die Ergebnisse der Labor- und der Objektfestigung sein können, haben SATTler & WENDLER (1989) eindringlich an der Allerheiligenhofkirche München zeigen können.

Es sei an dieser Stelle nochmals an Tabelle 7 erinnert, welche die zu erreichenden Qualitätsstandards auflistet. Nicht zuletzt durch die Applikationsmethoden kann das Ergebnis in der einen oder anderen Richtung nachhaltig beeinflusst werden. Stellvertretend für die Behandlung mit anderen flüssigen Steinschutzstoffen, wie z. B. mit Hydrophobierungsmitteln, wird bereits an dieser Stelle ein Überblick über verschiedene Applikationsgeräte und deren Eignung gegeben. Die Angaben sind SCHOONBROOD (1996) bzw. SCHOONBROOD & PRICKARTZ (1995) entnommen.

Aus Tabelle 19 geht hervor, dass vor allem die Möglichkeit, geringste Stoffmengen aufzubringen, von Bedeutung ist. Damit kann der unterschiedlichen, insbesondere aber einer geringen Saugfähigkeit von Gesteinen am besten Rechnung getragen werden. Weiterhin haben systematische Versuche von SCHOONBROOD (1996) an Testmauern ergeben, dass Aufnahmemenge und Eindringtiefe in der Reihenfolge: sequentielle – kontinuierliche – diskontinuierliche Tränkung abnehmen. Eine sequentielle Tränkung, bei welcher der zu tränkende Oberflächenabschnitt regelmäßig überstrichen wird, ohne dass die Oberfläche trocken wird, ist also den anderen Applikationsmethoden vorzuziehen.

In manchen Fällen mag es auch angeraten sein, die zu erwartenden Anwendungszeiten und Verbrauchsmengen vorab zu bestimmen [z. B. mit Expert System PROGNOS, SCHOONBROOD (1996)].

Tabelle 19: Applikationsmethoden für Steinschutzstoffe

	Garten-spritze	Airless	Sprühen	Sprühen mit Luftschutz-mantel	Fluid Applikator
Förderprinzip	pneu-matisch	Pumpe	Pumpe	pneu-matisch	Pumpe
Systemdruck in bar	<1	25–250	1–50	<1	<1
Düsendurchmesser	fixiert	fixiert	fixiert	variabel	variabel
Luftmenge in l/min	0	0	200–400	150–250	0–150
Fördermenge in l/min	0,35–1,0	0,3–0,85	0,15–0,4	0,01–0,12	0,01–0,12
Fördermenge anpassbar an Saugfähigkeit des Untergrundes	–	–	±	+	+
Überschuss in %	20–40	10–20	5–15	±	±
Vernebelungsverlust in %	±	20–35	15–40	10	5
Wirkungsgrad in %	60–80	45–70	45–80	90	95
Optimaler Arbeitsabstand in cm	15	20	20	15	10
Verarbeitung von Steinschutzstoffen	±	+	±	–	±
Gesamtbeurteilung	–	–	–	±	±
+ = möglich/gut; ± = mäßig; – = ungeeignet/schlecht nach SCHOONBROOD (1996) bzw. SCHOONBROOD & PRICKARTZ (1995)					

Dass unter den zur Auswahl stehenden Geräten letztlich keines als uneingeschränkt geeignet abschneidet, zeigt das besondere Dilemma in der gesamten Applikationstechnik. Man kann wohl zu Recht sagen, dass entscheidende Probleme in der Gesteinskonservierung ohne signifikante Fortschritte in der Applikationstechnik nicht gelöst werden können. Diese in allen bisherigen Auflagen gemachte Feststellung ist leider auch heute noch gültig. Dass die in anderen Anwendungsbereichen erprobten Geräte wie der Fluidapplikator oder das Sprühen mit Luftschutzmantel in der Gesteinskonservierung nicht den gewünschten Erfolg erbringen, hängt nicht zuletzt mit den unregelmäßigen Oberflächenbeschaffenheiten eines Mauerwerks zusammen.

Bei der Applikation der ausgesuchten Festigungsmittel sollte von Beginn an ein besonderes Augenmerk darauf gerichtet werden, die unter Laborbedingungen erzielten Eindringtiefen und Festigkeitsprofile auch an der Musterfläche zu erreichen. Gerade flüssige Steinschutzstoffe unterliegen in der Anwendung sehr stark den äußeren Umgebungsbedingungen. Als wesentlichster Einflussparameter ist die Gesteinsfeuchte zu nennen. Die betreffenden Flächen müssen deshalb gegen Regen geschützt werden. Das Mauerwerk muss vor der Tränkung genügend Zeit zur Trocknung haben. Mit Hilfe von Feuchtemesssonden im Bohrloch ist zu prüfen, ob der Wassergehalt bereits bis in den hygroskopischen Bereich zurückgegangen ist. Hygroskopische Salze können auch im Luftfeuchtebereich so viel Wasser anziehen, dass eine Tränkung unmöglich wird.

Die Messung der Sorptionsisotherme wird deshalb dringend empfohlen, da nur mit ihrer Hilfe bestimmt werden kann, unter welchen Klimabedingungen mit hinreichend niedrigen Feuchtegehalten zu rechnen ist. Bereits in Bild 90 wurde an einem Messbeispiel gezeigt, wie stark der Wassergehalt aufgrund von Salzen im Porenraum ansteigen kann. Salze mit einer niedrigen Ausgleichsfeuchte (niedrige Luftfeuchtigkeit) sind dabei gefährlicher einzustufen als solche mit einer hohen Ausgleichsfeuchte. In vielen Fällen werden Wassergehalte im Porenraum erreicht, die eine Tränkung nur nach langen Trocknungsphasen zulassen, da die Salze durch ihre Hygroskopizität die Trocknung stark behindern. Wie hoch der Wassergehalt im Gestein tatsächlich ist, kann durch eine Bestimmung der Salzart und deren Konzentration nur bedingt vorhergesagt werden, weil die Trocknungsrate nur grob geschätzt werden kann. Jedenfalls sollte man sich nicht durch eine trockene Oberfläche täuschen lassen, weil dadurch nicht garantiert ist, dass das Gestein auch in 1 cm Tiefe bereits so weit getrocknet ist, dass eine Tränkung risikolos möglich wäre.

Neben den genannten Vorsichtsmaßnahmen sind selbstverständlich die Verarbeitungsvorschriften der Hersteller genauestens zu befolgen. Insbesondere gilt das für die Angaben zum Temperaturbereich, innerhalb dessen eine Anwendung durchgeführt werden kann.

Als Dokument zur Interpretation der Ergebnisse und auch als Vorgabe für die spätere Konservierung sind deshalb genaueste Angaben zur Verarbeitung unentbehrlich. Tabelle 20 führt beispielhaft diejenigen Angaben an, die zum Erreichen des Qualitätsstandards mindestens erforderlich sind. Beim Ausfüllen ist zu berücksichtigen, dass die Eintragungen gegebenenfalls nach einzelnen Bauelementen gesondert vorgenommen werden müssen.

Tabelle 20: Dokumentation zur Natursteinfestigung

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz-Maßnahmen			Gerüst abgehängt, Kunststoffe abgedeckt, Fenster abgeklebt, etc.
5	Methode			Bezeichnung des Gerätes, z. B. Airless o. a.
6	Produkt			Hersteller, genaue chemische Bezeichnung
7	Verarbeitung			Art und Dauer der Anwendung (sequentiell, kontinuierlich, diskontinuierlich), Anzahl der Flutungen
8	Verbrauch			l/m ²
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Angabe der gefestigten Partien, Hinweise auf besondere Vorkommnisse wie Grauschleier, Glanz etc.
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

Vor mehreren Jahren hat eine Tränkungsverfahren von sich Reden gemacht, von der behauptet wird, vor Ort eine Volltränkung mit Kieselsäureester zu ermöglichen. Bei diesem Verfahren wird das Objekt, zum Beispiel eine Skulptur, mit einer Plastikfolie umhüllt, an deren Oberseite eine Vakuumpumpe angeflanscht ist. Die Folie wird mehrere Stunden evakuiert. Sodann wird der Steinfestiger durch eine Schlauchverbindung von der Standfläche her zugeleitet. Steinfestiger, welcher nicht aufgesaugt wird, wird an der Oberseite abgepumpt und in den Vorratsbehälter zurückgespeist. Der Prozess wird so lange aufrechterhalten, bis kein Steinfestiger mehr aufgenommen wird. In der Regel kann der Prozess innerhalb eines Tages abgeschlossen werden. Die Erfinder des Verfahrens vertreten die Auffassung, mit Hilfe des Vakuums eine Verbesserung der Mittelaufnahme und Eindringtiefe bis zur vollständigen Durchtränkung zu erreichen. Gegen diese Darstellung ist aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten Folgendes anzumerken:

Der durch Vakuum theoretisch im bestmöglichen Fall zu erzielende Unterdruck beträgt 1 bar. Dieser Unterdruck entspricht etwa der Saugspannung eines Porendurchmessers von 10^{-5} m (10 µm). Bei dem Verfahren wird nach Angaben der Erfinder aber nur ein technisches Vakuum in der Größenordnung von 0,1 bar erreicht, was in etwa der Saugspannung eines Porendurchmessers von 10^{-4} m (100 µm) entspricht. Damit wird bei diesem Verfahren mit Hilfe des Vakuums nur eine Verbesserung der Aufnahmemenge und Eindringtiefe im Bereich der absoluten Grobporen von 100 µm aufwärts erreicht, die nur für ganz wenige Gesteine relevant sind. Die Saugspannung

der übrigen Poren mit einem kleineren Durchmesser als $100\text{ }\mu\text{m}$ wird nicht erhöht; die Gesteine saugen genauso schnell wie bei der normalen Flutung ohne Unterdruck. Das Verfahren bietet demnach nur bei extrem grobporigen Gesteinen Vorteile, bei denen die Saugfähigkeit auch ohne Vakuum bereits so gut ist, dass keine weiteren Hilfen nötig sind.

Gleiches gilt übrigens auch für die versprochene Vakuumtrocknung. Weil das technische Vakuum ja nur auf die Grobporen von $100\text{ }\mu\text{m}$ und größer einen Einfluss hat, trocknen die Kapillarporen, in denen das Wasser viel fester gebunden ist, auch nicht schneller und besser aus als bei normaler Belüftung. Eine durchgreifende Trocknung kann aus dem genannten Grund nur durch Wärmebehandlung erreicht werden. Die vollständige Durchtränkung der Objekte bei der Acrylharzvolltränkung (AVT) beruht deshalb nicht auf dem Einsatz von Vakuum, sondern auf dem Einsatz von Überdruck, mit dessen Hilfe tatsächlich die bereits bestehende Kapillarspannung erhöht und die Eindringtiefe verbessert wird.

11.1.6 Fuge und Fugenmörtel

In diesem Teil der Arbeiten sollen die im Labor für geeignet befundenen Rezepte einer Praxisprüfung unterzogen werden.

11.1.6.1 Rezepte, Handwerk und Optik

Es wird sich dabei meist herausstellen, dass an den Rezepturen leichte Veränderungen vorgenommen werden müssen. Mörtel sind seit jeher typische Baustellenprodukte, die nicht in jeder Einzelheit im Voraus festgeschrieben werden können und sollen. Obwohl immer die Annäherung an die historischen Vorgaben angestrebt werden sollte, kann es dennoch nicht erwünscht sein, fehlerhafte Originalmörtel mit z. B. einer ungeeigneten Sieblinie nachzustellen.

Trotzdem müssen die Mörtel genau nach den in den Voruntersuchungen ermittelten Rezepten gewissenhaft hergestellt und verarbeitet werden, denn ansonsten würden die im Labor bestimmten Kennwerte keine Gültigkeit mehr besitzen. Das gilt insbesondere für den Grad der Verdichtung in der Fuge, der sich am Bauwerk möglichst an die Laborbedingungen anlehnen muss. Mindestens ebenso wichtig ist es aber auch, den vorgeschriebenen Wassergehalt einzuhalten, obwohl zum Zwecke einer »vorgeblich besseren Verarbeitbarkeit« auf der Baustelle gern noch einiges an Wasser zugegeben wird. Das bedingt aber nachweislich völlig andere Mörtel Eigenschaften.

Besondere Sorgfalt ist auf die Einhaltung der handwerklich sachgerechten Ausführung zu legen. Das heißt im Einzelnen, dass der Altmörtel bis in die vorgeschriebene Tiefe ausgekratzt wird, die Fugen ausgeblasen und vorgehäst werden müssen, damit der Abbindeprozess nicht gestört wird. Bis zu welcher Tiefe ausgekratzt werden muss,

ist im Einzelfall aus materialtechnischen Überlegungen zu entscheiden, in welche auch die Bauforschung einzubeziehen ist.

Der Fugendeckmörtel darf nicht zu dünn ausfallen, da er sonst nicht fest einbindet. Insbesondere bei der Verwendung von Kalk und latent hydraulischen Zusätzen sind die Mörtel vor dem Austrocknen zu schützen. Bei Gefahr von Nachtfrösten im späten Herbst dürfen keine Arbeiten mehr durchgeführt werden.

Eine Aufgabe kann auch darin bestehen, für das Öffnen und Ausräumen der Fugen oder das Einbringen des Mörtels andere als die klassischen, handwerklichen Methoden zu erproben.

Die Gestaltung der Fuge bildet einen ganz wesentlichen Teil der Aufgaben, die mit Hilfe der Musterfläche geklärt werden sollen. Die Art und Weise, in der die Muster ausgeführt werden sollen, muss durch die Projektleitung vorgegeben werden. Vorbilder sind zunächst sicher die an dem Objekt vorgefundenen Originalfugen; dies aber nicht zwingend, da unter Umständen Reparaturfugen aus späteren Epochen eine bessere Entscheidung darstellen können. Gerade bei der handwerklichen Gestaltung der Fugen wird es sich zeigen, ob die ausgesuchten Mörtelrezepturen auch geeignet sind, die historische Oberflächengestaltung zuzulassen.

Pressfugen dürfen auf keinen Fall aufgeschnitten werden, damit sie mit herkömmlichen Werkzeugen gefüllt werden können, auch wenn dies noch so vehement als handwerklich richtig gefordert wird. Durch den Winkelschleifer wird eine hässliche scharfe Fugenkante erzeugt, die mit dem originalen Fugenbild nichts gemein hat. In die Pressfugen sind vielmehr entsprechend fließfähige Mörtel einzupressen, wobei die Fugen abgedichtet werden müssen.

Ein häufig anzutreffendes Problem stellt sich in stark wechselnden Fugenbreiten, die durch die Abwitterung von Quaderecken und -kanten entstehen. In diesem Fall hat es sich als die beste Lösung erwiesen, den Fugenmörtel nicht bis vorne anzutragen, sondern in geeigneter Weise zurücktreten zu lassen, sodass das sichtbare Fugenband weit gleichmäßiger gestaltet werden kann als wenn die Fuge ganz bis zur Oberfläche gefüllt wird. Ein Beispiel zeigt Bild 125.



Bild 125: Anpassung von Original- und Fugenmörtel an der Südfassade von Kloster Birkenfeld

Die für die Dokumentation geforderten Angaben über die Ausführung der Fugenmuster sind in Tabelle 21 aufgeführt. Es ist besonders darauf zu achten, dass die Materialliste vollständig und korrekt ausgefüllt ist, und dass genaue Angaben zur Verarbeitung gemacht werden. Die einzelnen Muster sind in einen Plan einzutragen.

Tabelle 21: Dokumentation zur Fugeninstandsetzung

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz-Maßnahmen			Gerüst abgehängt, etc.
5	Untergrundvorbereitung			Entfernung Altmörtel bis cm Tiefe, Reinigung der Fugen, Festigung der Fugenflanken, Vornässen etc.
6	Material			Hersteller, genaue Bezeichnung von Bindemittel, Zuschlag und Mischungsverhältnis, Pigmente, Zusatzstoffe, etc.
7	Verarbeitung			Werkzeug, Fugenfüllmörtel und/oder Fugendeckmörtel
8	Verbrauch			kg
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Angabe der reparierten Fugen
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

11.1.6.2 Fuge und Statik

Defekte oder beschädigte Fugen werden in der Praxis oftmals komplett erneuert. Es heißt dann im Leistungsverzeichnis: »Fugen bis zu einer Tiefe von 4 cm ausräumen und neue Fugenmasse einbringen ...« Kaum ein Restaurator macht sich wohl Gedanken, was das in statischer Sicht bedeutet. Sind die Deckfugen original oder zeitnah während der Erbauungszeit eingebracht worden, dann stehen sie durch die Abbinde- und Setzungsprozesse des Bauwerks unter Druck, sie sind sozusagen eingeklemmt und tragen die Lasten mit. Beim Ausräumen der Fugen kann dieser Bereich sich nicht mehr am Lastabtrag beteiligen, und die Kräfte lagern sich auf den verbleibenden Wandquerschnitt um. Dieser Vorgang ist nicht mehr rückgängig zu machen. Die neu eingebrachte Verfugung ist immer spannungslos, da sie nie mehr den ursprünglichen Druck aus dem Mauerwerk erhält und der Setzungsprozess längst abgeschlossen ist. Die Schwindprozesse verstärken den Effekt und machen die neue Fuge noch rissanfälliger (Bild 127). Bei einer großflächigen Fugenerneuerung ist damit die nächste Sanierungsmaßnahme vorprogrammiert.

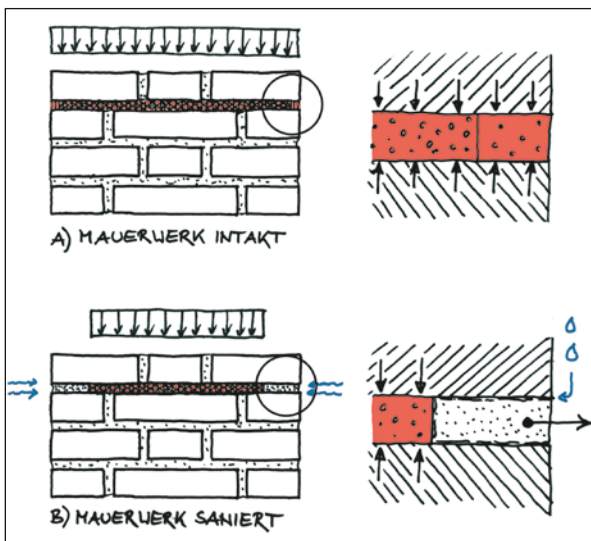


Bild 126: Bei intaktem Mauerwerk wird der Fugenmörtel ähnlich wie der Setzmörtel belastet (A). Wird bei einer Sanierung die Fuge komplett erneuert, steht der Fugenmörtel nicht mehr unter Last und neigt dazu, unter Frosteinwirkung nach außen zu wandern oder sich aufzulösen – ganz zu schweigen von der Druckumlagerung auf den Stein (Systemskizze: L. Reichenbach und J. Pfanner).

Die Dicke der Fuge hat entscheidende Auswirkung auf ihr statisches Verhalten und somit für den Stein und die Lebensdauer des gesamten Mauergefüges. Die Berechnung der dabei auftretenden Spannungen belegt, dass dünne Fugen gegenüber den dickeren eindeutig im Vorteil sind (Bild 127). Insofern bestätigt sich auf rechnerischem Weg die vorteilhafte Bauweise mit Pressfugen, wie sie von Ägyptern, Griechen, Römern und auch im Mittelalter praktiziert wurde.

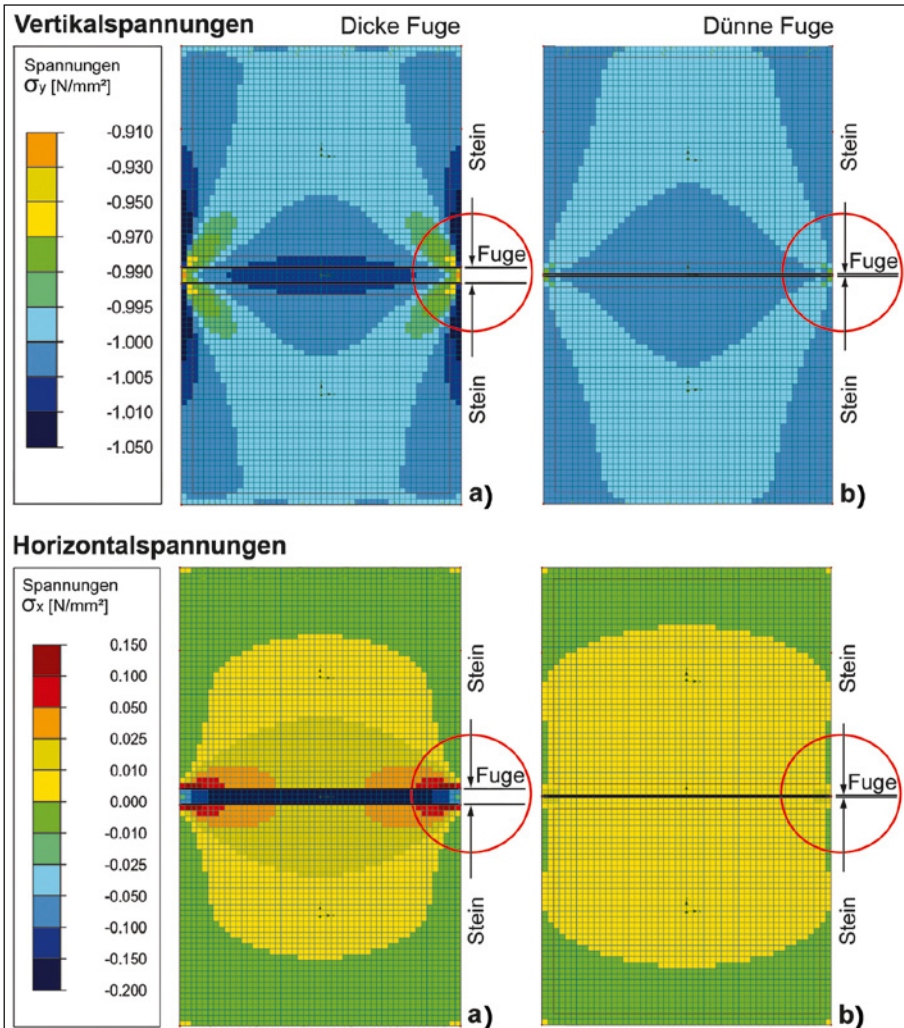


Bild 127: Vertikalspannungen im Mauerquerschnitt bei unterschiedlich dicken Fugen. Lastfall Eigengewicht. a) Fugendicke 30 mm. Bei dicken Lagerfugen sind die Vertikalspannungen am Fugenrand viel geringer als in der Fugenmitte. Grund dafür sind die unterschiedlichen Materialeigenschaften (E-Modul und Querdehnzahl) von Stein und Mörtel. b) Fugendicke 3 mm. Bei dünnen Lagerfugen ist die Verteilung der Vertikalkräfte über die gesamte Fugentiefe relativ ausgeglichen. Der geringere E-Modul des Mörtels fällt hier beim Lastabtrag kaum ins Gewicht. Horizontalspannungen im Mauerquerschnitt bei unterschiedlich dicken Fugen. Lastfall Eigengewicht. a) Fugendicke 30 mm. Unter vertikalen Druckspannungen entstehen in den dicken Lagerfugen zusätzliche horizontal gerichtete Spannungen, nämlich im Mörtel Druck- und in den angrenzenden Steinschichten Zugspannungen. b) Fugendicke 3 mm. Bei dünnen Lagerfugen entsteht derselbe Effekt, jedoch sind die Spannungen viel geringer.

Sollen defekte oder ausgetauschte Fugen statisch funktionstüchtig sein, dann sind weitere Maßnahmen vorzusehen wie z.B. der Einbau von speziellen Fugenkeilen, welche einen Druck auf die Fugenkanten aufbauen.

Besser sind der Erhalt und das Nachschlännen von gerissenen Fugen, falls sie noch ausreichend verkeilt sind. Auch wenn alte Baustoffe die neuen Normen nicht erfüllen sollten, aber das Zusammenspiel Steinquader – Fugenmörtel stimmt, ist eine lange Lebensdauer möglich. Greift man in ein solches System ein, ergeben sich u. U. ungeahnte neue Schäden, und gut gemeinte Fugensanierungen können sich ins Gegenteil verkehren, wie das Beispiel auf Bild 128 zeigt [zum Zusammenspiel von Fuge und Statik, siehe PFANNER et al. (2009)].

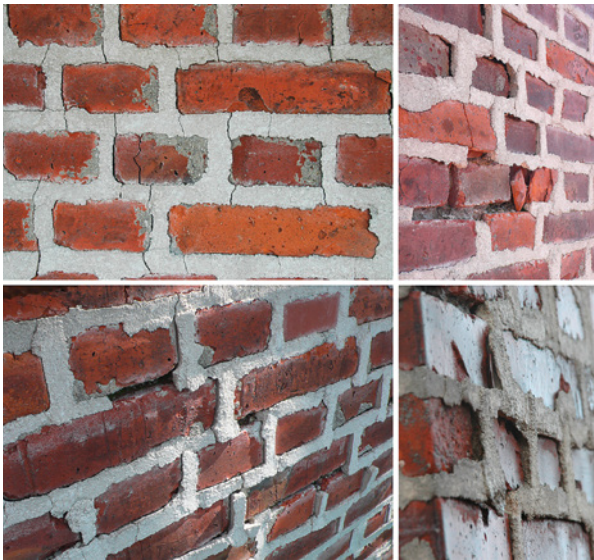


Bild 128: Stadtbergen, Kirche Maria Hilfe der Christen. Der Kirchturm besteht aus Backsteinen und Kalkmörtel. Bei einer Sanierung wurde der Kalkmörtel durch kunststoffvergüteten Fertigmörtel ersetzt und die Ziegel wurden hydrophobiert. Nach wenigen Jahren schob sich der gesamte Fugenmörtel gitterartig nach außen und die Ziegel zeigten extreme Abplatzungen und Auflösungserscheinungen (Aufnahmen: Pfanner GmbH).

11.1.6.3 Sonderfall Pressfugen

Die beste Fuge ist keine Fuge, denn Fugen sind Schwachpunkte an jedem Gebäude. In der Antike, angefangen von Ägyptern über Assyrer und Babylonier bis hin zu Griechen und Römern, war die »pressfugige« Bauweise beliebt. Sie bedeutet, dass Stein direkt auf Stein gesetzt wird – ohne Mörtel dazwischen. Es bedeutet aber auch, dass der Aufwand für eine solche Mauertechnik unvergleichlich höher ist, denn die Steine müssen planeben aufeinandersitzen. Das geschieht mit zahlreichem Nachschleifen und dem damit verbundenen wiederholten Aufheben und Absenken der Quader. Um nicht die kompletten Lagerflächen glätten zu müssen, werden oftmals nur die Ränder geschliffen, die Innenflächen dagegen als sog. Anathyrose vertieft ausgearbeitet. Passen die Steine nicht genau aufeinander oder verkanten sie beim Absetzen, dann platzen die Ecken ab. Das geschieht auch bei nachträglichen Erschüt-

terungen, da diese Bauweise – wahrscheinlich ihr einziger Nachteil – weniger Bewegungen in den Fugen aufnehmen kann.

Für König Ludwig I. von Bayern (reg. 1824–1848) waren die griechischen Tempel das große Vorbild. Er und seine Architekten orientierten sich an den qualitativsten Bauten der Antike wie dem Parthenon oder dem Erechtheion auf der Akropolis in Athen. Ludwig verlangte in seinen Ausschreibungen rigoros die antiken Pressfugen, auch »Messer-« oder »Knirschfugen« genannt. Die Fugen am Siegestor in München sind von unübertroffener Präzision (Bild 129 a). Aber auch riesige und bis zu 40 Tonnen schwere Blöcke wie bei der Befreiungshalle in Kelheim wurden press versetzt, sogar bei polygonalem Mauerwerk (Bild 129 b–d). Solche Fugen nachträglich mit Mörtel zu verschließen, ist unnütz und schädlich, weswegen er bei der jüngst erfolgten Restaurierung der Befreiungshalle wieder entfernt wurde.



Bild 129: Press- oder Messerfugen

a) Siegestor München b) Polygonal-(Zyklopen-)Mauerwerk an der Befreiungshalle Kelheim
c) und d) Unterbau der Befreiungshalle (Aufnahmen: Pfanner).

11.1.7 Steinersatzstoffe

Die Auswahl der Musterfläche hat gerade für die Erprobung von Steinersatzstoffen mit besonderer Sorgfalt zu geschehen, da sichergestellt sein muss, dass das gesamte Restaurierungskonzept einer Praxisprüfung unterzogen werden kann. Es müssen nicht nur diejenigen Beschädigungen definiert werden, welche ergänzt werden sollen, sondern auch diejenigen, welche nicht ergänzt werden sollen. Konservatorische und ästhetische Erfordernisse sind hier gegeneinander abzuwägen. Ein wichtiges Argument stellt z. B. die Forderung dar, die Funktion wichtiger Bauelemente wie die von Gesimsen wiederherzustellen.

Es muss ferner gewährleistet sein, dass neben größeren Fehlstellen auch kleine Ergänzungen und das Schließen von unterschiedlich breiten Rissen erprobt werden kann.

Die Antragung von Steinersatzstoffen hat mit besonderer Sorgfalt zu erfolgen. Wie bei den Fugenmörteln kann es erforderlich sein, an den im Labor gefundenen Rezepturen gewisse Modifikationen vorzunehmen, um den praktischen Anforderungen besser entsprechen zu können. Restaurator und Naturwissenschaftler sollten auch diesen Erprobungsschritt – ebenso wie vorher die Untersuchungen im Labor – zusammen ausführen.

Der Bewahrung der Originalsubstanz ist die oberste Priorität einzuräumen. Entgegen der bislang üblichen Praxis brauchen die auszubessernden Stellen nicht immer »handwerklich korrekt« ausgespitzt und in Gestalt eines Schwalbenschwanzes o. Ä. präpariert und mindestens 3 cm tief ausgearbeitet werden. In der DIN 18332 Pkt. 3.6.3 ist dies zwar nach wie vor definiert, mit heutigen Steinersatzstoffen ist es ohne Weiteres möglich, die Antragungen bei hinreichend feinem Zuschlagkorn bis »auf Null« auslaufen zu lassen, sodass die Forderung der Denkmalpflege eingehalten werden kann.

Um die gewünschten Ergebnisse zu erhalten, müssen die im Laborversuch ermittelten Verarbeitungsvorschriften genau eingehalten werden. Dass unter Umständen kleinere Korrekturen angebracht sein können, wurde oben bereits erwähnt. Um Schrumpfrisse zu vermeiden, dürfen die Antragungen nicht zu dick ausfallen. Bei Bedarf ist ein größerer Grundmörtel zu unterlegen. Die Antragungen sind entsprechend den Verarbeitungsvorschriften feucht zu halten und vor zu schnellem Austrocknen zu bewahren.

Armierungen dienen primär nicht der Haftung, sondern sie sichern die Antragung gegen Herunterfallen an senkrechten und überhängenden Flächen (Verkehrssicherheit). Hierzu genügen 1–2 Bügel aus Edelstahl, die ausreichend mit Mörtel überdeckt und nicht zu dick sein sollen, da sonst Sollbruchstellen entstehen.

Vorgefertigte bzw. -konfektionierte Ergänzungsmassen besitzen gerne einen großen Anteil an Kunststoffzusätzen, nicht zuletzt aus Gründen der leichteren Verarbeitbarkeit und des schnelleren Abbindens. Auch wenn sie die geforderten Kennwerte erfüllen, sind sie in der Denkmalpflege häufig nicht geeignet. Das betrifft vor allem

exponierte Stellen, die sich bei Regeneinwirkung farblich unpassend und unange-
nehm verändern.

Ergänzungen mit Restauriermörtel haben gegenüber Vierungen den Vorteil, dass der Originalstein nicht ausgearbeitet zu werden braucht. Sie haben den Nachteil, dass sie meist kurzlebiger als Vierungen sind. Das hängt u. a. damit zusammen, dass der Ersatzmörtel beim Abbinden schwindet, sich mit der Zeit Haarrisse auftun und die Haftung am Stein schrittweise verloren geht. Gerade bei größeren Ergänzungen (nach DIN 18332 sollten sie nicht größer als 100 cm² sein) ergeben sich hier die meisten Probleme. Abhilfe kann man mit Inlays in Form von Abgüssen schaffen (Bild 130). Diese Methode ist etwas aufwendiger, aber bedeutend langlebiger. Von der Fehlstelle wird eine Abformung genommen und die Ergänzung wird mit einer geeigneten Masse als Abguss hergestellt. Das Vorgehen lässt sich vereinfachen, wenn die Ergänzungsmasse mit einer dünnen Zwischenfolie direkt aufgetragen wird. Nach dem Abbinden und Aushärten des Abgusses fügt man diesen in die Fehlstelle, die wie bei einer Zahnfüllung (Inlay) mit einer dünnen Klebeschicht aus Dispersion oder Mikrozement bestrichen ist, ein und befestigt ihn durch Anspannen mittels Schraube und Mutter am Stein. Eine Schwindwirkung kann jetzt nicht mehr eintreten und vor allem ist die dauerhafte Befestigung durch den permanenten Anpressdruck gesichert [PFANNER et al. (2010)].

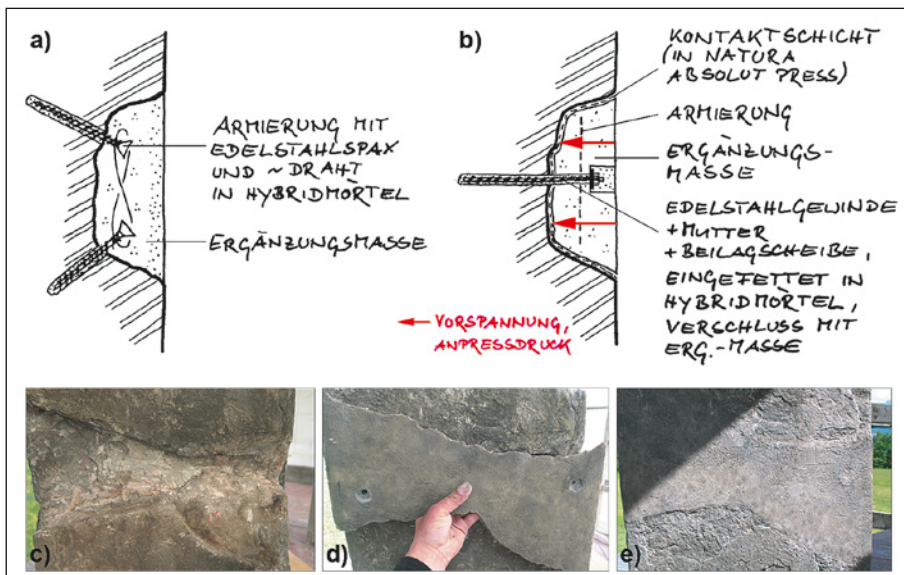


Bild 130: a) Herkömmliche Ergänzung mit Restauriermörtel sowie Schrauben- und Draht-
armierung b) Ergänzung in Form eines armierten Abgusses als Inlay, mit dem Untergrund ver-
schraubt und verspannt c–e) Roßhaupten, Steinernes Kreuz. Links Fehlstelle, Mitte Abguss,
rechts als Inlay eingesetzt und reversibel festgeschraubt (Zeichnungen: L. Reichenbach;
Aufnahmen: Pfanner GmbH)

Größtes Augenmerk ist auf die strukturelle und farbliche Anpassung an den Naturstein zu richten. Bekanntermaßen ist für das Gelingen einer abgestimmten Farbgebung große praktische Erfahrung nötig. Nur in Ausnahmefällen sollte man zur Notlösung einer »Bemalung« greifen. Die Grundfarbe der Ergänzung soll auf das bruchfrische Gestein abgestimmt werden und nicht auf patinierte Oberflächen, da dies bei späteren Reinigungen zu unangenehmen Problemen führen kann. Eine leicht patinierende Farblasur (Retusche) ist allerdings zur Einstimmung der Ergänzungen durchaus sinnvoll.

Um eine sichere Haftung auf dem Naturstein zu gewährleisten, ist dessen Oberfläche bei Bedarf zu festigen oder es sind diverse Klebepunkte zu setzen. In diesem Fall ist zu berücksichtigen, dass die für einen gewissen Zeitraum bestehende hydrophobe Wirkung von Kieselsäureestern zu Verzögerungen im Arbeitsablauf führen kann. Bei der Verwendung von Kieselgel-gebundenen Steinersatzstoffen kann – sofern die Laboruntersuchungen die Notwendigkeit einer solchen Maßnahme begründen – die Nachfestigung mit Kieselsäureester zur Herstellung einer fließenden Übergangszone zum Aufgabenpaket gehören. Ein Beispiel für die gelungene Anpassung einer Kiesel-sol-gebundenen Steinersatzmasse ist in Bild 131 gezeigt.



Bild 131: Antragung von Kiesel-sol-gebundener Steinersatzmasse am Westgiebel von Kloster Birkenfeld

Die als Dokumentation geforderten Angaben sind in Tabelle 22 aufgeführt. Besonders die Materialliste muss vollständige Angaben über Produkte, Zusatzstoffe und die Verarbeitung enthalten. Die angetragenen Stellen sind in einen Plan einzutragen.

Tabelle 22: Dokumentation zu Steinersatzstoffen

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz-Maßnahmen			Gerüst abgehängt, Kunststoffe abgedeckt, Fenster abgeklebt, etc.
5	Untergrund Vorbereitung			Ausspitzen, Aufrauung, Entfernung Schuppen, Festigung, etc.
6	Material			Hersteller, genaue Bezeichnung von Bindemittel, Zuschlag u. Mischungsverhältnis, Pigmente, Zusatzstoffe, etc.
7	Verarbeitung			einlagig – mehrlagig, Aussparung von Fugen, Armierungen etc.
8	Verbrauch			kg
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Angabe der Antragsungen
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

11.1.8 Schlämmen und Putze

Da alle auf anorganischen Bindemitteln basierenden Mörtelsysteme große Verwandtschaft miteinander aufweisen, gelten für Putze und Schlämmen im Großen und Ganzen dieselben Ausführungen wie für Fugenmörtel und Steinersatzmassen.

Die Musterfläche muss so gewählt sein, dass alle zu lösenden Probleme enthalten sind. Insbesondere sind Anschlüsse an Gewände, Gesimse, Ornamente, z. B. unter Blendsbogenfriesen, und selbstverständlich an bereits vorhandene Schlämmen einzubeziehen.

Die ausgeführten Muster sollten nicht zu klein sein, da die Größe der angetragenen Fläche auch das Abbindeverhalten und damit indirekt die Rissneigung beeinflusst. Besteht die Gefahr einer zu schnellen Trocknung, so sind die betreffenden Flächen gegen Sonne und Wind zu schützen und mit feuchten Tüchern abzuhängen. Den Anforderungen der Denkmalpflege folgend sollen historische Verarbeitungstechniken und Oberflächenbehandlungen nachgestellt werden. Dass man auf berechneten Flächen mit reinen Kalkputzen oder Kalkschlämmen keinen dauerhaften Erfolg erzielen kann, wurde schon mehrfach betont. Alle Hersteller führen jedoch in ihrem Programm Schlämmputze von geringer Materialstärke (5 mm), die hinsichtlich ihrer Eigen-

schaften – Reduktion der Wasseraufnahme, geringe Festigkeit, hohe Wasserdampfleitfähigkeit – gut für historisches Natursteinmauerwerk geeignet sind.

Die für eine Begutachtung unentbehrlichen Angaben zur Ausführung der Arbeiten sind in Tabelle 23 zusammengestellt. Die Angaben zur Vorbereitung des Untergrundes müssen sehr genau vermerkt werden. Dass die Material-, Hersteller- und Verbrauchsangaben lückenlos und sorgfältig sind, versteht sich von selbst.

Tabelle 23: Dokumentation zu Schlämmen und Putzen

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz-Maßnahmen			Gerüst abgehängt, Kunststoffe abgedeckt, Fenster abgeklebt, etc.
5	Untergrund Vorbereitung			Ausspitzen, Aufräuerung, Entfernung Schuppen, Festigung, etc.
6	Material			Hersteller, Bindemittel, Zuschlag u. Mischungsverhältnis, Pigmente, Zusatzstoffe, etc.
7	Verarbeitung			Anzahl Auftragsgänge, etc.
8	Verbrauch			kg/m ²
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Bezeichnung der bearbeiteten Flächen
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

11.1.9 Farbanstriche

Um vor unliebsamen Überraschungen sicher zu sein, wird auch die Einbeziehung der Farbmuster als selbstverständlich erachtet. Farbwirkung und Farbdichte lassen sich nur am konkreten Beispiel erkennen. Die Struktur des Gesteins wirkt durch die Farbschicht hindurch, und die sich aus den Befunden ableitenden Farbvorstellungen bedürfen der Bestätigung im Tageslicht und im Zusammenwirken mit der Umgebung. Die Erprobung an der Musterfläche hat den Vorteil, dass die Farbwirkung nicht durch den Schattenwurf des Gerüsts gestört wird.

Je nach Aufgabenstellung kann es aber auch angebracht sein, vor der endgültigen Entscheidung die Dauerhaftigkeit verschiedener Farbsysteme gegeneinander zu testen. Bild 132 zeigt einen Expositionsstand, auf dem unterschiedliche Farbmuster der Bewitterung ausgesetzt sind. Mit einem festgelegten Messprogramm können Veränderungen und Verwitterungserscheinungen bestimmt werden (vgl. Tabelle 15).

Wegen der großen Bedeutung des Substrats wird auch an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass alle Farbsysteme auf dem Originalgestein geprüft werden müssen.

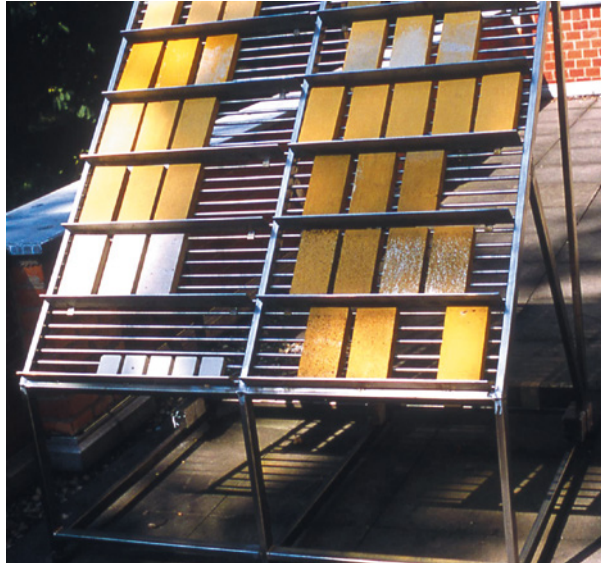


Bild 132: Expositionsstand für die Erprobung verschiedener Farbsysteme auf Naturstein [Brandes & Stadlbauer (1995); Aufnahme: Ch. Herm]

Daneben kommt es auch auf die Erprobung der vorgeschriebenen Maltechnik an, was die praktische Anwendung zwingend erforderlich macht. Im Falle der Kalktechnik wäre beispielsweise zu prüfen, wie viele Anstrichvorgänge übereinander gelegt werden müssen, um die gewünschte Deckkraft zu erreichen. Die Struktur der Farbschicht ist durch geeignete Füllstoffe an den Vorgaben auszurichten, die Art des Anstrichs, ob deckend oder lasierend, ist mit Mustern zu erproben. Schlussendlich ist natürlich auch die Farbtönung der Farbschicht anhand mehrerer Muster zu erproben.

Als eine spezielle Art des Farbauftrags sind auch die Retuschen an der Musterfläche zu testen. Mit ihnen werden Fehlstellen in bestehenden Farbfassungen geschlossen, sodass ein einheitlicher Gesamteindruck wiederhergestellt wird.

Weil die Saugfähigkeit von Natursteinen sehr unregelmäßig sein kann, muss vor dem eigentlichen Farbanstrich eine Grundierung aufgebracht werden, damit der Farbauftrag gleichmäßig geschehen kann. Für Ölfarben, Silikatfarben und Silikonharzemulsionsfarben gelten jeweils andere Vorschriften, die im Kapitel 9.6 erläutert sind oder aus den Datenblättern der Hersteller entnommen werden können.

Bei der Verwendung von marktgängigen Farben sollte man sich danach erkundigen, ob von früheren Anstrichen noch Muster oder Rezepturen bei der ausführenden Firma oder der Lieferfirma vorhanden sind. Da von den Herstellern einschlägige Informationen erhältlich sind, kann hier auf die Erläuterung von Verarbeitungsvorschriften verzichtet werden.

Tabelle 24: Dokumentation zu Farbanstrichen auf Naturstein

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz- Maßnahmen			Gerüst abgehängt, Kunststoffe abgedeckt, Fenster abgeklebt, etc.
5	Untergrund Vorbereitung			Reinigung, Festigung, Entfernung Schuppen, Ätzung, biozide Behandlung etc.
6	Material			Hersteller, genaue Bezeichnung von Bindemittel, Füllstoffen, Pigmenten, Zusatzstoffen, etc.
7	Verarbeitung			Geräte, Anzahl Auftragsgänge, etc.
8	Verbrauch			kg/m ²
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Bezeichnung der Flächen
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

Für die Dokumentation der Maßnahme ist in Tabelle 24 eine Reihe von Fragen zusammengestellt, die vollständig beantwortet werden müssen. Neben den Angaben über die Farbsysteme und deren Bestandteile verdienen besonders die Hinweise über die Vorbereitung des Untergrundes Beachtung. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass z. B. Flechten nicht überstrichen werden dürfen, da das Quellen und Schrumpfen der organischen Substanz unter Feuchteinfluss zum baldigen Abplatzen der Farbschicht führt. Flechten müssen deshalb vorher beseitigt werden, wofür als erster Behandlungsschritt eine biozide Behandlung nötig sein wird, um die Flechten abzutöten. Danach können sie zumeist mit einem Skalpell sorgfältig abgeschabt werden. Im Einzelfall mag es angebracht sein, die Farbmuster über längere Zeit zu beobachten, um das Aussehen bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen oder um das Verhalten gegenüber Salzen zu studieren.

11.1.10 Hydrophobierung

Die Erprobung der in den Laborversuchen bestimmten Mittel an Probeflächen verfolgt mehrere Ziele. Zuerst soll das Mittel mit der besten Wirksamkeit gefunden werden, zusätzlich aber auch die bestgeeignete Applikationsmethode und die Anwendungszeit festgelegt werden. Das zweite Ziel kann unter Umständen eine Reihe von Probeflächen erfordern, sofern mehrere Applikationsgeräte, wie sie in Tabelle 19

genannt sind, getestet werden müssen. Für die Ausführung sind einige Regeln einzuhalten.

Am Tag der Anwendung darf das Gestein, auch unterhalb der Oberfläche, nicht feucht sein, damit die erforderlichen Eindringtiefen überhaupt erreicht werden können. Diese Forderung verlangt eine ausreichend lange Trocknungszeit für das Gestein. Es kann deshalb ratsam sein, den betreffenden Fassadenabschnitt schon lange vor der Maßnahme mit Planen gegen Regen zu schützen und den Feuchtegehalt im Bohrloch mit Feuchtemesssonden zu kontrollieren. Allgemein verbindliche Angaben über die einzuhaltenden Trocknungszeiten können aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren nicht gemacht werden. Da die Trocknungsgeschwindigkeit ungefähr 25-mal langsamer verläuft als das kapillare Aufsaugen, kann man sich grob ausrechnen, dass unter Umständen ein wochenlanger Trocknungsprozess erforderlich ist.

Bei der Beurteilung des Feuchtegehalts im Gestein sind aber nicht nur Regenereignisse, sondern auch Phasen mit hoher Luftfeuchte zu berücksichtigen. Mögliche Risiken können durch eine Messung der Sorptionsisotherme erkannt werden, die vor allem auf stärkere Durchfeuchtungen bei Gegenwart von Salzen hinweist.

Da nicht nur, aber vor allem wegen hygroskopischer Salze die Gesteinsfeuchte beträchtlichen Schwankungen unterliegen kann, kann nur die Bestimmung der Sorptionsisotherme Gewissheit darüber geben, unter welchen Bedingungen das Gestein für eine Behandlung ausreichend trocken ist. Es wird deshalb empfohlen, die Sorptionsisotherme sowohl bei der Anlage der Musterfläche als auch später bei der endgültigen Maßnahme zu berücksichtigen.

Die Anwendungstests an der Musterfläche sollen aus den genannten Gründen neben den Verarbeitungsvorschriften auch die zulässigen Umgebungsbedingungen und Gesteinsfeuchten berücksichtigen. Die Verarbeitungshinweise der Hersteller sind deshalb genau zu befolgen. Außerhalb des geeigneten Temperaturbereichs zwischen 10 und 25 °C darf nicht behandelt werden, da die Hydrophobierungsmittel bei zu tiefen Temperaturen zu träge reagieren, bei zu hohen Temperaturen dagegen ihr Dampfdruck so hoch ist, dass ein Großteil des Wirkstoffs verdunstet.

Tabelle 25: Dokumentation zur Hydrophobierung

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
1	Firma			Name der ausführenden Firma
2	Ausführung			Ausführungszeitraum
3	Klimadaten			Temperatur, Luftfeuchte, Regen etc.
4	Schutz-Maßnahmen			Gerüst abgehängt, Kunststoffe abgedeckt, Fenster abgeklebt, etc.
5	Methode			Bezeichnung des Gerätes, z. B. Airless o. a.

Tabelle 25 (Fortsetzung)

Nr.	Art	Angabe	Attest ja/nein	Beispiel
6	Material			Hersteller, genaue chemische Bezeichnung
7	Verarbeitung			Art und Dauer der Anwendung (sequentiell, kontinuierlich, diskontinuierlich), Anzahl der Flutungen
8	Verbrauch			l/m ²
9	Dokumentation			Arbeitsfotos, Plan mit Angabe der behandelten Flächen
10	Bewertung			alle neun Felder müssen das Attest »ja« erhalten

Die Dokumentation muss alle in Tabelle 25 geforderten Angaben vollständig enthalten. Die verwendeten Mittel sind mit Produktnamen, Wirkstoffgehalt, Lösungsmittel, Verdünnung und Verbrauch genau aufzulisten. Die Applikationsmethode ist sorgfältig zu beschreiben. Eine grafische Dokumentation der Testflächen auf einem Plan wird zu bevorzugen sein.

11.1.11 Konstruktiver Regenschutz

Der prophylaktische Schutz von neuen und alten Gesimsen durch Blechabdeckungen stellt eine sinnvolle und nachhaltige Maßnahme dar, wie sie seit Jahrhunderten gepflegt wird. Optische und ästhetische Bedenken sollten, wenn es um den Erhalt der Substanz geht, dabei hintenanstehen. Kupfer und Walzblei sind die gebräuchlichsten historischen Blechverwahrungen. Die modernen hellen Bleche aus Titanzink sind aus Sicht der Denkmalpflege in aller Regel abzulehnen. Blei eignet sich besonders gut, weil es erstens von alters her verwendet wird und weil es zweitens sich mit seinen runden Formen gut dem Bestand anpasst und zudem schnell eine angenehme und unauffällige Patina annimmt (Bild 133).

Die Schwermetalle Kupfer und Blei sind giftig. Sie sind aber nach wie vor in Deutschland im Bauwesen und speziell bei historischen Denkmälern erlaubt [PFANNER & PFANNER (2007), S. 185 f.]. Grundsätzlich muss man bei Dächern aus Blei, Zink und Kupfer, meistens ab einer Größe von 50 m², die lokalen Vorschriften in Hinblick auf den Umgang mit Regenwasser beachten. Einheitliche Regelungen existieren nicht. Besonders bei Versickerung wird eine Reinigung des Regenwassers von den ausgeschwemmten Metallionen gefordert. Dies kann auf verschiedene chemisch-physikalische Weisen geschehen, z. B. durch absorbierende Filtermaterialien oder einen Ionentauscher. Das Bayerische Landesamt für Umwelt verlangt hierzu eigens zugelassene Produkte.



Bild 133: Bleiverblechung am Münchener Siegestor von oben und vom Boden aus betrachtet (Aufnahmen: Pfanner).

Fehlende Blechabdeckungen können beispielsweise auf oder unter exponierten Gesimsen zu gravierenden Schäden führen (Bild 134 a und b). Ebenso große Schäden rufen aber auch falsche Befestigungen der Bleche hervor. Die im Natursteinbereich berichtigten Spreizdübel sprengen jeden Stein (Bild 134 c). Zu nahe an der Vorderkante befindliche Dübel führen, auch wenn sie in Blei gebettet sind, zu ähnlichen

Abscherungen (Bild 134 d). Weil sich Bleibleche auf Dauer verformen und stark ausdehnen, müssen sie genügend Bewegungsfälze haben und zudem meist von einem Vorstoßblech aus Zink, Kupfer oder Edelstahl fixiert werden, um die Tropfkante stabil zu halten. Zwischen Walzblei und Stein liegt eine Trennlage – nicht aus Bitumen, da dieses das Blei angreift. Zu Bleiverwahrungen siehe das vorzügliche Handbuch »Blei im Bauwesen«, herausgegeben von der BLEIBERATUNG e. V. (1995–2003).

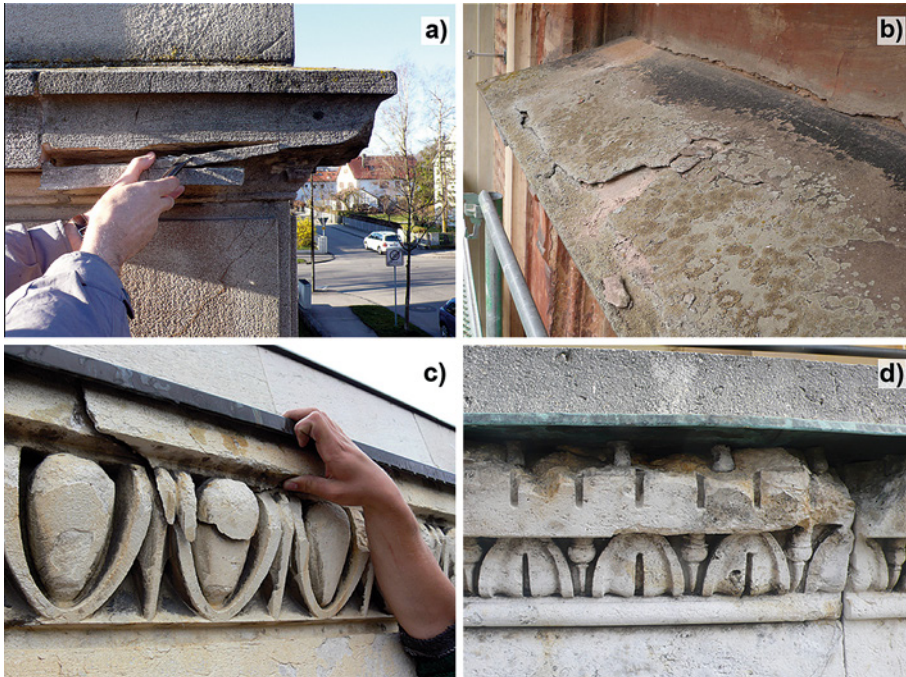


Bild 134: Schäden an ungeschützten Gesimsen: Mindelheim, Finanzamt (a) und Augsburg, Krankenhaus Vincentinum (b). Schäden durch Dübel an der Vorderkante: München, Propyläen (c) und Kelheim, Befreiungshalle (d)

Ein kritischer Schwachpunkt ist die Einbindung der Bleche beim Anschluss an die Wand. Da sich das Metall anders bewegt und dehnt als Mauerwerk und Fugenmörtel, kommt es zu Abrissen und in der Folge zu Hinterspülung. Hier mit Silikonmasse »dauerelastisch« abzudichten, wie es in der Praxis gang und gäbe ist, ist weder denkmalpflegerisch gewünscht noch bautechnisch von langer Dauer. Am besten ist der Anschluss mit einer Kappleiste und mit Bleiwolle (Bild 135 a), wobei die Bleiwolle, die immer fest eingehämmert werden sollte, bei weichen Sandsteinen zu Kantensprengungen führt. In einem solchen Fall kann eine mineralische Fuge mit Gleitschicht (Kunststoff-Folie o.Ä.) eine einfache und vor allem kostengünstige Alternative darstellen (Bild 135 b).

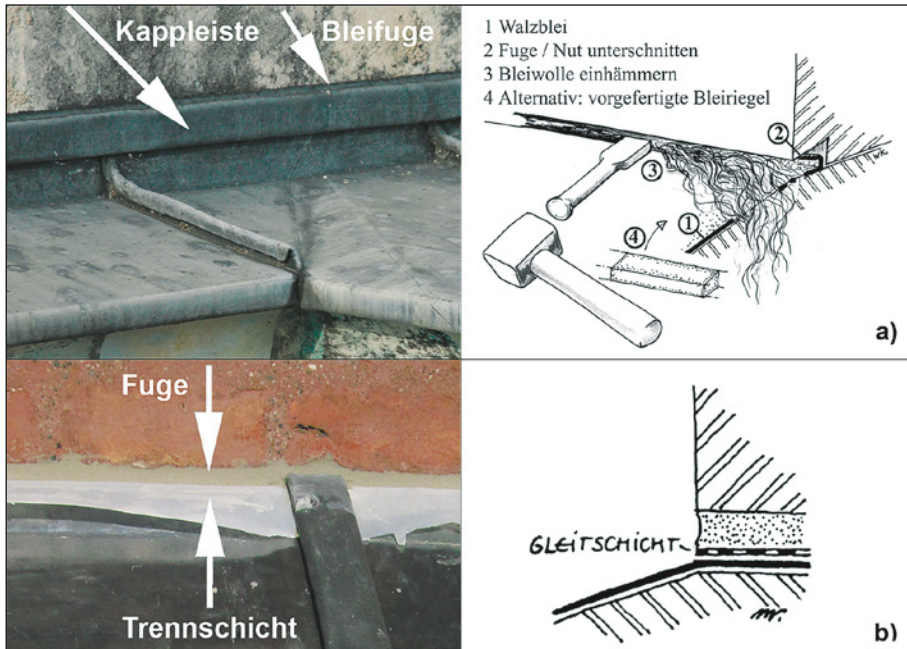


Bild 135: Wandanschlüsse. a) Bleiabdichtung mit Kappleiste und Herstellung einer Bleifuge. b) Anschluss an die Wand mit Gleitfuge, bei der ein Gleitstreifen zwischen Metall und Fugenmörtel eingelegt wird, sodass sich das Blech frei bewegen kann.

Spreizdübel zur Befestigung der Bleche (Bild 136 c: A) machen deswegen Probleme, weil sie Zugspannungen entfalten, denen der Naturstein nicht gewachsen ist (Bild 136 a). Alternativen sind Dübel und Schrauben, die nahezu ohne Spreizwirkung auskommen (Bild 136 c: B und C). Hier sind vor allem Hinterschnittdübel zu nennen. Noch einfacher und kostengünstiger sind Verbunddübel, die eingeklebt werden. Fettet man sie vor dem Eindrehen zusätzlich ein, können sie sogar leicht wieder herausgedreht werden und entwickeln zudem kaum Zugspannungen (Bild 136 b). Die seit einiger Zeit auf dem Markt befindlichen Schraubanker rufen beim Naturstein u. U. eine Sprengwirkung hervor.

Der große Architekt Leo von Klenze (1784–1864) machte sich bei der Befreiungshalle in Kelheim viele Gedanken um die Verblechung der Steine, wie seine eigenhändigen Detailzeichnungen belegen. Er wusste um die Problematik der Blechbefestigungen und Anbindungen. Er stellte deshalb die oben umlaufende Steinbalustrade direkt auf das Kupferblech und ließ für die Falze eigene Aussparungen in den Stein arbeiten (Bild 136 d). Das System funktioniert seit 150 Jahren! Zu Verblechungen, Blechbefestigungen und -anbindungen siehe PFANNER & PFANNER (2007); PFANNER (2011).

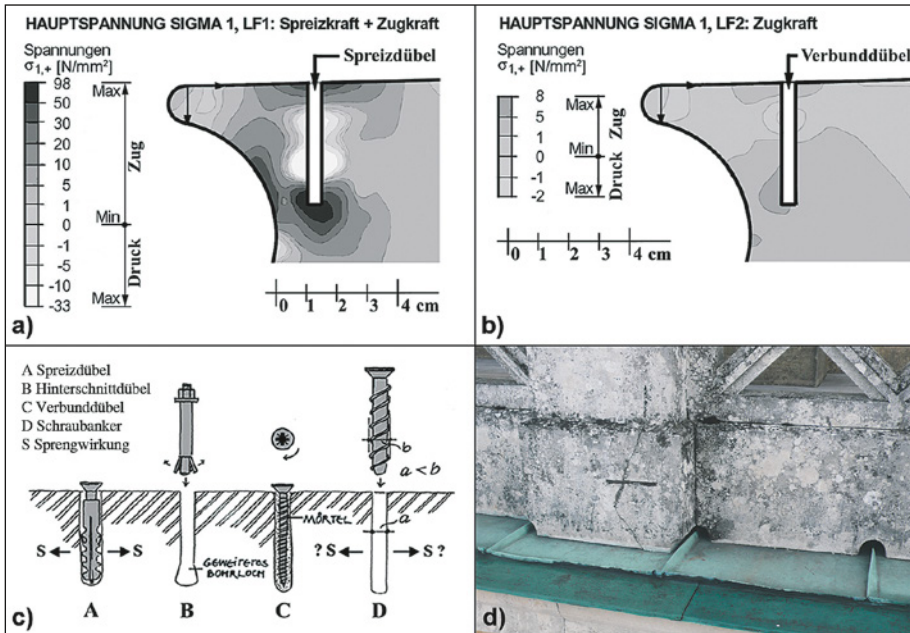


Bild 136: Blechbefestigungen und -anschlüsse. a) Spreizdübel führen zu Zugspannungen und Sprengwirkung und sind ungeeignet. b) Verbunddübel sind nahezu spannungslos eingeklebt und sind geeignet. c) Verschiedene Arten von Schraub- und Dübelbefestigungen. d) Kelheim, Befreiungshalle. Die Steinbalustrade steht direkt auf dem Kupferblech und umgeht damit eine schadensanfällige Blechanbindung.

11.1.12 Prophylaktischer Schutz gegen Graffiti

Graffiti sind auch auf Denkmälern schon seit mehreren Jahren zu einem sehr ernsthaften Problem geworden. Die Farbstoffe dringen schnell in das poröse Steinmaterial ein und können dann nicht mehr ohne Substanzverlust entfernt werden. Aus diesem Grund bleibt zumeist nichts anderes übrig, als die an der Oberfläche zugänglichen Graffiti-Farben zu entfernen und die bleibenden Verfärbungen des Gesteins durch einen lasierenden Anstrich im Farbton des Gesteins zu kaschieren. Zur Reinigung werden stark Tensid-haltige Reinigungspasten in Verbindung mit Heißdampf eingesetzt. Eine mehrmalige Anwendung ist in fast allen Fällen erforderlich.

Um die Haftung des Graffiti auf den Steinoberflächen zu verhindern, stehen seit mehreren Jahren Schutzbeschichtungen zur Verfügung. Man unterscheidet zwischen permanenten und nicht permanenten Beschichtungssystemen. Die nicht permanenten Schutzbeschichtungen bestehen aus Polysacchariden, welche den Vorteil haben, bei Bedarf sich leicht mit Dampfstrahl entfernen zu lassen. Ihre Wirksamkeit über Jahre hinaus ist allerdings nicht gewährleistet. Bei den permanenten Beschichtungen handelt es sich um Polymerlacke, meist auf Basis von Polyurethanlacken oder

Acryllacken. Sie sind zwar verwitterungsstabil, ästhetisch aber nicht zufrieden stellend, da sie der Oberfläche häufig einen unerwünschten Glanz verleihen.

Andere Schutzsysteme bauen auf einer zweilagigen Schutzschicht auf. Als Grundlage wird ein Überzug mit sowohl oleophoben (Silane mit fluorierten Alkylgruppen) als auch hydrophoben (Silane mit Alkylgruppen) Eigenschaften aufgetragen. Dieser Überzug ist wie eine Öl-in-Wasser-Emulsion aufgebaut mit Tensid-Co-Tensid Komponenten. Er ist sperrend gegen flüssiges Wasser und Öle. Als Deckschicht folgt noch eine dünne Wachsschicht, welche zusätzlich das Eindringen des Farbsprays verhindert. Wird ein Graffito aufgesprüht, ist es leicht zusammen mit der Wachsschicht durch Heißdampf zu entfernen. Die Wachsschicht wird dann neu aufgetragen. Dieserart Produkte im Handel zu finden, dürfte nicht ganz einfach sein, zumal sie in den USA entwickelt wurden.

11.2 Auswertung der Musterfläche (Probefläche)

11.2.1 Allgemeines

Die Auswertung der Musterfläche soll von einem qualifizierten Untersuchungslabor in Verbindung mit dem Restaurator ausgeführt werden. Es dürfte von Vorteil sein, wenn es sich dabei um das gleiche Labor handelt, welches bereits die Laboruntersuchungen durchgeführt hat. Zur Anwendung kommen diejenigen Untersuchungsmethoden, die der Projektausschuss in seiner dritten Sitzung (P 3) beschlossen hatte. Weitere, in der Sitzung noch nicht festgelegte Untersuchungen sollten nur durchgeführt werden, wenn hierfür schwerwiegende Gründe maßgebend sind, die bis dahin nicht berücksichtigt werden konnten. Bei der Auswahl der Methoden ist darauf zu achten, dass die Untersuchungen substanzschonend und insoweit bereits erprobt sind, dass sie auch in Zukunft für spätere Kontrollmessungen noch geeignet sind. Die Anzahl der Untersuchungen und der dafür benötigte zeitliche Rahmen für die Laborarbeiten können sehr umfangreich sein. Die Vielfalt und das Ausmaß der Analysen wird anschaulich in SATTLER & WENDLER (1989); WENDLER & SATTLER (1990, 1991); SNETHLAGE et al. (1996 b, c, d) gezeigt. Von besonderem Nutzen ist in diesem Zusammenhang der im Rahmen eines DBU-Projekts erarbeitete Leitfaden Naturstein-Monitoring [AURAS et al. (2010)], auf den im Abschnitt 15 »Nachkontrolle und Wiederbehandlung« näher eingegangen wird.

Die Bewertung der an der Musterfläche durchgeführten Maßnahmen erfolgt prinzipiell nach den gleichen Kriterien, die bereits bei den Laborversuchen Anwendung gefunden haben. Es ist deshalb ausreichend, sich an dieser Stelle auf wenige, kurze Ausführungen zu beschränken. Nur über die Reinigung sind ausführlichere Bemerkungen erforderlich, da hier sinnvolle Testreihen nur an der Musterfläche und nicht im Labor möglich sind.

11.2.2 Reinigung

Die schonende Ausführung einer Reinigung kann mit den in Tabelle 26 aufgeführten Methoden überprüft werden. Am Anfang steht zunächst die visuelle Wahrnehmung mit dem bloßen Auge oder mit der Lupe. Mit diesen Hilfsmitteln kann man erkennen, ob der Schmutzabtrag gleichmäßig erfolgt ist oder ob das Reinigungsverfahren zwischen leicht und schwer entfernbaren Bereichen der Schmutzschicht differenziert hat, was im Grunde nicht wünschenswert ist.

Tabelle 26: Qualitätsprüfungen für die Natursteinreinigung. Musterfläche

Methoden	Geräte/Normen	Bewertung
Optische Prüfung	Auge, Foto, Lupe	Vergleich gereinigt – ungereinigt – original, Farbkarte, Materialverlust, Kantenrundungen, Offenporigkeit
Mikroskopische Prüfung	Stereomikroskop, REM	Rauheit qualitativ, Offenporigkeit, Materialverlust, Feinabrieb, Kristallzertrümmerung
Farbkarte	DIN 6164	standardisierte Fotografie, Vergleich mit unverschmutzter Oberfläche, besonders für Langzeitkontrolle
Farbmessung	Farbmessgerät DIN 5033, ISO 11664-4	Dreibereichsverfahren, Farbwerte in CIE-LAB Konstanten, bes. geeignet für Langzeitvergleich
Oberflächenrauheit	Tastschnittgerät, Trace-It DIN 4760, ISO 3274, ISO 4287, ISO 4288	Rautiefen Ra, Rz, Rmax, Pc: Anzahl der peaks $> \times \mu\text{m}$, Abbott-Kurve Vergleich ungereinigt – gereinigt – original
Wasseraufnahme	w-Wert Karsten'sches Prüf- röhrchen	Vergleich ungereinigt – gereinigt – original Offenporigkeit
Wasserdampf- diffusion	μ -Wert Bohrkernscheiben	Vergleich ungereinigt – gereinigt – original
Salzprofil	wasserlösliche Ionen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-	Salzgehalt der Oberfläche und Tiefenprofil, Vergleich ungereinigt – gereinigt – original

Für die genauere Beobachtung stehen das Mikroskop oder in Einzelfällen das Rasterelektronenmikroskop (REM) zur Verfügung. Sie gestatten eine Beurteilung, inwieweit beispielsweise Schmutzpartikel aus den Grobporen entfernt werden konnten, ohne die Oberfläche abzutragen, oder ob durch zu hartes Strahlgut oder zu hohen Druck Einzelkristalle an der Oberfläche zertrümmert wurden. So konnten ETL & SCHUH (pers. Mitteilung) in einer Untersuchung von Reinigungsmustern am Neuen Rathaus in München zeigen, dass die Anwendung von Korund als Strahlmittel zu einer

Zertrümmerung der Calcitoberflächen des Kalksteins geführt hatte, während die Oberflächen durch Calcitpulver und Glasschlackenpulver nicht beschädigt wurden.

Um das Hauptziel der Reinigung, die Senkung des Risikopotentials der Schmutzkruste, bewerten zu können, sind aber die Messungen der Feuchtetransporteigenschaften des Gesteins und die Analyse des Salzgehalts besser geeignet.

Nach der Reinigung sollten der w-Wert und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ annähernd den Werten des unverwitterten Gesteins entsprechen. Der Salzgehalt der Oberfläche sollte – in den fraglichen Fällen – gemindert sein und nur unwesentlich von dem im Gesteinsinneren abweichen. Liegen sensible Oberflächen vor, deren zeitliche Veränderung nach der Reinigung zuverlässig beobachtet werden soll, so sind quantitative Farbmessungen in Anlehnung an die genannten DIN-Bestimmungen oder genormte Farbaufnahmen mit Farbkarten unerlässlich.

Auch die Oberflächenrauheit kann als Qualitätskriterium herangezogen werden. Entschließt man sich zu dieser Messmethode, sollte man nicht überrascht sein, dass die Rauheit als Folge der Reinigung zugenommen hat, weil die Schmutzablagerungen von der Oberfläche und aus den Kornzwischenräumen entfernt worden sind. Das Gestein wird deshalb die seiner natürlichen Struktur entsprechende Rauheit aufweisen. Diese dürfte aber in den meisten Fällen von der vom Künstler oder Baumeister gewünschten Oberflächenbeschaffenheit abweichen. Es stellt sich deshalb in der Praxis häufig das Problem, eine Vergleichsfläche zu finden, die noch den Originalzustand zeigt. Da an historischen Objekten alle exponierten Oberflächen bereits einen mehr oder weniger starken Abtrag erfahren haben, dürften Flächen mit einer originalen Oberfläche wahrscheinlich nur noch unter schützenden Gesimsen zu finden sein. Die Messung der Rauheit kann deshalb vor allem zur Unterscheidung der erprobten Reinigungsmethoden dienen. Schärfere Reinigungsmethoden führen zu einer stärkeren Aufrauung als sanfte.

Auf die Feinheiten der Rauheitsmessung kann hier nicht näher eingegangen werden. Eine Einführung ist im Leitfaden Naturstein-Monitoring [SIMON in AURAS et al. (2010)] nachzulesen. Es sei jedoch angemerkt, dass die mechanischen Perthometer, welche nur eine Linie messen, wenig Aussagekraft besitzen, da diese Messmethode eigentlich für rotationssymmetrische Objekte entwickelt worden ist. Das Messergebnis ist zudem natürlich von der verwendeten Tastspitze abhängig, welche eine Kugel- oder Nadelform besitzen kann.

Viel besser geeignet sind flächenhafte Messungen der Rauheit, z. B. mit dem Gerät Trace-It, welche sowohl den optischen Eindruck, wie er vom menschlichen Auge wahrgenommen wird, als auch die physikalische Topografie der Oberfläche bestimmen können. Ersterer ist entscheidend für die Akzeptanz des Reinigungsergebnisses durch den Restaurator und Denkmalpfleger. Die physikalische Topografie beinhaltet die Messung der gängigen Rauheitsparameter (R_{\max} , R_z , R_a u. a.) sowie die Detektion von Poren und Rissen. Mit der Funktion »Effektive Oberfläche« kann die Gefährdung von gereinigten Oberflächen durch chemische Agenzien abgeschätzt und verglichen

werden. Je größer die effektive Oberfläche ist, desto größer ist die Gefährdung durch chemische Umweltschadstoffe und umso schneller wird die Wiederverschmutzung von statton gehen. Das Trace-It ist jüngst erfolgreich zur Bestimmung von aktiver mikrobiologischer Besiedlung eingesetzt worden. Das Messverfahren selbst als auch die Anwendung für mikrobiologische Fragestellungen werden ausführlich in FIDA (2018) abgehandelt.

Bei Kalksteinen und Marmor treten mitunter sowohl nach einer Trockenreinigung als auch nach einer Nassreinigung bräunliche Verfärbungen auf der hellen Oberfläche hervor. In den meisten Fällen sind diese Verfärbungen nicht durch die Reinigung verursacht. Es handelt sich dabei meist um wasserlösliche, verseifte organische Verbindungen, die aus Kohlenwasserstoffen in der Schmutzkruste entstanden und bereits vor der Reinigung vorhanden gewesen sind. Es wäre also falsch, diese optische Beeinträchtigung der ausführenden Firma anzulasten. Es kann aber auch sein, dass man eine Leinöltränkung freigelegt hat, welche entweder als Vorbehandlung einer Farbfassung oder als Tränkung zu Schutzzwecken appliziert wurde. Solche Befunde können je nach Objekt eine große Bedeutung für die Rezeptions- und Konservierungsgeschichte haben.

Die Anforderungen an eine Reinigung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Schmutzkrusten besitzen je nach Gestein und Exposition am Bauwerk eine unterschiedliche Zusammensetzung. Sie erfordern deshalb ein der jeweiligen Aufgabenstellung angepasstes Vorgehen. Aus diesem Grund können keine allgemeinen Empfehlungen für geeignete Reinigungsmethoden gegeben werden.
- Aufgrund ihrer geologischen Unterschiede sind Sandsteine und Kalksteine sowie Marmor auch bei der Reinigung unterschiedlich zu beurteilen.
- Sandsteine, durchaus aber auch porenreiche Kalksteine sind häufig durch die Verwitterung so in Mitleidenschaft gezogen, dass vor der Reinigung eine Vorfestigung ausgeführt werden muss, um lockere Schuppen nicht zu gefährden. Hat sich schon eine dickere Kruste gebildet, so besteht häufig die Gefahr, dass die sich unter ihr befindenden Kornlagen zusammen mit der Kruste entfernt werden.
- Grobporige Sandsteine sind des Öfteren sogar einige Millimeter tief in die Poren hinein verschmutzt. In diesem Fall kann eine Reinigung selbstverständlich nicht zu einer hellen Oberfläche führen, da nur mit der vollständigen Abtragung der Oberflächenzone alle Schmutzablagerungen entfernt werden könnten. Die Ausdünnung der Verschmutzung ist jedoch im Allgemeinen ausreichend, die Poren zu öffnen, den Feuchtetransport wiederherzustellen und die Salzbelastung zu vermindern.
- Bei Kalksteinen ist in vielen Fällen die Schmutzkruste intensiv mit der Steinoberfläche verwachsen, die im fortgeschrittenen Stadium der Krustenbildung selbst nur noch durch Gips zusammengehalten wird. Es ist deshalb erforderlich, durch mikroskopische Untersuchungen an Querschnitten die Lage der originalen Oberfläche und damit den Grad der Reinigung zu bestimmen. Sind Kruste und Stein noch fest miteinander verbunden, genügt in den meisten Fällen eine Ausdünnung

der Schmutzkruste zur Beseitigung der Risikofaktoren. Hat sich dagegen an der Unterseite der Kruste bereits eine Mürbzone gebildet, ist die Reinigung so sorgfältig durchzuführen, dass von der puderigen Gesteinsoberfläche so viel wie möglich erhalten bleibt, sodass nach der Reinigung eine Festigung der Kalksteinoberfläche vorgenommen werden kann.

- Im Fall von Marmorskulpturen ist zu bedenken, dass unter einer schwarzen Kruste die »integrale Strukturauflösung« bereits so weit fortgeschritten sein kann, dass bei einer Reinigung die Gefahr eines großen Materialverlustes droht. In diesen Fällen kann natürlich erst nach der Festigung gereinigt werden, sodass der übliche Ablauf einer Konservierung verändert werden muss.
- Polierfähige Kalke mit dichtem Gefüge weisen ähnliche Probleme auf. Wenn sich noch keine Mürbzone gebildet hat, welche die Kruste unterlagert, muss die Reinigung so sorgfältig ausgeführt werden, dass die Originaloberfläche freigelegt wird, ohne dass deren Struktur in Mitleidenschaft gezogen wird. Bei bereits bestehender Mürbzone ist genauso wie bei nicht polierfähigen Kalksteinen (siehe oben) zu verfahren.
- Nach dem heutigen Stand der Technik kann bei der Reinigung von Sandsteinen eine Präzision im Rahmen von einer Kornlage gefordert werden; ein größerer Substanzverlust bedeutet die Wahl einer falschen Reinigungsmethode und darf nicht hingenommen werden.
- Bei Kalksteinen, z. B. bei Muschelkalk oder verschiedenen Arten von Jurakalk, ist oft bereits das Ausdünnen der Kruste ausreichend. Auf keinen Fall dürfen Calcitkristalle an der Oberfläche durch zu harte Strahlmittel zertrümmert werden.
- Moderne Reinigungsmethoden erlauben ein so sorgsames Vorgehen, dass Oberflächenabtrag und Kantenrundungen vermieden werden können. Bei Marmor darf eine vorhandene Restpolitur nicht abgestumpft werden.

11.2.3 Festigung

Im Grunde handelt es sich bei den Untersuchungen zur Steinfestigung um dieselben Methoden, die bereits im Zuge der Laborversuche zur Auswahl der Festiger für die Musterfläche eingesetzt wurden.

Am Beginn steht die Kontrolle der visuellen Erscheinung der behandelten Flächen. Es darf kein Glanz oder Grauschleier sichtbar sein. Eine gewisse Dunklung kann auftreten, darf jedoch ein hinnehmbares Maß nicht überschreiten. Ein objektives Kriterium für diesen Befund gibt es nicht, sodass nach dem visuellen Empfinden entschieden werden kann.

Der w-Wert und der B-Wert der behandelten Flächen werden im Vergleich zu den unbehandelten Flächen am besten mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen bestimmt, da diese Methode ein dichtes Messraster zulässt, ohne dass Bohrkern entnommen zu werden brauchen. Es kann sich jedoch als zweckmäßig erweisen, zur Absicherung der Karsten-Messungen auch einige wenige Kerne zu ziehen. Die Anforderungen sind den

Ausführungen zum Arbeitsschritt 9, Teil 2 und Tabelle 7 zu entnehmen. Die Werte nach der Behandlung werden zwar niedriger als die des unbehandelten Gesteins liegen; sie sollen jedoch nicht zu stark von den Ausgangswerten abweichen, da ansonsten der Verdacht auf eine Verdichtung der Oberflächenporen nahe liegt.

Wichtiger als die beiden vorangegangenen Messungen ist die Bestimmung der Eindringtiefe, die verlässlich nur mit Hilfe von Festigkeitsmessungen ermittelt werden kann. Trotz der Beschädigung durch Bohrlöcher sollte zumindest ein Bohrkernprofil pro Testquader gemessen werden, damit der Verlauf von Festigkeit und E-Modul angegeben werden kann.

Ergänzende Bestimmungen können mit der Bohrhärteprüfung durchgeführt werden, die nur sehr kleine Löcher hinterlässt, die bei rauen Gesteinen mit dem bloßen Auge kaum wahrnehmbar sind. Ein Beispiel für den Verlauf von Bohrhärteprofilen vor und nach der Festigung ist in Bild 137 wiedergegeben. Im oberflächennahen Bereich sind die entfestigten und gefestigten Zonen klar zu erkennen.

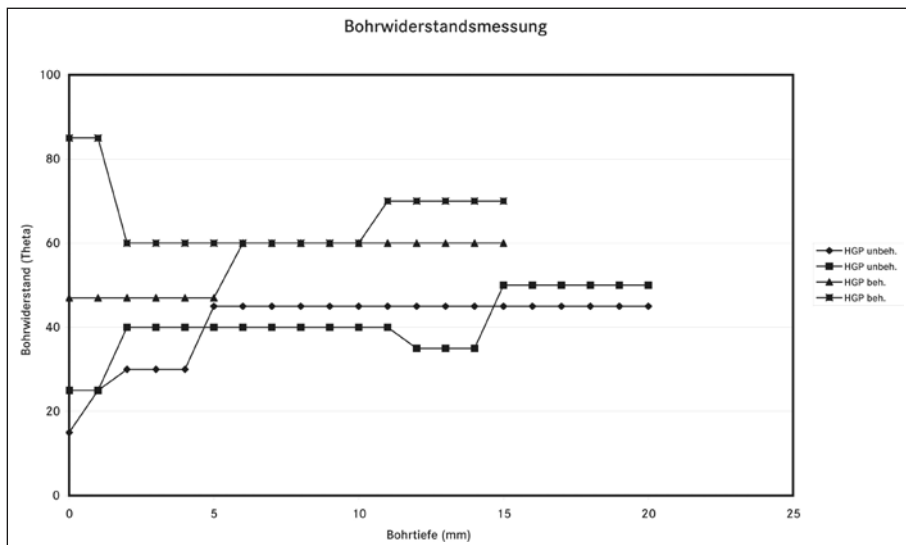


Bild 137: Verlauf von Bohrhärteprofilen vor und nach einer Festigung. Die Skala der Bohrhärte entspricht dem Neigungswinkel in der aufgezeichneten Bohrwiderstandskurve [mit freundlicher Genehmigung E. WENDLER (1996)].

Um die Anzahl der Bohrkernprofile so gering wie möglich zu halten, wird eine Kombination von Bohrkernprofilen und Bohrhärtemessungen vorgeschlagen, um das Ergebnis auf möglichst viele Messwerte stützen zu können.

Einen qualitativen Hinweis auf die Eindringtiefe kann man bei Kieselsäureestern, die mit Zinn-organischen Verbindungen katalysiert sind, auch mit Hilfe eines Zinn-spezifischen Indikators erhalten, der eine rötlich-braune Färbung anzeigt.

Die Methode ist aber im Normalfall nur bei hellen Gesteinen zu verwenden, da z. B. auf rötlichen oder bräunlichen Sandsteinen der Farbumschlag nicht mehr erkennbar ist. Es sei auch nochmals betont, dass aus der bloßen Bestimmung der Eindringtiefe die Wirksamkeitstiefe, also die Tiefe der Festigkeitssteigerung, nicht mit Sicherheit abgeleitet werden kann.

Die Kriterien, welche zur Beurteilung des Festigungserfolges herangezogen werden, sind bereits ausführlich im Arbeitsschritt 9, Teil 2 in Tabelle 7 beschrieben worden:

Der Verlauf von Festigkeit und E-Modul soll möglichst ausgeglichen sein. Eine Überfestigung der Oberfläche ist nur in bestimmten Grenzen zulässig:

- wenn die absolute Überfestigung ein bestimmtes Maß nicht überschreitet ($B_i \leq 1,5 B_o$) oder
- wenn der Übergang in den ungefestigten Bereich nicht abrupt, sondern fließend vonstatten geht ($\Delta B_i / \Delta x \leq 0,2 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{mm}$).

Aus dem Festigkeitsprofil kann die Eindringtiefe abgeleitet werden, für welche die Anforderungskriterien ebenfalls bereits im Arbeitsschritt 9, Teil 2, Tabelle 7 genannt sind.

Im Falle von Gesteinen, welche eine hohe Feuchtedehnung aufweisen, kann es angebracht sein, den Katalog um die Bestimmung der Feuchtedehnung zu erweitern. Dies gilt insbesondere dann, wenn quellmindernde Substanzen eingesetzt wurden. Das Messprogramm ist dann so umzugestalten, dass diese Messungen an identischen Bohrkernscheiben ausgeführt werden, die dann später zur Messung der Festigkeit und des E-Moduls benützt werden.

11.2.4 Fugenmörtel

Für die Untersuchung der Fugenmörtel stehen im Wesentlichen nur visuelle Befunde zur Auswahl. Entscheidend ist die Güte der handwerklichen Ausführung, d. h. insbesondere

- eine Verfugungstiefe des Fugendeckmörtels von mindestens dem Doppelten der Fugenbreite
- keine Hohlräume zwischen Versetzmörtel und Fugendeckmörtel
- die Anpassung an belassene Originalmörtel hinsichtlich Körnigkeit und Farbe
- die Erfüllung der Vorgaben in Bezug auf die Anpassung an das Mauerwerk hinsichtlich Größtkorn und Farbe
- die Pflege der Mörtel durch Abschirmen gegen Sonneneinstrahlung und bei Bedarf regelmäßiges Befeuchten, vor allem beim Einsatz von Trass oder NHL Mörteln
- keine Flankenabrisse als Folge eines starken Erhärtungsschwindens (Untersuchung mit der Lupe).

Bestand die Aufgabe darin, neuen Fugenmörtel vor einen bestehenden Altmörtel einzubringen, so ließe sich mit Bohrhärteprüfungen feststellen, ob beide Mörtel miteinander verträglich sind und ob eine ungestörte Anbindung beider Mörtel vorliegt.

Waren Pressfugen zu injizieren, dann sollten die Bohrkern an den Kreuzungspunkten von Quadern gezogen werden, um festzustellen, ob eine vollständige Verfüllung erzielt werden konnte. Leider ist die Probenahme bei Pressfugen immer mit einer Schädigung der angrenzenden Quader verbunden. Abzugsmessungen von Fugenmörteln im Mauerwerksverbund sind zwar technisch möglich. Der experimentelle Aufwand ist jedoch beträchtlich, sodass solche Messungen bislang keinen Eingang in die Restaurierungspraxis gefunden haben.

11.2.5 Steinersatzstoffe

Wie generell bei Mörteln werden die Eigenschaften von Steinersatzstoffen besonders durch die Art der Verarbeitung, besonders die Art der Verdichtung und die Einhaltung des richtigen Feuchtegehalts beeinflusst. Den Messungen an der Musterfläche kommt deshalb die Bedeutung zu, festzustellen, ob die Übertragung der Laborwerte in die Praxis gelungen ist oder nicht.

Durch einfache visuelle Beobachtung und durch Abklopfen wird zunächst zu überprüfen sein, ob die Flanken zum Naturstein rissfrei sind und ob die Antragungen fest sitzen. Im Zweifelsfall kann eine Lupe zu Hilfe genommen werden. Der feste Verbund zwischen dem gröberen Grundmörtel und dem feineren Deckmörtel ist zu bewerten. An den dünn auslaufenden Übergängen zum Naturstein darf die Steinersatzmasse nicht über den Stein verschmiert sein, nicht über die Steinoberfläche herausstehen und auch nicht absanden. Ein zufriedenstellendes Auslaufen auf Null ist nur möglich, wenn die Steinersatzmasse sehr feinkörnig ist. In diesem Punkt kann man leicht in Widerspruch zu der Forderung nach einer groben Struktur kommen, wenn es die Anpassung an den Naturstein so vorschreibt. Durch optischen Vergleich ist zu entscheiden, ob die Anpassung an die Steinfarbe gelungen ist.

Das Untersuchungsprogramm für die Bewertung der Steinantragungen stellt eine verkürzte Version der Messmethoden dar, die in Tabelle 11 im Arbeitsschritt 9.4 genannt sind. Die wichtigste Prüfung ist die Messung der Haftzugfestigkeit. In Absolutwerten erscheint eine Haftzugfestigkeit von 0,2 bis 1,0 N/mm² voll ausreichend, wobei auch Werte an der unteren Grenze um 0,1 N/mm² ausreichend sein können. Haftzugfestigkeiten größer als 1,0 N/mm² werden nicht benötigt. Relativ gesehen sollte ihr Wert 0,5 bis 0,8 der Oberflächen-Haftzugfestigkeit des Gesteins nicht übersteigen, damit die Gewähr gegeben ist, dass die Ablösungsfläche immer oder zumindest überwiegend im Restauriermörtel liegt. Befindet sie sich in der Grenzfläche Stein – Steinersatz, so zeigt dies, dass möglicherweise die Haftung der Antragung gefährdet ist. Unter keinen Umständen darf die Ablösungsfläche jedoch im Naturstein liegen, da in diesem

Fall bei einem Ablösen das Gestein geschädigt werden würde (vgl. hierzu Bild 106 und Bild 107).

Auch die Wasseraufnahme kann direkt am Objekt gemessen werden. Sie kann zerstörungsfrei mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen gemessen werden. Gemäß Tabelle 11 sollte der w-Wert 50–100 % der Saugfähigkeit des Natursteins betragen.

Die anderen Kenngrößen in Tabelle 11 sind nur durch die Entnahme von Proben in Form von Bohrkernen oder Prismen zugänglich. Wenn möglich, sollte deshalb auf ihre erneute Bestimmung verzichtet werden. Dies trifft jedoch nicht für Hinterfüllmörtel zu, bei denen die Ausfüllung der Hohlräume und die Anbindung an die Schale bzw. das Innere des Gesteins zumindest mit wenigen Bohrkernen überprüft werden sollte.

Als Bewertungsgrundlage für eine Auswahl der bestgeeigneten Steinersatzmasse dienen die handwerkliche Verarbeitung, das Erscheinungsbild und insbesondere die Eigenschaften bei dünn auslaufenden Übergängen. Bei den mechanischen Eigenschaften ist die Lage der Ablösungsfläche entscheidend, die überwiegend in der Steinersatzmasse selbst liegen sollte.

11.2.6 Schlämmen und Putze

In gleicher Weise wie mit den Anstrichen ist mit Schlämmen und Putzen zu verfahren. Zu Beginn sind die handwerklichen Anforderungen wie gute Haftung durch Abklopfen und gelungene Struktur, Oberflächengestaltung und farbliche Einstimmung zu prüfen. Die Übergänge an Fenstergewänden, anderen vorspringenden Teilen oder an zu überputzenden Blendbögen und Konsolen müssen besonders beachtet werden.

Das in Tabelle 13 genannte Untersuchungsprogramm sollte nur in verkürzter Form durchgeführt werden. Nicht ausgelassen werden darf die Wasseraufnahme (zerstörungsfrei mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen, ($w \leq 1\text{--}3 \text{ kg/m}^2\text{vh}$) und die Haftzugfestigkeit des Verbundes mit dem Untergrund, die zwischen $0,2$ bis $1,0 \text{ N/mm}^2$ betragen sollte. Wie im Falle der Steinersatzstoffe können Werte an der unteren Grenze um $0,1 \text{ N/mm}^2$ ausreichend sein. Haftzugfestigkeiten größer als $1,0 \text{ N/mm}^2$ werden nicht benötigt.

Als Entscheidungskriterien dienen die handwerkliche Verarbeitung, welche ein wichtiges Indiz für die Dauerhaftigkeit darstellt, das Erscheinungsbild (Oberflächengestaltung, Struktur, Farbe) und die beiden genannten Messwerte.

11.2.7 Farbanstriche auf Naturstein

Da hier die maßgebenden Eigenschaften durch eingehende Labormessungen bereits vorab bestimmt wurden, braucht von den in Tabelle 15 genannten Prüfmethoden in Regelfall nur die Wasseraufnahme bestimmt zu werden. Man verwendet geeigneter

Weise wieder das Karsten'sche Prüfröhrchen, um zerstörungsfrei und mit dichtem Messraster arbeiten zu können.

Es könnte angebracht sein, die Farbgebung neben der qualitativen visuellen Begutachtung durch Farbkarten oder quantitativ durch eine Farbmessung festzuhalten, um für später objektives Vergleichsmaterial zur Verfügung zu haben.

Der Beurteilung der handwerklichen Verarbeitung kommt eine große Bedeutung zu. Fehler wie Kreiden und Abschuppen dürfen nicht auftreten. Bei leicht versalztem Untergrund ist zu beobachten, inwieweit bereits Salzausblühungen entstanden sind und ob diese möglicherweise bereits zu Schäden geführt haben.

Stehen mehrere Farbmuster zur Auswahl, so sind in erster Linie die handwerkliche Ausführung und die farbliche Erscheinung als Entscheidungskriterien heranzuziehen. Die Wasseraufnahme kann insoweit zur Unterstützung mit herangezogen werden, als bei hydrophob eingestellten Farbsystemen das Wirksamkeitskriterium für die Wasserabweisung $w < 0,1 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$ erfüllt sein muss.

11.2.8 Hydrophobierung

Für die Begutachtung der Hydrophobierung ist unter den zur Verfügung stehenden Methoden am Objekt besonders das Karsten'schen Prüfröhrchen geeignet, da man mit ihm zerstörungsfrei messen und ein beliebig dichtes Messraster anlegen kann. Ein dichtes Messraster ist deshalb wichtig, weil die Wirksamkeit der Mittel häufig nicht nur von Quader zu Quader, sondern auch innerhalb eines Quaders starken Schwankungen unterliegen kann.

Die Wirksamkeit einer Hydrophobierung sollte in regelmäßigen Abständen von etwa fünf Jahren überprüft werden. Es empfiehlt sich deshalb, bereits jetzt, spätestens aber bei der Nachkontrolle der Maßnahmen, ein Raster von Messpunkten festzulegen, sodass später die Langzeitkontrolle immer an den identischen Messpunkten vorgenommen werden kann.

Die Qualität einer Hydrophobierung kann mit einer Bewertungsskala beurteilt werden, die beispielhaft in Tabelle 27 wiedergegeben ist. Auf diese etwas vereinfachte Skala hat sich die Arbeitsgruppe Naturstein-Monitoring verständigt. Sie weicht leicht von der bekannten Skala von WENDLER & SNETHLAGE (1988) ab, die noch im Leitfaden Naturstein-Monitoring [AURAS et al. (2011)] abgedruckt ist.

Tabelle 27: Bewertungsskala für die Hydrophobierung [AURAS (2011)]

Bewertung	Anforderung an w-Wert ($\text{kg/m}^2\text{v/h}$)
1	$w_{\text{mittel}} < 0,1$
2	$w_{\text{mittel}} < 0,2$
3	$w_{\text{mittel}} < 0,5$ und $w_{\text{max}} < 1,0$
4	$w_{\text{mittel}} < 0,5$ und $w_{\text{max}} > 1,0$
5	$w_{\text{mittel}} > 0,5$

Diese Bewertungskriterien legen klar fest, dass nur dann von einer erfolgreichen Hydrophobierung gesprochen werden kann, wenn unmittelbar nach der Maßnahme der w-Wert an allen Messstellen unter $0,1 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$ liegt. Dieses Kriterium sollte für neue Behandlungen unbedingt eingehalten werden, denn auch bei zahlenmäßig scheinbar kleinen w-Werten werden bei lang andauernden Regenfällen doch beträchtliche Mengen Wasser aufgenommen und nicht mehr zu vernachlässigende Eindringtiefen erreicht. Die Noten von 2 bis 5 sind in erster Linie für die Bewertung der Dauerhaftigkeit gedacht, die man durch Nachmessungen in regelmäßigen Zeitabständen überprüfen sollte (siehe Nachkontrolle).

Eine ungenügende Hydrophobierung liegt dann vor, wenn an allen Messpunkten die Wasseraufnahme den Wert $0,5 \text{ g/m}^2\text{v/h}$ übersteigt. Dieser Grenzwert ist in Anlehnung an die DIN EN 1062 gewählt. Übersteigt der w-Wert diese Grenze, dann besteht die Gefahr, dass die bei Regenfällen aufgenommene Wassermenge bereits so groß ist, dass sie während der Trocknungsperioden nicht mehr vollständig wieder abgegeben wird und es zu einem ständigen Feuchteanstieg im Inneren des Gesteins kommt. Vergleiche zu diesem Punkt die Künzel-Zahl in Arbeitsschritt 9.6.5.2.

Nähert sich der w-Wert der genannten Grenze, so sollte eine erneute Hydrophobierung vorgenommen werden, deren Wirksamkeit und deren Folgen auf die Gesteins-eigenschaften auf jeden Fall vorher an einer Musterflächen untersucht werden müssen.

Leider liegen immer noch kaum Erkenntnisse über eine Wiederbehandlung mit Hydrophobierungsmitteln vor. Am Pilotobjekt Alte Pinakothek in München konnten MEINHARDT-DEGEN et al. (2002, 2003) aufzeigen, dass eine Auffrischung der Hydrophobierung erfolgreich vorgenommen werden kann. Die w-Werte und vor allem auch der s_d -Wert und die Künzel-Zahl erfüllen nach der Behandlung die gestellten Anforderungskriterien (vgl. hierzu Bild 145). Auf der anderen Seite verlief die Wiederbehandlung der Gesteine von Schloss Schillingsfürst weniger erfolgreich. Die w-Werte an der Fassade erreichten nicht den Grenzwert von $0,1 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$, sodass nicht sicher gestellt ist, die gestellten Anforderungen mit den verwendeten Hydrophobierungsmitteln zu erreichen (Bild 144). Die neuesten Resultate hat MEINHARDT in AURAS et al. (2011) in übersichtlicher Form zusammengestellt. Dennoch muss man in Anbetracht der zahllosen Fassadenflächen, die seit 1970 hydrophobiert wurden, konstatieren, dass die Informationsbasis an der Fülle der Probleme gemessen immer noch sehr begrenzt ist, sodass weiterhin dringender Untersuchungsbedarf reklamiert werden kann.

11.2.9 Mikrobiologische Untersuchung

Als eine übergeordnete Untersuchung, die sich auf alle angewendeten Maßnahmen beziehen kann, wird die Bestimmung der mikrobiologischen Besiedlung am Ende des hier gezeichneten Untersuchungsprogramms behandelt. Wie unter Arbeitsschritt 7.9 bereits ausgeführt, dürfen die verwendeten Schutzstoffe das Wachstum von Organismen nicht fördern. Besonders wichtig wird diese Forderung bei allen Behandlungen, bei denen Wasser über längere Zeit im Porengefüge verweilt, also beispielsweise nach einer Reinigung mit Wasser. Wird festgestellt, dass die biologische Besiedlung nach kurzer Zeit mit der gleichen Intensität wie vor der Reinigung wieder einsetzt, so sind Gegenmaßnahmen gegen die Wiederbesiedlung zu überlegen.

In die mikrobiologische Untersuchung sind auch Flächen einzubeziehen, auf denen z. B. siliziumorganische Mittel zur Festigung und Hydrophobierung oder Kunststoffe (Acrylate, Epoxide, Polyurethane) zur Klebung, Antragung oder ebenfalls zur Festigung eingesetzt wurden. Ein besonderes Augenmerk ist historischen Additiven wie Kasein, Albumin, Sacchariden, Zellulose etc. zu widmen, welche das Wachstum von Organismen besonders intensiv fördern können.

11.3 Schlussbericht über die Musterfläche (Probefläche)

Die Ergebnisse aller Untersuchungen an der Musterfläche werden in einem Schlussbericht zusammengefasst, an dessen Ende ein sowohl aus restauratorischer als auch naturwissenschaftlicher Sicht fundiertes Behandlungskonzept (Therapiekonzept) zu stehen hat. Dies muss aber nicht heißen, dass es immer nur eine einzige, absolut verbindliche Vorgehensweise geben darf. Es wäre dagegen viel mehr im Sinne der Denkmalpflege, wenn Alternativmodelle und deren Vor- und Nachteile präsentiert und der Projektleitung zur Entscheidung vorgelegt würden.

Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Bericht vom Naturwissenschaftler und vom Restaurator gemeinsam abgefasst werden. Nur dann wird gewährleistet sein, dass die zwei Aspekte der Musterfläche, die praktische Durchführung und die messtechnische Bewertung, gleichermaßen Berücksichtigung finden. Im Folgenden werden einige Gesichtspunkte genannt, die im Schlussbericht behandelt werden müssen.

11.3.1 Bericht über die durchgeführten Untersuchungen

Zunächst sind die an der Musterfläche gemachten Erfahrungen zu schildern. Die dort vorgenommenen Behandlungsschritte, die verwendeten Konservierungsmittel sowie die eingesetzten Applikationstechniken müssen klar beschrieben werden. Die Arbeiten müssen in einem Plan dargestellt werden, damit übersichtlich alle wesentlichen

Merkmale der Musterfläche erkannt werden können. Dieser Plan stellt ein Dokument für spätere Nachuntersuchungen dar; er ist vor allem aber als Grundlage für die Maßnahmenkartierung gedacht, welche für die zur Ausführung vorgesehenen Gebäudeabschnitte anzulegen ist.

Die Materialliste für die Musterfläche enthält genaue Produktbezeichnungen (Handelsnamen), die Herstellerfirmen mit Adressen und exakte Verbrauchsangaben. Sollten Angaben zur chemischen Zusammensetzung der Inhaltsstoffe bekannt sein, so sind solche Informationen viel hilfreicher für spätere Generationen als die verschleiernenden Produkt-Handelsnamen. Auf besondere Probleme bei der Verarbeitung ist hinzuweisen. Die eingesetzten Prüfmethode und deren Ergebnisse sind anschaulich darzustellen und zu bewerten.

In einem weiteren Teil des Berichts werden Stundenaufwand, Materialverbrauch und sonstige Kosten aufgeschlüsselt, damit der Aufwand an der Musterfläche auf das Gesamtobjekt hochgerechnet und ein erster Gesamtkostenplan vorgelegt werden kann. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass 3-D-Pläne für die exakte Planung des Aufwands beträchtliche Vorteile gegenüber 2-D-Plänen haben.

Die Schlussfolgerungen begründen das vorgeschlagene Behandlungskonzept. Es versteht sich von selbst, dass im Interesse der Denkmalpflege nur solche Maßnahmen empfohlen werden sollen, welche eine größtmögliche Schonung der Originalsubstanz gewährleisten.

11.3.2 Ausarbeitung eines konkreten Maßnahmenplans

Sofern der Auftrag für die Musterfläche diese Position schon enthält, ist das Behandlungskonzept in einen konkreten Maßnahmenplan für den ersten Bauwerksabschnitt oder bei kleineren Objekten für die Gesamtmaßnahme umzusetzen. Dabei hat es sich in vielen Fällen als nützlich erwiesen, den Maßnahmenplan zunächst an einem gesamten Fassadenabschnitt einer weiteren Tauglichkeitsprüfung im Großmaßstab zu unterziehen, bevor die Freigabe für das gesamte Gebäude erfolgt. Diese zusätzliche Erprobung wäre in diesem Leitfaden dem Abschnitt »Durchführung der Arbeiten« gleichzusetzen.

Für den Maßnahmenplan gelten die gleichen Anforderungen wie für den Bericht über die Musterfläche. Demnach wären alle Maßnahmen mit Hilfe einer Kartierung zu veranschaulichen, damit der Umfang der Arbeiten und deren Schwerpunkte bequem überblickt werden können. Dabei kann es jedoch bei umfangreicheren Maßnahmen durchaus zu Komplikationen kommen, wenn für dieselbe Fläche gleich mehrere Arbeitsschritte dargestellt werden müssen. Man muss sich deshalb entscheiden, ob man eine komprimierte Darstellung in Form einer einzigen Kartierung haben möchte oder zahlreiche Einzelkartierungen, die für jeden Arbeitsschritt separat angelegt sind. Beide Lösungen haben Vor- und Nachteile. Die komprimierte Kartierung hat den

Vorteil der Übersichtlichkeit (siehe Bild 138), erlaubt jedoch keine quantitative Berechnung der zu konservierenden Flächen. Auf der anderen Seite kann man mit mehreren Kartierungen Flächen und Massen besser darstellen und berechnen, verliert jedoch leichter den Überblick.

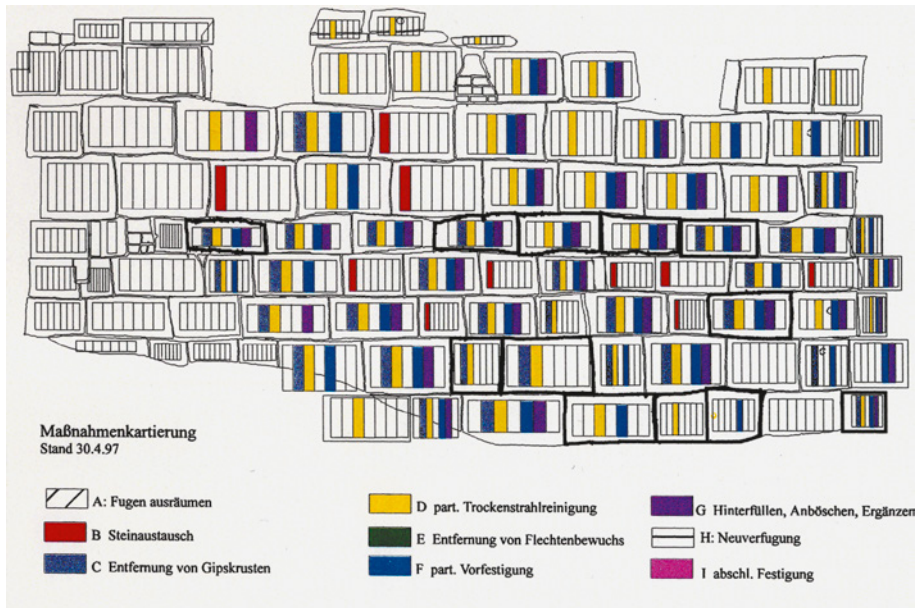


Bild 138: Schematischer Maßnahmenplan für die Restaurierung eines Abschnitts der Maxtor-mauer in Nürnberg [WENDLER (1997)]. Die Kartierung erlaubt für jeden einzelnen Quader einen kompromitierten Überblick über alle geforderten Maßnahmen. Eine quantitative Bemessung für ein Leistungsverzeichnis ist nicht möglich. Die praktische Umsetzung nach diesem Plan erfordert große restauratorische Erfahrung und Ehrlichkeit.

- 2-dimensionale Flächenberechnung

Mit digitalen Kartierprogrammen ist es seit längerer Zeit möglich, unmittelbar aus vektorisierten Fassadenplänen oder Fassadenfotos die Quaderflächen und Fugenlängen zu berechnen, die einer Behandlung unterzogen werden müssen. Um dies zu verdeutlichen, soll ein Beispiel einer Schadenserfassung und auf dieser basierend die quantitative Berechnung der zu behandelnden Quaderflächen und Fugenlängen näher besprochen werden. An der Südfassade der Klosterkirche Birkenfeld befinden sich sechs kleine gotische Maßwerkfenster, von denen auf Bild 139 das Fenster 4 gezeigt ist. Dargestellt ist die Erfassung der Schäden nach den im Leit-faden Naturstein-Monitoring vereinbarten Vorgaben.

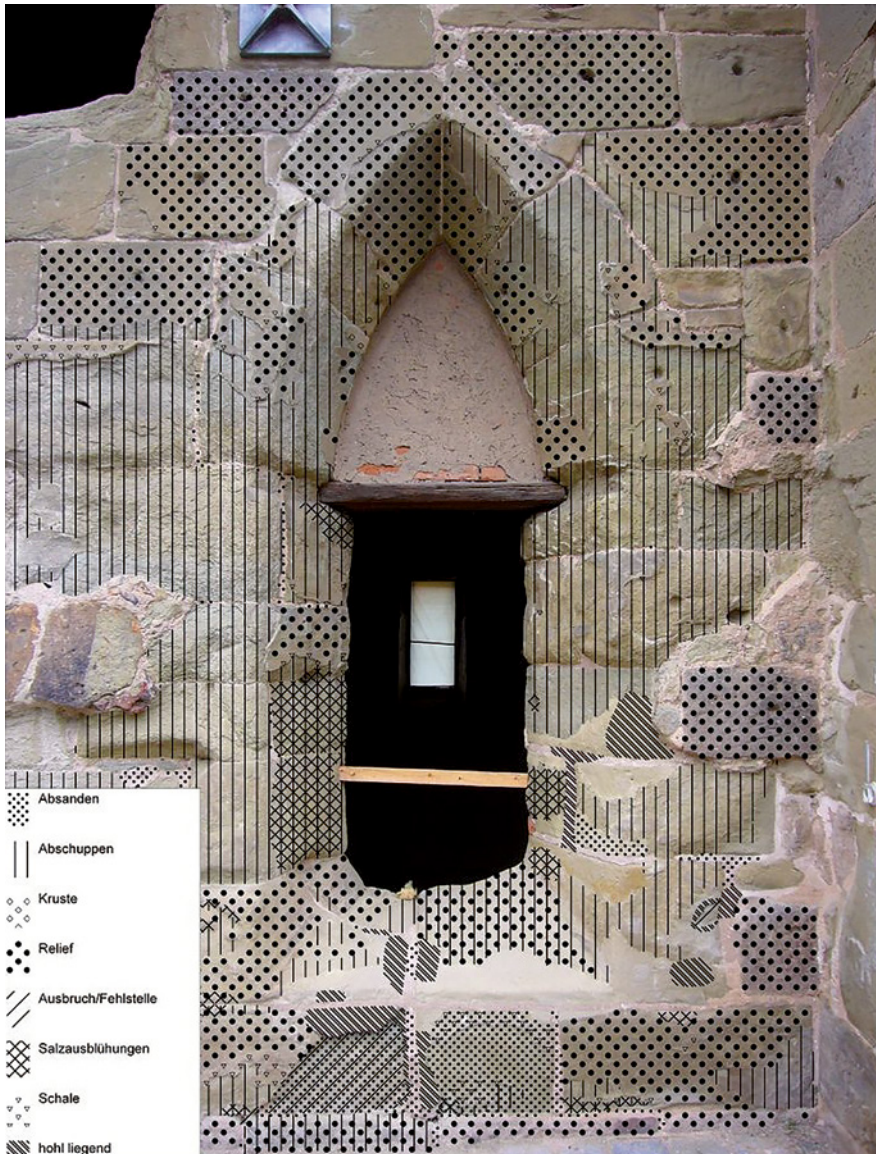


Bild 139: Kartierung der Steinschäden und Fugenschäden an einem gotischen Maßwerkfenster an der Südfassade der Klosterkirche Birkenfeld gemäß den Vorgaben des Leitfadens Naturstein-Monitoring [Auras et al. (2011)]

Als vorherrschende Schadensformen erkennt man Relief, Abschuppen und Absanden. Die quantitative Auswertung, ausgeführt für alle sechs Fenster gemäß Tabelle 28, ergibt, dass die Oberflächen praktisch aller Quader (92–100%) geschädigt sind und einer Behandlung bedürfen. An Fenster 4 wären insgesamt 5,76 m² zu konservieren, wenn man die mit Relief gekennzeichneten Oberflächen in die

Kalkulation mit einbezieht. Entscheidet man sich beim Schadenstyp Relief für eine andere Konservierungsmethode oder ein anderes Konservierungsmittel, so finden sich die analogen Zahlen in der Spalte »geschädigt ohne Relief«.

Tabelle 28: Quantitative Auswertung der geschädigten Flächen an den Fenstern 1–6 an der Südfassade der Klosterkirche Birkenfeld

Fenster	Fläche (m ²)	geschädigt (m ²)	ungeschädigt (m ²)	geschädigt inkl. Relief (%)	geschädigt ohne Relief (%)
1	6,79	6,64	0,15	98	43
2	5,30	5,17	0,13	98	83
3	4,53	4,46	0,07	98	77
4	5,76	5,76	0	100	66
5	5,28	4,84	0,44	92	55
6	3,36	3,17	0,19	94	93
gesamt	31,02	30,04	0,98		

Bei den Fugen ergibt sich ein ähnliches Bild, jedoch ist der Anteil der geschädigten Fugen wesentlich geringer (siehe Tabelle 29). Die Verfugung im Jahr 1992 mit 2,5 RT Kalkhydrat, 0,5 RT Weißzement und 10 RT Sand hat sich erstaunlich gut bewährt. Die hauptsächlichen Schäden konzentrieren sich auf den Sockelbereich, dessen Fugen besonders bei Fenster 6 praktisch vollkommen zerstört sind.

Tabelle 29: Quantitative Auswertung der geschädigten Fugenlängen an den Fenstern 1–6 an der Südfassade der Klosterkirche Birkenfeld

Fenster	Länge (m)	geschädigt (m)	ungeschädigt (m)	geschädigt (%)
1	35,85	6,9	28,95	24
2	36,14	7,28	28,86	25
3	24,01	2,87	21,14	14
4	30,45	5,35	25,10	21
5	37,23	5,81	31,42	18
6	22,65	8,50	22,65	38
gesamt	186,33	36,71	158,12	

Zu dieser Auswertung ist kritisch anzumerken, dass die berechneten Flächen und Fugenlängen an den schräg einlaufenden Fenstergewänden, die perspektivisch verkürzt sind, nicht auf die wahren Maße korrigiert sind. Würde man diese Zahlen unverändert in das Leistungsverzeichnis übernehmen, wären die Mengenvorgaben zwangsläufig fehlerhaft. Bei der Abrechnung würden Nachforderungen drohen. Zu diesem Problem siehe Arbeitsschritt 12.4.

- **Dreidimensionale Flächenberechnung**

Das soeben angesprochene Problem der exakten Flächenberechnung tritt besonders bei Skulpturen, Ornamenten und anderen dreidimensionalen Bauteilen in Erscheinung. Die heute von Restauratoren zumeist gebrauchten Kartierungsprogramme haben zwar den Vorteil, dass für Befunde und Schadensphänomene eine fertige Legende angeboten wird, was die Arbeit sehr erleichtert, sie können jedoch Flächenmaße nur zweidimensional berechnen. Dieses Problem kann jedoch umgangen werden, wenn das Objekt als 3-D-Modell vorliegt. Es genügt dann jedoch nicht, das 3-D-Modell mit einem herkömmlichen Kartierungsprogramm zu bearbeiten, weil dort nur die Projektion des 3-D-Bildes auf die zweidimensionale Fläche des Bildschirms ausgewertet wird. Die auf Plänen kartierten Schadensphänomene müssen zuerst dreidimensional digitalisiert werden. Das kann mit einer Software wie Geomagic Studio 2013 ausgeführt werden. Hier handelt es sich nicht um eine typische Kartiersoftware, es können dennoch damit Flächenmaße berechnet werden.

PFEUFFER (2018) hat an 3 Skulpturen die Unterschiede zwischen zwei- und dreidimensionaler Kartierung und Flächenberechnung experimentell untersucht. Bei der zweidimensionalen Flächenberechnung wurden die Oberflächen der vier Ansichten der Figur separat mit Auto-CAD 2018 berechnet und daraus die Gesamtoberfläche berechnet. Die dreidimensionale Oberflächenberechnung erfolgte wiederum mit Geomagic 2013 (Bild 140).

Bild 140: Apoll in zwei- und dreidimensionaler Darstellung zur Berechnung der Gesamtoberfläche. Kartiert sind die verschiedenen Stufen der Oberflächenrauheit. Links: 2D Kartierung mit Photoshop, rechts: 3D Kartierung mit Geomagic. Die Farbpalette von Geomagic ist leider wenig ansprechend.



Die Genauigkeit dieser Bestimmung hängt vom Scanner und dessen Auflösung ab. Außerdem treten Fehler dann auf, wenn in engen Gewandfalten die einer direkten Messung nicht zugänglichen Flächen mit Näherungsfunktionen geschlossen werden. Dennoch kann man davon ausgehen, dass die 3-D-Darstellung die tatsächliche Oberfläche des Objekts darstellt. Wie aus Tabelle 30 hervorgeht, können die Abweichungen zwischen zwei- und dreidimensionaler Berechnung beträchtlich sein.

Tabelle 30: Berechnung der Gesamtoberfläche von drei Skulpturen aus Sanssouci, aus dem Barockgarten Großsedlitz bei Dresden und aus dem Schlosspark Nymphenburg in München

	Gesamtoberfläche (m²)	
	2-D-Kartierung	3-D-Kartierung
Apoll (Sanssouci)	2,30 66 % der 3-D-Kartierung	3,45
Hera (Barockgarten Großsedlitz)	4,46 88 % der 3-D-Kartierung	5,05
Flora (Schlosspark Nymphenburg)	3,85 78 % der 3-D-Kartierung	4,95

Wie die Zahlenwerte zeigen, sind die Abweichungen bei der Skulptur Apoll am größten. Bei dieser Figur sind offensichtlich große Teile in der zweidimensionalen Darstellung nicht sichtbar. Die Gesamtoberfläche erscheint um ein ganzes Drittel kleiner als bei der Berechnung aus dem 3-dimensionalen Modell, das mit Laserscan erzeugt wurde. Die geringsten Abweichungen ergeben sich für die Figur der Hera. Bei diesem Vergleich ist noch anzumerken, dass bei der zweidimensionalen Berechnung durchaus manche Flächen zwei Mal dazugezählt werden, weil sie auf zwei Ansichten sichtbar sind. Dennoch weist die 3-D-Berechnung immer die höheren Werte auf, die den tatsächlichen Verhältnissen am besten entsprechen. Fehlerhafte Flächenangaben können bei Ausschreibungstexten zu falschen Vorgaben führen und möglicherweise gravierende Nachforderungen zur Folge haben.

Im Begleittext zur Kartierung sind die Maßnahmen im Detail zu erläutern. Es ist eine Materialliste vorzulegen, welche die Konservierungsmittel und Applikationsmethoden und deren zeitlichen Aufwand beschreibt. Konservierungsmittel und Rezepturen sind chemisch eindeutig zu benennen. Bei Bedarf sind für die verschiedenen Gesteinsarten unterschiedliche Anweisungen zu erteilen. Mit der Denkmalpflege ist abzustimmen, ob Tabuzonen mit besonderer historischer Bedeutung wie Quader mit Steinmetzzeichen, Farbspuren oder Ornamenten einer besonders sorgfältigen Behandlung bedürfen.

Im Hinblick auf klimatische Anforderungen, welche die Anwendung bestimmter Konservierungsmittel einschränken, sind genaue Auflagen zu erteilen. Auch auf geplante Verwendung von Lasuren, welche Farbunterschiede zwischen verschiedenen Gesteinen oder Steinersatzstoffen angleichen sollen, muss hingewiesen werden.

11.3.3 **Vorschläge für die Nachkontrolle**

Abschließend sind Vorschläge für Untersuchungen zur Nachkontrolle der Musterfläche und zur Qualitätsprüfung der eigentlichen Konservierungsmaßnahmen vorzuschlagen, die auch bei späteren Überprüfungen der Dauerhaftigkeit eingesetzt

werden können. Es sollte sich um bereits erprobte Messmethoden handeln, die auch noch nach Jahren zur Verfügung stehen. In Entwicklung befindliche Methoden sollten dagegen zunächst nur als Ergänzung der bewährten Messmethoden eingesetzt werden, da nicht vorausgesagt werden kann, ob sie auch in Zukunft Bestand haben werden.

Der Vorschlag für eine Nachkontrolle verfolgt aus der Sicht der angewandten Konservierungsforschung zwei Ziele. Durch den Einsatz erprobter Messmethoden ist sichergestellt, dass das angestrebte Ziel, die Dauerhaftigkeit der Maßnahmen zu erfassen, mit Hilfe eines Messprogramms erreicht wird, das unverändert bleibt und zu jeder Zeit vergleichbare Messwerte liefert. Auf der anderen Seite werden neue Techniken eingeführt, die möglicherweise vollkommen zerstörungsfrei arbeiten und sich so im Laufe der Zeit zu Routinemessungen entwickeln können. An Hand des Leitfadens Naturstein-Monitoring [AURAS et al. (2011)] wird auf diesen Punkt im Arbeitsschritt 15.4 »Dokumentation und Nachkontrolle« noch näher eingegangen.

Welche Untersuchungsmethoden im konkreten Fall zum Einsatz kommen können, ergibt sich aus den Maßnahmen, die an der Musterfläche zum Einsatz gekommen sind, und dem spezifischen Anspruch an die Nachkontrolle. Zunächst erscheint es zweckmäßig, sich an den Untersuchungsmethoden zu orientieren, welche bereits in den Laborversuchen und an der Musterfläche eingesetzt worden sind. Die entsprechende Auswahl findet sich in den einschlägigen Tabellen des Leitfadens.

12 Vierte Sitzung der Projektleitung

Inhalt

12.1	Allgemeines		351
12.2	Bewertung der Musterfläche	***	351
12.3	Prüfung von Finanz- und Zeitplan	***	352
12.4	Leistungsverzeichnis (LV)	***	352
12.4.1	Probe- oder Musterfläche?		353
12.4.2	Produkte und Materialien		354
12.4.3	Gewährleistung und Vertrag		354
12.4.4	Vortexte		356
12.4.5	Leistungs- oder Funktionsanforderung?		356
12.4.6	Prüfpflicht		357
12.4.7	Mengeneinheiten		357
12.4.8	Ausgewählte Beispiele für Mengen und Flächen bei der Kalkulation		360
12.5	Ausschreibung: VOB Teil A und B	***	362

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

12 Vierte Sitzung der Projektleitung

12.1 Allgemeines

In dieser Sitzung wird der Bericht der Arbeitsgruppe Restaurator/Naturwissenschaftler über die Ausführung und Auswertung der Musterfläche (Arbeitsschritte 11.1 und 11.2) beraten. Da in beträchtlichem Umfang naturwissenschaftliche Fragen diskutiert werden müssen, sind Spezialisten der betreffenden Fachrichtungen hinzuzuziehen. Die Besprechung hat vor allem zum Ziel, die Empfehlungen des Berichts über die für geeignet befundenen Materialien, Applikationsmethoden, Verarbeitungstechniken und Kontrollmessungen zu verabschieden und den Weg für die Durchführung der eigentlichen Restaurierungsarbeiten freizumachen.

12.2 Bewertung der Musterfläche

Wie weiter unten genauer ausgeführt, ist es besser, anstatt des Namens »Musterfläche« den Begriff »Probefläche« zu verwenden. Die Sitzung bietet noch einmal Gelegenheit zu kritischen Fragen, ob das Konzept tatsächlich hinreichend Gewähr dafür bietet, die Originalsubstanz und den Denkmalcharakter des Objekts zu bewahren. Es können Fragen nach der Dauerhaftigkeit der vorgeschlagenen Behandlungsmethoden gestellt werden. Die Spezialisten müssen sich insbesondere mit dem Problemkreis der Kompatibilität zwischen den empfohlenen Materialien und dem Originalgestein auseinandersetzen. Erst wenn alle Kritikpunkte ausgeräumt sind und von allen Seiten Zustimmung besteht, sollte es zu einer Beschlussfassung kommen.

Bei umfangreichen Projekten muss an dieser Stelle auch besprochen werden, ob die Erfahrungen, die aus einer Probefläche gewonnen werden können, bereits ausreichend sind, eine Vergabe für das Gesamtobjekt voranzutreiben, oder ob es nicht doch im Sinne der Planungssicherheit notwendig ist, als nächsten Schritt eine große Probeachse ausführen zu lassen, welche nochmals die Gelegenheit zur Verbesserung der Praxisanpassung bietet.

Sind die Aufgaben mit einem hohen Schwierigkeitsgrad verbunden, so wäre es ratsam, die Baustelle durch einen Projektanten begleiten zu lassen, dessen Aufgabe es wäre, die Fachkräfte der beauftragten Firma in die besondere Problematik einzuweisen, die Durchführung zu überwachen und sogenannte Meilensteine, d. h. vertraglich festgelegte Arbeitsabschnitte, abzunehmen. Sobald diese Meilensteine erreicht sind, wird die Projektleitung weitere Bauwerksflächen oder Gewerke freigeben.

12.3 Prüfung von Finanz- und Zeitplan

Als nächster Punkt der Tagesordnung wäre auf der Grundlage des vorgelegten Berichts über die Probesträche die Zeit-, Kosten- und Finanzierungspläne zu überprüfen. Es sollte nicht vergessen werden, den vom Restaurator und Naturwissenschaftler veranschlagten Zeit- und Kostenaufwand mit den an anderen Objekten gesammelten Erfahrungen zu vergleichen.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, ob alle behördlichen Genehmigungen vorliegen oder ob in der Zwischenzeit zusätzliche Aufgaben entstanden sind, welche das Einholen besonderer Erlaubnisse erfordern. Zu denken wäre etwa an Verkehrsplanung, Umweltschutzauflagen, Entsorgung etc.

12.4 Leistungsverzeichnis (LV)

Die Projektleitung wird nach Abschluss der allgemeinen Aussprache, vielleicht in einer internen Sitzung, die Freigabe für die Durchführung einer großen Probeachse oder der Gesamtmaßnahmen erteilen. Der Koordinator erhält den Auftrag, ein Leistungsverzeichnis aufzustellen und die Ausschreibung in die Wege zu leiten. Das Leistungsverzeichnis ist zusammen mit der Baubeschreibung ein Teil der Leistungsbeschreibung und in § 7 VOB/A näher definiert und beschrieben.

Bevor das Leistungsverzeichnis überhaupt ausgefertigt werden kann, muss ein Maßnahmenplan erstellt werden, d. h. die Maßnahmen, die sich aus der Probesträche ergeben haben, sind auf Pläne des Gesamt-Objekts bzw. der Probeachse zu übertragen. Diese Aufgabe kann der Koordinator bei entsprechender Sachkenntnis selbst ausführen oder er muss mit Billigung der Projektleitung den Restaurator oder den Fachgutachter mit dieser Aufgabe betrauen.

Das Leistungsverzeichnis gründet sich unter anderem auf die Angaben des Probesträchenberichts. Da aufgrund der Bestandsaufnahme präzise Angaben über das Gesamtobjekt vorhanden sind, sollte es keine Schwierigkeiten bereiten, die Werte der Probesträche repräsentativ auf das Gesamtobjekt zu übertragen. Erscheint die Aufgabe als zu komplex oder bestehen aufgrund von Fachfremdheit Probleme mit der Umsetzung, so kann der Koordinator selbstverständlich von einem Projektanten beraten und unterstützt werden. Bei umfangreichen Projekten kann es auch gerechtfertigt sein, einen Projektanten mit der Begleitung und Überwachung der Baustelle zu betrauen.

Exakte Vorgaben im Leistungsverzeichnis sind die unbedingte Voraussetzung dafür, in der Ausschreibung vergleichbare Angebote zu erhalten. Jeder Praktiker kennt zur Genüge die Problematik unpräziser Leistungsbeschreibungen, in deren Folge sehr häufig unqualifizierte Firmen zum Zuge kommen, die dann auch noch durch Nach-

forderungen aufgrund »unvorhersehbarer« Schwierigkeiten den Preis in die Höhe treiben können.

Ein Leistungsverzeichnis hat viel mit juristischen Vorgaben und Bestimmungen zu tun. Im Folgenden werden einige unverbindliche Hinweise gegeben, die bei der Erstellung eines restauratorischen Leistungsverzeichnisses von Nutzen sein können. Ausdrücklich sei betont, dass eine Leistungsbeschreibung bzw. ein Leistungsverzeichnis – gerade bei öffentlichen Ausschreibungen – immer von einem erfahrenen Architekten oder Baujuristen begleitet oder kontrolliert werden sollte. Es darf nicht verschwiegen werden, dass in Zeiten zunehmender Konkurrenz die Bieterfirmen versuchen, die Schwachstellen des Leistungsverzeichnisses zu finden, um es »auszuhebeln«, oder dass sie von vornherein auf Nachträge spekulieren, damit niedrige Preispositionen kompensiert werden können.

Zur VOB Teil A, den Allgemeinen Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen, und speziell zum § 7, der Leistungsbeschreibung, gibt es zahlreiche Kommentare [vgl. VOB (2016)]. Darüber hinaus sei empfohlen, entsprechende Fachseminare zu besuchen, die den Planer auf dem neuesten Stand des Wissens und der Technik halten. Im Hoch- und Tiefbau von Neuvorhaben werden die Leistungen in einem sogenannten Standardleistungsbuch erfasst und mit entsprechender Software in maßgeschneiderten Programmen verarbeitet. Für die komplexe Materie historischer Restaurierungsmaßnahmen ist diese Vorgehensweise nicht brauchbar und auch nicht sinnvoll.

12.4.1 Probe- oder Musterfläche?

Es ist besser, im Leistungsverzeichnis von einer Probefläche anstatt von einer Musterfläche zu sprechen. Denn allzu leicht kann sich der Bieter, sobald er den Auftrag erhalten hat, auf tatsächliche oder vermeintliche Fehler der sogenannten Musterfläche berufen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen und Probeflächen sind zwar Grundlage für eine Ausschreibung, was das grundsätzliche Sanierungskonzept, die möglichen Materialien, Rezepte und Methoden sowie Umfang und Mengen betrifft. Es ist aber nicht unbedingt empfehlenswert und widerspricht teilweise gar den rechtlichen Bestimmungen, diese im LV als zwingend festzuschreiben. Die Leistungsbeschreibung sollte immer genügend Handlungsspielraum für restauratorische Anpassungen lassen. Eine »Musterachse« wird die entscheidenden Problempunkte beispielhaft klären, jedoch nie alle Aspekte einer Sanierung umfassen.

12.4.2 Produkte und Materialien

Gemäß den Verdingungsordnungen für Bauleistungen (VOB), an die der öffentliche Auftraggeber gebunden ist, dürfen in einem Leistungsverzeichnis keine Hersteller- und Produktbezeichnungen mehr genannt werden. Nur ausnahmsweise sind Produktvorschläge zulässig, wenn sie nicht anders hinreichend genau beschrieben werden können, sie müssen dann mit dem Zusatz »oder gleichwertig« versehen werden (§ 7 Abs. 8 VOB/A). Bieterangaben zu Material- und Produktbezeichnungen sollen grundsätzlich nicht mehr abgefragt werden.

Restauratoren geben im LV gerne verbindliche Rezepte oder Methoden an. Das ist aus restauratorisch-konservatorischer Sicht verständlich, hinsichtlich Verantwortung und Gewährleistung aber nicht empfehlenswert. Denn normalerweise soll die ausführende Firma fachkundig sein und für ihre Produkte, ihre Rezepte und ihr Werk haften. Bei vorgegebenen Rezepten oder vergleichbaren Vorgaben wird sie ihre Bedenken anmelden, sollte sie bei der Ausführung feststellen, dass irgendetwas nicht so wie beschrieben funktioniert. Damit übernimmt der Auftraggeber (AG) das Risiko des Gelingens. Im schlimmsten Fall kann es zu Schäden und in der Folge zu Haftungsansprüchen gegenüber dem Planer kommen. Sinnvoll ist es jedoch, in einer Anlage des LVs das Vorgehen an der Probeachse zu dokumentieren, und zwar vollständig mit Nennung der Materialien, Produkte und Methoden. Es ist nicht anzuraten, Materialien bauseits verbindlich zu stellen. Der Auftraggeber ist dann grundsätzlich für die Güte des Materials verantwortlich und der Auftragnehmer (AN) wird, wie die Erfahrung lehrt, seine Bedenken anmelden, sobald er den Auftrag erhalten hat.

12.4.3 Gewährleistung und Vertrag

Schon in den vorigen Abschnitten ist die Frage nach der Gewährleistung immer wieder aufgetaucht. Sie ist für Auftraggeber wie Auftragnehmer gleichermaßen wichtig. Grundsätzlich ist der Auftragnehmer für seine Leistungen und das Gelingen verantwortlich, d. h. er muss für sein Werk haften und die Gewährleistung übernehmen, in der Regel für vier Jahre nach VOB oder für fünf Jahre nach BGB. Auch für den Planer gelten im Werkvertrag die Bestimmungen des BGB (fünf Jahre gemäß § 634a BGB).

Ein mangelfreies Werk kann der Auftragnehmer nur herstellen, wenn die Ausführung den anerkannten Regeln der Technik entspricht, die Produkte nach Herstellervorgaben einbaut werden und die entsprechenden Zulassungen vorhanden sind. Ist Ausführung nach VOB/B vereinbart (wie oft bei Restaurierungsleistungen) gilt auch Teil C – Allgemeine technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen, d. h. die DIN-Vorschriften. Die DIN-Vorschriften erfassen bislang nur rudimentär die Erfordernisse der Konservierung und Restaurierung, weswegen man sich hier schnell an der Grenze der Gewährleistung bewegt. Hilfsmittel können die Schriften der anerkannten Fachverbände oder die WTA-Merkblätter sein.

Sollten Leistungen in Material oder Methode entgegen der DIN ausgeschrieben sein, kann der Auftragnehmer Bedenken anmelden und die Gewährleistung ablehnen. Dies ist kein Appell, Leistungen nur nach DIN auszuschreiben. Ganz im Gegenteil – oft wird genau dies für das Denkmal das einzig Richtige sein. Man denke z. B. an historischen Kalkmörtel im Außenbereich u. v. a. m. In einem solchen Fall muss der Planer den Bauherrn darüber aufklären, dass der Auftragnehmer möglicherweise die Gewährleistung ablehnt und der Bauherr das Risiko des Erfolgs oder Misserfolgs übernehmen muss. Der öffentliche Auftraggeber scheut aus mangelnder Fachkenntnis zumeist die Übernahme der Verantwortung, woraus sich ein Dilemma ergibt, das sich bei restauratorischen Ausschreibungen momentan kaum lösen lässt.

Bei eventuell auftretenden Schäden haftet nicht nur die ausführende Firma, sondern auch der Planer. Der Auftraggeber kann ihn, das wird oftmals übersehen, in gleichem Maße zur Rechenschaft ziehen. Das Risiko lässt sich über Langzeitmuster, vergleichbare Sanierungen an anderen historischen Bauten, allgemeine Erfahrungswerte usw. minimieren und abschätzen. Gerechtfertigte Bedenken anzumelden ist für alle Seiten sinnvoll, vor allem dann, wenn während der Sanierung neue Erkenntnisse oder Probleme auftauchen. Später kann es mit gravierenden juristischen Folgen und Haftungsansprüchen verbunden sein. In diesem Kontext sei erwähnt, dass der Planer beim Erstellen von Voruntersuchungen und Gutachten besonders sorgfältig und vorsichtig sein muss. Die Erfahrung lehrt, dass es bei Mängeln und Schäden oft erst Jahre später zu gerichtlichen Auseinandersetzungen kommt. Der idealistische und unerfahrene Restaurator sollte sich hier mittels Einschränkungen, entsprechenden Hinweisen, juristischer Beratung usw. absichern.

Der Bau-Vertrag regelt nicht nur die Dauer der Gewährleistung, sondern auch die Höhe der Sicherheitsleistungen. Nach den vergaberechtlichen Bestimmungen (§ 9c VOB/A) ist auf Sicherheitsleistungen bei kleineren Bauvorhaben (unterhalb von 250 000.– netto Gesamtauftragssumme) zu verzichten, weil sie für den Unternehmer unverhältnismäßig hohe Kosten verursachen und zugleich dessen Kreditrahmen einengen. Das betrifft nicht nur die Sicherheit für Gewährleistung, sondern auch die zur Vertragserfüllung. Bei beschränkten Ausschreibungen soll man darauf sogar ganz verzichten. In der Praxis folgen die meist vom Auftraggeber aufgesetzten Verträge diesen Empfehlungen nicht. Doch mancher Auftragnehmer nimmt das klaglos hin, da er entweder nicht besser informiert ist oder einen Disput bereits zum Vertragsabschluss scheut – oder den Vertrag nicht sorgfältig genug liest. Ist eine Sicherheitsleistung gerechtfertigt, sind in der VOB im selben Paragraphen 5 % für die Vertragserfüllung und 3 % für Mängelansprüche vorgesehen. Ein weiterer gerne übersehener Punkt ist der Rückgabezeitpunkt der Sicherheitsleistung. Falls im Vertrag nicht anders vereinbart, sieht die VOB/B (§ 17 Abs. 8 Nr. 2) eine Rückgabe nach bereits zwei Jahren vor – unabhängig von der Länge der Gewährleistung.

12.4.4 Vortexte

Jeder Bieter weiß ein Lied davon zu singen. Häufig sind die Vortexte ellenlang und unüberschaubar. Denn der Planer will sich absichern und bringt lieber mehr als weniger. Aufgeblähte Vortexte neigen jedoch zu Doppelungen, Ungenauigkeiten und Widersprüchen. Grundsätzlich gilt für Bauleistungen nach VOB: LV-Leistungen und Vereinbarungen zu Abrechnungen, die bereits in VOB und DIN geregelt sind, brauchen nicht nochmals extra aufgeführt zu werden. Die Devise lautet: so kurz wie möglich.

In der Leistungsbeschreibung werden die vertraglichen Leistungen festgelegt. Zusätzlich unterscheiden die DIN-Vorschriften zwischen Nebenleistungen und Besonderen Leistungen. Nebenleistungen brauchen nicht eigens erwähnt zu werden, sie finden sich in den jeweiligen DIN-Texten und gehören – ohne gesonderte Vergütung – zu den vertraglichen Leistungen. Hierzu gehört u. a. das Liefern der Materialien (DIN 18299 2.1 und 4.1.7). Ebenso ist die Montage notwendig zur Erbringung des vollständigen Werkes und braucht nicht extra ausgeschrieben werden. Besondere Leistungen hingegen sind nicht geschuldet, sie müssen im Leistungsverzeichnis erwähnt werden und sind zu vergüten (z. B. DIN 18299 4.2). Hierzu zählt auch das Bereitstellen von Teilen der Baustelleneinrichtung für andere Unternehmer oder für den Auftraggeber oder auch das Aufstellen eines Bauzaunes, der als Verkehrssicherung Aufgabe des Auftraggebers ist. Die beliebte Praxis, besondere Leistungen in den Vortexten unterzubringen und zwar mit dem Hinweis, sie in die Einheitspreise (EP) einzukalkulieren, ist rechtlich haltlos. Vielmehr müssen sie im Positionstext selbst eindeutig kalkulierbar beschrieben sein.

12.4.5 Leistungs- oder Funktionsanforderung?

In der Regel führen zwei Arten der Leistungsbeschreibung zum Ziel (siehe dazu auch § 7 Abs. 4 Nr. 2 VOB/A): Es wird entweder die Anforderung an die Leistung oder es wird die Anforderung an die Funktion beschrieben.

- Die leistungsorientierte Beschreibung nennt alle für die Erbringung notwendigen Einzelmaßnahmen und -schritte. Bei einer Steiner Ergänzung könnte sie beispielsweise folgendermaßen lauten: »Fehlstelle säubern, loses Material entfernen, Löcher bohren für Verankerung, Verankerung aus Edelstahl einkleben, Kontaktschicht aufbringen, Ergänzung in zwei Lagen einbringen (Ergänzungsmasse eingestellt auf Bestand) und auf Null auslaufen lassen, Oberfläche bearbeiten wie Bestand, farbliche Retusche etc.«. Hier muss der Planer den Arbeitsablauf sehr genau kennen, da die Beschreibung einer Herstellungsanweisung gleich kommt. Dazu wird nur in besonderen Fällen geraten, da prinzipiell gilt: Je detaillierter und umfassender die Beschreibung ist, umso eher kann der Bieter einhaken und Fehlendes geltend machen.
- Die funktionale Beschreibung einer Position ist zielorientiert. Sie definiert das gewünschte Ergebnis (ein technisches Resultat oder bestimmte Eigenschaften)

wie z. B.: »Mineralische Ergänzung bis 10 m² als Antragung, angepasst an Bestand, ohne steinmetzmäßige Ausarbeitung des Muttersteines usw.« Hier müssen alle Eigenschaften der Leistung erfasst sein.

12.4.6 Prüfpflicht

Dem Auftragnehmer obliegt eine Prüfpflicht des LVs. Die Verantwortung, das Leistungsverzeichnis vollständig zu beschreiben und klar kalkulierbar zu formulieren, hat jedoch immer der Planer. Er kann sich nicht darauf berufen, dass der Auftragnehmer auf Fehler hätte hinweisen müssen, da dieser nicht mehr wissen kann als der Planer selbst. Gemäß § 7 Abs. 1 Nr. 1 VOB/A ist die Leistung eindeutig und so erschöpfend zu beschreiben, dass alle Bewerber die Beschreibung im gleichen Sinne verstehen müssen und ihre Preise sicher und ohne umfangreiche Vorarbeiten berechnen können. Das gilt gemäß Abs. 1 Nr. 6 VOB/A auch für die Verhältnisse der Baustelle. Der beliebte Passus, jeder Bieter solle das Objekt selbst besichtigt haben und könne sich später nicht auf Unkenntnis berufen, ist damit nicht VOB-konform und dient der Gewissensberuhigung des Planers oder der Einschüchterung des Bieters bzw. späteren Auftragnehmers.

12.4.7 Mengeneinheiten

Mit der Wahl der Mengeneinheiten trifft man eine Entscheidung über die Güte der Leistung, das Abrechnungsrisiko und den Abrechnungsaufwand. Hier können grundlegende Fehler entstehen und zu immensen Kostensteigerungen führen. Die DIN liefert Festlegungen für Aufmaß und Abrechnungseinheiten. Sie regelt auch die Mindestabrechnungsmengen. Das ist sinnvoll, da bei kleinen Stücken der Aufwand oftmals nicht geringer ist als bei großen und so eine Mindestvergütung sichergestellt ist. Die Mindestgrößen sollte man unbedingt kennen und beachten, sie brauchen nicht extra ausgeschrieben zu werden. Der Auftragnehmer legt sie seiner Kalkulation zugrunde.

Tabelle 31 gibt unverbindliche Hinweise zur Wahl der Abrechnungseinheiten gemäß den zuvor beschriebenen Hauptsanierungsarbeiten (Kapitel 11.2).

Tabelle 31: Vorschläge und Hinweise zu den Mengen- und Abrechnungseinheiten bei der Erstellung eines Leistungsverzeichnisses, hier orientiert an den Vorgaben der DIN 18332 (Naturwerksteinarbeiten)

Leistung	Vorschlag für Mengen-einheit	Hinweise: Die DIN 18332 (Naturwerksteinarbeiten) legt Mindestabrechnungsmaße fest: beim Längenmaß 1 m, beim Flächenmaß 0,25 m², beim Raummaß 0,03 m³
Muster erstellen	Stückzahl (St.)	Muster sind aufwendig und bedürfen großer Sorgfalt. Bei Ausschreibung nach m ² oder m ³ wird ihr Preis oft zu niedrig angesetzt.
Reinigung	Quadratmeter (m ²) oder pauschal für einfache Flächen Stückzahl (St.) für Kapitelle, Säulen, Fensterbänke etc. Lfd. Meter (lfd. m) für Gesimse Stückzahl (St.) oder Quadratmeter (m ²) für punktuelle Reinigungen	Reinigungen werden oft zu billig angeboten. Die Abrechnungseinheiten sind deshalb zu differenzieren. Komplizierte Ornamentik verursacht hohen Aufwand an Aufmaß für AN und Planer. Die Abrechnungseinheit sollte einfach gehalten werden, um komplizierte Flächenberechnungen zu vermeiden. Komplizierte Stücke wie Kapitelle können als St. ausgeschrieben werden unter Angabe von Maßen, Flächen und Schwierigkeit (siehe auch Kapitel 12.4.8). Gesimse können nach lfd. m ausgeschrieben werden unter Angabe von Höhe/Abwicklung. Objekte/Bauteile können pauschal ausgeschrieben werden, wenn die ca.-Fläche bekannt ist und Schwierigkeiten beschrieben oder über Fotos dokumentiert sind.
Festigung	Quadratmeter (m ²) Stückzahl (St.) Aufwand (Stunde und Liter)	Die Abrechnung nach m ² führt bei großen Flächen zum Erfolg, bei kleinen Flächen leidet aufgrund der geringen Abrechnungsgröße oftmals die Qualität der Leistung. Die Abrechnung nach St. führt zu guter Leistung, kann aber Kostenrisiko sein (Mengenkontrolle!). Gute und sorgfältige Leistung mit gerechter Abrechnung bietet Ausschreibung nach Aufwand (Std.) und Verbrauch (l).

Tabelle 31 (Fortsetzung)

Leistung	Vorschlag für Mengeneinheit	Hinweise: Die DIN 18332 (Naturwerksteinarbeiten) legt Mindestabrechnungsmaße fest: beim Längenmaß 1 m, beim Flächenmaß 0,25 m², beim Raummaß 0,03 m³
Fugen	Meter (m) eventuell Quadratmeter (m ²) oder Stückzahl (St.) oder pauschal	Fugen werden oft günstig angeboten und stellen einen vergleichsweise hohen Abrechnungsaufwand dar. Die Abrechnung ist so einfach wie möglich zu halten. Abrechnung nach m ist üblich. Es sind auch Vereinfachungen möglich, wie Gesims/psch. oder Gesims über m ² , wenn die lfd. m Fugen pro St./Fläche angegeben sind.
Ergänzungen	Stückzahl (St.) mit Größenangabe (bis 100 cm ² usw.)	Geeignet ist Abrechnung nach Stück unter Angabe der Größe (auch Größen unter 0,25 m ² möglich). Nicht geeignet ist Ausschreibung nach m ² ! Hier besteht gemäß DIN ein Mindestabrechnungsmaß von 0,25 m ² , d. h. jede noch so kleine Ergänzung wird mit 0,25 m ² abgerechnet, was bei VOB-konformer Ausschreibung nicht ausgeschlossen werden darf.
Vierungen/ Neuteile	Stückzahl (St.) mit Größenangabe (bis 0,001 m ³ usw.)	Geeignet ist Abrechnung nach Stück unter Angabe der Größe (auch Größen unter 0,03 m ³ möglich). Nicht geeignet ist Ausschreibung nach m ³ ! Hier besteht gemäß DIN ein Mindestabrechnungsmaß von 0,03 m ³ , d. h. jede noch so kleine Vierung wird mit 0,03 m ³ abgerechnet, was bei VOB-konformer Ausschreibung nicht ausgeschlossen werden darf.
Risse, Anbörschen, Injektionen etc.	Lfd. Meter (lfd. m) Aufwand (Stunde und Liter)	Geeignet ist Ausschreibung nach lfd. m mit Angabe von Breite und Tiefe oder von Verbrauch (Liter) je m. Falls Aufwand und Menge unklar sind, kann über Stundenaufwand und Verbrauch (Liter) abgerechnet werden.
Vernadelungen, Verdübelungen	Stückzahl (St.)	Abrechnung über Stückzahl mit Angabe von Länge und Durchmesser.

Tabelle 31 (Fortsetzung)

Leistung	Vorschlag für Mengeneinheit	Hinweise: Die DIN 18332 (Naturwerksteinarbeiten) legt Mindestabrechnungsmaße fest: beim Längenmaß 1 m, beim Flächenmaß 0,25 m², beim Raummaß 0,03 m³
Schlämmen und Putze	Quadratmeter (m ²) pauschal bei Flächen Stückzahl (St.) bei Bauteilen	Bei Abrechnung nach Flächen ist das Aufmaß möglichst einfach zu halten. Bei Ausbesserungen das Mindestmaß von 0,25 m ² beachten und entsprechende Mengen einplanen. Ausbesserungen können auch nach Stück ausgeschrieben werden.
Farbanstriche/ Retusche	Quadratmeter (m ²) pauschal bei Flächen Stückzahl (St.) bei Bauteilen	Bei Abrechnung nach Flächen ist das Aufmaß möglichst einfach zu halten. Bei Ausbesserungen das Mindestmaß von 0,25 m ² beachten und entsprechende Mengen einplanen oder nach Stück ausschreiben. Komplizierte Bauteile möglichst nach Stück ausschreiben.
Metallteile	Stückzahl (St.)	Bei Fassaden handelt es sich meist um kleine Metallschrauben, -haken und -nägeln, die ausgebaut, behandelt, ersetzt werden müssen: Ausschreibung nach Stückzahl Große Metallteile eigens beschreiben und aufführen.

12.4.8 Ausgewählte Beispiele für Mengen und Flächen bei der Kalkulation

Die immense Bedeutung eines detaillierten und genauen Leistungsverzeichnisses kann nicht häufig genug betont werden. Vor allem sollte man stets im Bewusstsein haben, dass Pläne zwar anschaulich und übersichtlich sind, aber den Nachteil haben, das Objekt nur zweidimensional abzubilden. Restaurierungsmaßnahmen schließen aber die dritte Dimension ein. So kann man sich leicht täuschen, wenn die Oberflächen von Maßwerken, Blattranken oder anderen Ornamenten zu berechnen sind, für die der Arbeitsaufwand weit größer ist, als es zunächst auf der zweidimensionalen Abbildung den Anschein hat. Die Umrechnungsfaktoren, mit deren Hilfe man von der zweidimensionalen Ansichtsfläche, die sich leicht aus einer digitalen Kartierung ausrechnen lässt, zur dreidimensionalen, tatsächlichen Oberfläche gelangt, ist für einige typische Bauelemente in Tabelle 32 aufgeführt. So hat zum Beispiel ein freistehender quadratischer Pilaster eine viermal größere Gesamtoberfläche als auf einem Foto oder einem Plan sichtbar. Bei einer frei stehenden Säule ergibt sich der Faktor 3,14, was der Zahl π entspricht. Komplizierter gestalten sich die Zusammenhänge im

Fälle von griechischen Kapitellen. Bei einem ionischen Kapitell erhält man, wenn man die Einzelelemente des Kapitells separat berechnet, einen Faktor von ungefähr 5. Im Fall eines korinthischen Kapitells nähert man sich dem Problem am besten, indem man die bekleidenden Akanthusblätter als einen umfassenden Ring um den Säulenschaft auffasst, sodass sich die Oberfläche um den Faktor $3 \times \pi \approx 10$ vergrößert. Weil jedoch die Oberflächen aller Elemente eines korinthischen Kapitells bildhauerisch gestaltet sind, sollte man mindestens noch mal den Faktor 2 einrechnen, um zu einer realistischen Gesamtoberfläche und dem damit verbundenen Arbeitsaufwand zu gelangen. Sollten das Gesamtobjekt oder einzelne Bauteile nach einem Laserscan als 3-D-Modell verfügbar sein, lassen sich die tatsächlich zu planenden Flächen mit Hilfe von CAD Programmen berechnen. Bei klassizistischen Gebäuden könnte es z. B. genügen, ein korinthisches Kapitell beispielhaft für alle anderen einzuscannen und den tatsächlichen Flächeninhalt auf die anderen zu übertragen. Der in eine derartige Vorgehensweise eingeschlossene Fehler dürfte sich nicht gravierend auf die Gesamtkalkulation auswirken.

Tabelle 32: Umrechnungsfaktoren von der zweidimensionalen Ansichtsfläche in die tatsächliche dreidimensionale Oberfläche von baulichen Stilelementen

Element	Faktor
Sägezahn	2
Viertelpilaster	1,5
Halbpilaster	2
freistehender Pilaster	4
Halbsäule	1,57
freistehende Säule	3,14
Wulst/Torus	3,14
Kannelure	5
Dorisches Kapitell Echinus	3,14
Ionisches Kapitell	≈ 5
Korinthisches Kapitell	$\approx 10-20$

Auch beim Arbeitsaufwand für Neuteile, Vierungen oder Restauriermörtel kann es Probleme geben, wenn nur die sichtbare Fläche berücksichtigt wird. Stets muss für diese Arbeiten auch die Tiefe angegeben werden, bis zu der die Flächen ausgearbeitet werden, und bei Eckquadern darf man nicht übersehen, dass die Maße auch für die nicht sichtbare Fläche festgelegt werden. Hält man diese Regeln nicht ein, wird man sich bei einem gewissen Typus von Unternehmer unweigerlich mit beträchtlichen Nachforderungen konfrontiert sehen.

12.5 Ausschreibung: VOB Teil A und B

Das Vergabeverfahren richtet sich bei öffentlichen Vergaben nach den Schwellenwerten der Schätzkosten, was unter Umständen eine EU-weite Ausschreibung erfordert und somit den Vergabeprozess verlängert. Seit 2018 werden öffentliche Ausschreibungen in der Regel in elektronischer Form erstellt und die Angebote elektronisch abgegeben. Mit dem Umgang der entsprechenden Vergabeplattformen sollte man sich rechtzeitig vertraut machen.

Der Projektleiter oder Planer führt die Ausschreibung im Namen des Objekteigentümers durch. Grundlagen sind die Regelungen der VOB Teil A und Teil B, Teil C ist über § 1 VOB/B mit vereinbart. Hierbei darf, entgegen üblicher Praxis, nicht nach Belieben von der VOB abgewichen werden. Geschieht dies trotzdem – und sei es nur in einem einzelnen Punkt –, droht der Verlust der gesamten VOB als Vertragsgrundlage. Diese ist stets als Ganzes zu vereinbaren.

Es ist zu prüfen, ob eine offene oder eine beschränkte Ausschreibung oder eine freie Vergabe möglich ist. Bei öffentlichen Aufträgen regeln Schwellenwerte die Art der Ausschreibung wie Direktauftrag (z. B. bis 3 000 €), freie Vergabe (nur in Ausnahmefällen), beschränkte Ausschreibung für einen ausgewählten Bieterkreis (meist relativ niedrige Obergrenzen), Teilnahmewettbewerb vor beschränkter Ausschreibung (langwierigeres Verfahren), öffentliche Ausschreibung, EU-weite Ausschreibung usw. Über die Höhe der Obergrenzen, die sich immer wieder ändern bzw. angepasst werden, sollte man sich rechtzeitig informieren. So müssen beispielsweise Aufträge ab 1 000 000 € Netto-Schätzkosten (Stand 2019) EU-weit ausgeschrieben werden (seit 02/2017 regelt die UVgO im Unterschwellenbereich die Vergabeverfahren, im Oberschwellenbereich gilt die VgV).

Die einzelnen Ausschreibungsarten haben Vor- und Nachteile und es ist eine wohlüberlegte Abwägung zu treffen. Firmen, die bei einer beschränkten Vergabe (ohne oder mit Teilnahmewettbewerb) eingeladen wurden, können kaum mehr wegen Nichteignung ausgeschlossen werden, auch wenn das abgegebene Angebot sich als fragwürdig erweist. Freihändige Vergaben werden vom öffentlichen Auftraggeber sehr restriktiv gehandhabt und sind nur in Ausnahmefällen oder bei kleinen Summen möglich.

Bei öffentlicher Vergabe bietet die VOB alle Möglichkeiten, unqualifizierte Firmen oder solche, die ein Dumpingangebot abgeben, auszuschließen. So kann ein Angebot, welches eindeutig als Unterangebot erkennbar ist, abgelehnt werden. Unqualifizierte Firmen scheiden aus, wenn sie Referenzlisten mit jüngst restaurierten Objekten nicht beibringen können. Um die Ausführungsqualität sicherzustellen, ist bei hochkarätigen Objekten zu raten, das an der Baustelle tätige Personal namentlich festzuschreiben und auch die regelmäßige Anwesenheit des Chefrestaurators zu verlangen. Prinzipiell lässt sich mit der zusätzlichen Einforderung von Eignungsnachweisen (geregelt unter § 6 VOB/A) der Bieterkreis auf fachlich kompetente

Betriebe einschränken. Eine weitere und leider viel zu selten in Betracht gezogene Option der Qualitätssicherung sind Arbeitsmuster der anbietenden Firmen. Sie lassen sich mühelos in das LV integrieren. Preis und Muster werden mit einem ausgeklügelten Punkteschlüssel bewertet, sodass beispielsweise unter den drei Erstbietern nicht unbedingt die „»billigste« Firma den Zuschlag erhält.

Die heute bei Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen gestellten Anforderungen sind nur von Fachkräften zu erbringen, die sowohl in den klassischen Gebieten Steinmetz- und Restaurierungstechnik bestens ausgebildet sind, als auch in naturwissenschaftlichen Fächern wie Gesteinskunde, Physik und Chemie hinreichende Kenntnisse besitzen. Nur im Zusammenwirken dieser Qualifikationen kann letztendlich das Ergebnis der Konservierungsarbeiten den vorangegangenen, gründlichen Voruntersuchungen und den von allen Beteiligten gewünschten Vorstellungen gerecht werden.

Im schriftlichen Umlauf oder in einer zusätzlich anberaumten Sitzung der Projektleitung kann das Ergebnis der Ausschreibung bekannt gegeben und der Auftrag an die Firma der Wahl endgültig erteilt werden. Besteht zum Rücklauf der Angebote Klärungsbedarf, sollten zu diesem Zeitpunkt noch einmal externe Fachleute gehört werden, um z. B. zum angesetzten Stundenaufwand Stellung zu nehmen.

Unternehmen, die im Zuge der Planung beratend tätig waren (Gutachter), können als Bieter durchaus zur Angebotsabgabe aufgefordert werden bzw. an der Ausschreibung teilnehmen. Sie dürfen aber dadurch keinen Wettbewerbsvorteil erlangen. Das heißt, sie dürfen nicht an der Kostenschätzung oder der LV-Erstellung beteiligt gewesen sein, und die von ihnen erstellten Unterlagen müssen allen Bietern zugänglich sein.

Prinzipiell kann man jedem Projektanten, Restaurator und Unternehmer nur dringend empfehlen, die jeweils gültige Fassung der VOB zu studieren und zu kennen. Es gibt immer wieder größere oder kleinere Änderungen und Anpassungen, wie zuletzt in Form der im Februar 2019 veröffentlichten VOB/A (2019). Bei Unklarheiten sollten Bau-Juristen, die Fachabteilungen der Baubehörden oder die Vergabestellen vorab konsultiert werden – das gilt für alle in diesem Kapitel angesprochenen Punkte.

13 Begleitung und Ausführung der Maßnahmen * * *

Inhalt

13.1	Begleitung der Maßnahmen	***	367
13.1.1	Allgemeines.		367
13.1.2	Vergabe der Aufträge: Restaurierungsfirma mit/ohne Begleitung durch Projektanten	***	367
13.1.3	Fachfirmen und mögliche Zwischenuntersuchungen.	***	368
13.1.4	Hinweise zur Ausführung	***	368
13.1.5	Zeitplan	***	369
13.2	Ausführung der Maßnahmen	***	369
13.2.1	Reinigung	**	369
13.2.2	Festigung	**	370
13.2.3	Fugeninstandsetzung	**	371
13.2.4	Steinergänzung mit Steinersatzstoffen und mit Naturstein	**	371
13.2.5	Schlämmen und Putze	**	372
13.2.6	Farbanstriche auf Naturstein	**	372
13.2.7	Hydrophobierung.	**	372
13.2.8	Arbeitsbericht.	***	373
13.2.9	Dokumentation in HERICARE, MONUDOC und arttheses.net	***	377

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

13 Begleitung und Ausführung der Maßnahmen

13.1 Begleitung der Maßnahmen

13.1.1 Allgemeines

Vielleicht erscheint es dem Leser dieses Leitfadens widersprüchlich, dass die Hauptsache, nämlich die Durchführung der Maßnahmen, relativ kurz abgehandelt werden kann. Dies hat aus der Sicht der Verfasser zwei Gründe. Zum einen liegt der Schwerpunkt dieses Leitfadens auf der Planung und Durchführung der naturwissenschaftlichen Untersuchungen. Zum anderen haben die sorgfältigen Voruntersuchungen, zu denen in diesem Leitfaden geraten wird, die eigentlichen Arbeiten so gut vorbereitet, dass die Ausführungen tatsächlich relativ kurz gehalten werden können. Die Auseinandersetzung mit dem Objekt, das Kennenlernen seiner Probleme sollte abgeschlossen sein. Unerwartete Probleme größeren Ausmaßes dürften jetzt nicht mehr auftreten. Sollte dies dennoch der Fall sein, so wäre dies ein schlechtes Zeugnis für die Arbeit aller Beteiligten.

Natürlich kann der Fall eintreten, dass an bislang noch nicht erkundeten Stellen weitere Schäden zu Tage treten, die noch nicht berücksichtigt werden konnten. Diese dürfen aber kein solches Ausmaß annehmen, dass die gesamte Planung und das Konservierungskonzept in Frage gestellt und möglicherweise verändert werden müssen. Sollten gravierende Änderungen in diesem Projektstadium tatsächlich erforderlich sein, so würde dies bedeuten, dass die Bestandsaufnahme unzureichend und die Auswahl der Probestelle falsch getroffen worden wären.

Im Gegensatz zum üblichen Aufbau des Leitfadens werden bei Arbeitsschritt 13 beide Auftragsteile, d. h. die praktische Ausführung der Arbeiten und die Begleitung der Maßnahmen, gemeinsam besprochen.

13.1.2 Vergabe der Aufträge: Restaurierungsfirma mit/ ohne Begleitung durch Projektanten

Die Beschlüsse der vierten Sitzung der Projektleitung können bedeuten, dass die Vergabe der Arbeiten nicht in einem Gesamtpaket, sondern nach Meilensteinen vorgenommen wird. Meilensteine wären bestimmte konservatorische Aufgabenstellungen oder die Fertigstellung einer großen Probeachse. Es wird vom Schwierigkeitsgrad der Arbeiten abhängen, ob für die Einführung der Restaurierungsfirma ein Projektant beauftragt wird, welcher später auch deren Leistungen abnimmt und der Projektleitung die Freigabe weiterer Bauabschnitte signalisiert.

13.1.3 Fachfirmen und mögliche Zwischenuntersuchungen

Für die Projektleitung und den Koordinator bedeutet die Einbindung eines Projektanten eine beträchtliche Entlastung von Arbeit und Verantwortung. An und für sich ist es müßig, darauf hinzuweisen, dass Konservierungsarbeiten an Denkmälern besonders hohen Anforderungen unterliegen. Es sollen deshalb nur Fachfirmen zum Einsatz kommen, welche sich bereits durch hochrangige und qualitätvolle Arbeiten an vergleichbaren Objekten qualifiziert haben.

Um hier ganz sicher zu gehen, könnte der Auftrag an den Projektanten um einen Posten »Zwischenuntersuchungen zur Qualitätssicherung der Restaurierungsmaßnahme« erweitert werden. Ein solcher Auftrag hilft sicher nicht nur dem Auftraggeber, sondern auch dem Ausführenden, da ein positives Ergebnis der Zwischenuntersuchungen seine Arbeitsweise bestätigt, ein negatives ihm die Möglichkeit gibt, seine Methoden umzustellen und sein Engagement zu steigern. In beiden Fällen wird sich das Ergebnis zum Nutzen für das Denkmal erweisen.

Wie in den Arbeitsschritten 12.4 und 12.5 erläutert, sind im Regelfall beschränkte Ausschreibungen vorzuziehen, die nur unter Beteiligung ausgewiesener Fachfirmen ablaufen. Vollständig abzulehnen sind Ausschreibungen im Akkord, insbesondere auch bei Reinigungsmaßnahmen, die früher häufig in diesem Verfahren vergeben wurden. Bei der Vergabe sollte man stets den Unterschied zwischen dem »preiswürdigsten« und dem »preisgünstigsten« Angebot im Auge behalten und denjenigen Anbieter zum Zuge kommen lassen, der zum Preis auch die beste Gewähr für herausragende Qualität garantiert.

13.1.4 Hinweise zur Ausführung

Bei der Ausführung hat sich die Firma genauestens an die Vorgaben des Leistungsverzeichnisses zu halten, welches ja auf den Vorgaben der Probefläche aufbaut und deshalb nicht als Knebelung oder Einschränkung der restauratorischen Freiheit angesehen werden darf.

Im gesamten Ablauf ist regelmäßig mit dem Bauherrn oder mit dem Projektanten Verbindung zu halten, um auf unvermittelt auftretende Schwierigkeiten hinzuweisen. Nichts wäre ungeschickter, als bestehende Unsicherheiten oder Mängel durch den Einsatz von »unerlaubten Hilfsmitteln« zu vertuschen.

Eine gute Hilfe, hier nicht in Bedrängnis zu geraten, ist die Verpflichtung der Firma, nur geschultes Personal unter der Aufsicht eines erfahrenen Restaurators einzusetzen.

Bei der Verarbeitung der Konservierungsmittel sind die Anweisungen der Hersteller präzise einzuhalten. Die Verwendung anderer als der bezeichneten Produkte, also der

Wechsel von einem Produzenten zum anderen, müssen immer mit den Gutachtern abgestimmt werden, damit nicht durch Verwechselungen Fehler passieren.

Bei umfangreicheren Maßnahmen sollte man in Erwägung ziehen, ob nicht mit Hilfe eines Netz- oder Balkenplanes der Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte sicherer koordiniert werden könnte. Ein guter Balkenplan, verbunden mit den laufenden Kosten für geleistete Arbeitsstunden und Materialverbrauch, erleichtert die finanzielle Kontrolle und liefert zu jeder Zeit einen guten Überblick über den Stand des Projekts.

13.1.5 Zeitplan

Bei jeder Maßnahme wird man aufgrund des in Deutschland herrschenden Klimas den Jahresablauf berücksichtigen müssen. Konservierungsmittel, die eine längere Zeit zur Reaktion benötigen, erfordern Unterbrechungen im Zeitablauf, bis die Arbeiten fortgesetzt werden können. Als Beispiel seien hier alle Mörtel- und Putzarbeiten genannt, die nur bei frostfreiem Wetter ausgeführt werden dürfen, weil mindestens so lange, bis das Anmachwasser verdunstet ist, keine Minusgrade eintreten dürfen. Gerade die für die Denkmalpflege so wichtigen Kalkputze erlauben hier keine Kompromisse, wenn gravierende Fehlschläge vermieden werden sollen.

Arbeitsunterbrechungen müssen deshalb rechtzeitig eingeplant werden, damit nicht ungünstige Klimabedingungen eine Fortsetzung oder gar den Abschluss der Arbeiten verhindern. Um Zeitproblemen aus dem Wege zu gehen, sollte man danach Ausschau halten, welche Arbeiten vorgezogen werden können und welche in den Winter als Werkstattarbeiten verlagert werden können.

Die staatlichen Bauverwaltungen können ihren Beitrag dadurch leisten, dass sie die Mittelfreigabe nicht bis in den Herbst verschieben und dann verlangen, dass alles ganz schnell bis zum Rechnungsschluss fertig gemacht wird, weil die Mittel noch bis Jahresende abgerechnet werden müssen.

13.2 Ausführung der Maßnahmen

Obwohl aufgrund der Voruntersuchungen alle Maßnahmen genauestens beschrieben sein sollten, seien hier doch noch einige Anregungen gegeben, was im Einzelnen beachtet werden sollte.

13.2.1 Reinigung

Bei geringer Verschmutzung kann das Abwaschen einer Fassade mit kaltem Wasser oder mit Dampfstrahl – unter der Voraussetzung, dass der erforderliche Arbeitsabstand eingehalten wird – ein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis liefern.

Lösen Schmutz auf Gesimsen kehrt man mit Bürsten ab oder man schaltet eine Wasserreinigung als vorbereitenden Schritt vor die eigentliche Hauptreinigung ein. Bei der eigentlichen Reinigung sollten bevorzugt nur trockene Mikropartikelstrahl-Reinigungsverfahren zum Einsatz kommen. Die Technik ist mittlerweile so ausgefeilt, dass nur in wenigen Ausnahmen Bedarf nach anderen Verfahren bestehen dürfte. Trotzdem muss auch bei diesen Verfahren sorgfältig gearbeitet werden. Das größte Risiko besteht wohl darin, lockeres Steinmehl unter abstehenden Krusten auszublasen. Die Vorfestigung darf also nicht vergessen werden. Sind unterschiedliche Methoden für die großen Mauerwerksflächen und die Ornamente vereinbart worden, so darf natürlich diese Trennung nicht aufgehoben werden. Auch ein Wechsel des Strahlgutes »hinter vorgehaltener Hand« ist in keinem Fall zu entschuldigen. Da solche »Unregelmäßigkeiten« aber immer wieder passieren, sei dem Auftraggeber geraten, vorab bereits Konventionalstrafen zu vereinbaren. Für viele Reinigungsprobleme eignet sich auch der Einsatz des Lasers, insbesondere bei schwarzen Krusten auf hellen Gesteinen wie Marmor oder Kalkstein, wo der Laserreinigung immer der Vorzug gegeben werden sollte. Die Lasertechnik ist heute so weit fortgeschritten, dass nicht nur einzelne Bauteile, sondern auch große Gebäude gereinigt werden können, ohne dass nennenswerte Teuerungen entstehen. Sofern dies im Leistungsverzeichnis vermerkt ist, können für einfaches Mauerwerk und Bauornamente unterschiedliche Reinigungsmethoden zum Einsatz kommen.

13.2.2 Festigung

Der Erfolg der Maßnahme liegt in der genauen Einhaltung der Vorgaben für die Verarbeitung. Das Gestein muss nach Regenfällen ausreichend abgetrocknet sein; Tränkungen dürfen nicht an heißen oder intensiv von der Sonne beschienenen Flächen ausgeführt werden. Die im LV festgelegte Applikationstechnik ist anzuwenden und die Tränkzeiten sind einzuhalten. Temperatur- und Feuchtemessungen an der Fassade sichern den richtigen Behandlungszeitraum. Das verwendete Produkt muss frisch aus dem Gebinde entnommen werden. Kieselsäureester »altern« bei langer Lagerung, ihre Eindringfähigkeit nimmt ab, und graue Gelschleier sind das mögliche Negativergebnis. Der Bauherr tut unter Umständen gut daran, das Festigungsmittel auf eigene Rechnung zu kaufen und dem Verarbeiter zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise kann er der Versuchung vorbeugen, dass mehr Festigungsmittel abgerechnet werden als tatsächlich verbraucht wurden. Ob er das wirklich machen soll, sei gründlich überlegt, da diese Handlung Auswirkungen auf die Gewährleistung haben kann (siehe Kapitel 12.4.3).

13.2.3 Fugeninstandsetzung

Im Grunde können hier nur die für diese klassische Restaurierungsarbeit bekannten »Weisheiten« wiederholt werden: frostfreie Witterung, sorgfältiges Auskratzen des Altmörtels, Ausblasen und/oder Ausspülen des Staubs, Vornässen der Fugenflanken, Einbringen des neuen Fugenmörtels in richtiger Konsistenz (Menge des Anmachwassers beachten), Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung, bei Bedarf Feuchthalten über den erforderlichen Zeitraum. Alle Regeln sollen davor bewahren, dass die Fugenmörtel beim Abbinden von den Flanken abreißen und Haarrisse entstehen, durch die Regenwasser eindringen kann.

Pressfugen dürfen nicht künstlich mit der Flex erweitert werden, um das Arbeiten mit herkömmlichen Fugeisen zu ermöglichen. Die der Aufgabenstellung angepasste Injektionstechnik ist anzuwenden, damit die ausreichende Eindringtiefe des Mörtels gewährleistet ist. Für weiteren Informationsbedarf wird auf Arbeitsschritt 11.1.6 verwiesen.

13.2.4 Steingergängung mit Steinersatzstoffen und mit Naturstein

Nochmals wird darauf verwiesen, dass bei der Verwendung von richtig eingestellten Steinersatzstoffen (Restauriermörteln) die Fehlstellen nicht oder fast nicht ausgespitzt werden müssen. Mörtel mit dem Bindemittel Kieselsol können ohne Weiteres »auf Null« ausgedünnt werden. Auch dispersionsvergütete Steinersatzstoffe können bei guter Verarbeitung in dünnsten Schichten aufgetragen werden. Ist der Untergrund nicht tragfähig, muss eine Vorfestigung mit Kieselsäureester vorgenommen werden. Die unter Umständen über einige Zeit auftretende hydrophobe Wirkung auf der Oberfläche braucht einige Zeit, um sich zu verlieren, sodass dieser Zeitverzug einkalkuliert werden muss. Restauriermörtel werden grundsätzlich »erdfeucht« verarbeitet, damit sie entsprechend modelliert werden können. Um die feste Verbindung mit dem Stein zu gewährleisten, ist für ein ausreichendes Vornässen zu sorgen. Gegebenenfalls kann eine Lage dispersionsvergüteter Restauriermörtel unterlegt werden. Armierungen dienen nicht der festeren Verbindung zum Untergrund, sondern stellen nur eine Sicherheit dar, damit lose Mörtel nicht herunterfallen können. Die fachgerechte Armierung besteht nur aus einem Bügel aus rostfreiem Stahl.

Um Fehlschläge zu vermeiden, sind die klimatischen Voraussetzungen für die Verarbeitung von Steinersatzstoffen einzuhalten: frostfreies Wetter, Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung, Vornässen der Flächen, Pflege bei der Aushärtung durch Nachbefeuchten etc.

Da das fachgerechte Herstellen und Einpassen von Natursteinvierungen als steinmetzmäßige und restauratorische Technik vorausgesetzt wird, kann hier auf eine

erneute Behandlung dieser Problematik verzichtet werden (siehe hierzu Arbeitsschritt 11.1.3).

13.2.5 Schlämmen und Putze

Auch für diese Arbeiten gelten die Ausführungsrichtlinien, die für alle Arbeiten mit mineralischen Mörtelsystemen gültig sind: ausreichend tragfähiger Untergrund, Vorfestigung bei Bedarf, Vornässen, striktes Einhalten der Verarbeitungsvorschriften, insbesondere der Menge des Anmachwassers, Schutz gegen zu starkes Austrocknen, frostfreies Wetter. Aus diesem Grund kann der Fall eintreten, dass bereits Ende September/Anfang Oktober nicht mehr verputzt werden kann. Reine Kalkmörtel bedürfen einer gewissenhaften Pflege, da sie ihre Härte nur sehr langsam entwickeln und in dieser Zeit gegen Frost und Trockenheit überaus empfindlich sind.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Anschlüsse an andere Fassadenelemente wie Fensterstöcke oder Gesimse zu legen. Ist die Putzstärke zu dick oder passt sie? Oberflächenschlämmen auf der Basis von Kieselöl müssen unter Umständen mit dem Pinsel eingerieben werden, damit lockere Schuppen fixiert werden. Bei Bedarf muss nachgefestigt werden, was jedoch im LV festgelegt sein muss.

13.2.6 Farbanstriche auf Naturstein

Am wichtigsten erscheint der Hinweis, dass die Verarbeitung reiner Kalkfarben und Silikatfarben große Erfahrung erfordert. Die Angaben der Hersteller müssen deshalb streng eingehalten werden. Der Untergrund ist in geeigneter Weise vorzubereiten, damit die Saugfähigkeit gleichmäßig ist und kein fleckiges Bild entsteht. Die Gebinde müssen frisch sein, reine Silikatfarben den Angaben entsprechend rechtzeitig vorher »eingesumpft« werden. Bei der Verarbeitung muss ständig die Konsistenz der Farbe geprüft werden, damit sich die Füllstoffe nicht absetzen. Auf keinen Fall darf gestrichen werden, wenn Frost bevorsteht. Auf alle Fälle sind kleinere Muster anzulegen bevor mit großem Elan eine ganze Fassade gestrichen wird.

13.2.7 Hydrophobierung

Alle Arbeiten mit wässrigen Systemen müssen vor dieser Maßnahme abgeschlossen sein. Die Einhaltung der Vorgaben aus der Musterfläche garantiert auch hier den Erfolg und die Wirksamkeit der Behandlung. Das vorgeschriebene Mittel ist mit dem empfohlenen Applikationsgerät genau so lange zu applizieren, wie es in den Anleitungen zur Verarbeitung, die in den Gutachten beschrieben sind, verlangt wird. Zur Temperatur- und Feuchtemessung wird geraten, um die richtigen Klimabedingungen für die Verarbeitung einhalten zu können. Das Gestein muss nach Regenfällen

hinreichend abgetrocknet sein, um die nötige Saugfähigkeit zu besitzen. Direkte Sonneneinstrahlung ist zu vermeiden und bei zu heißen Tagen über 30 °C sollte auf keinen Fall gearbeitet werden. Ebenso verbieten sich natürlich Temperaturen um 0 °C, Frost oder die Gefahr von Tauwasserbildung während der Verarbeitung der Mittel.

13.2.8 Arbeitsbericht

Der Arbeitsbericht, während und nach den Maßnahmen aufgezeichnet, ist ein wichtiges Zeugnis, die Qualität der Ausführung zu belegen. Sein unschätzbarer Nutzen liegt aber auch in der Zukunft. Nachkontrolle und Langzeitüberwachung bedürfen der genauesten Bezeichnung der Flächen, wo die diversen Konservierungsmittel eingesetzt und mit welchen Methoden sie appliziert wurden. Mögliche künftige Schäden können besser verstanden und in der Folge vermieden werden. Die für Denkmäler so entscheidende Frage nach der Verträglichkeit und Dauerhaftigkeit von Maßnahmen kann nur auf lange Sicht und auf der Grundlage hervorragender Dokumentationen und Nachkontrollen befriedigend beantwortet werden.

Das DBU-Projekt »Monitoring« hat auch für die grafische Dokumentation der Maßnahmen eine Vorlage ausgearbeitet [AURAS et al. (2010)]. Die Vorlage legt fest, wie diese mit Farbe, Signatur oder Schraffur in bestehende Pläne eingezeichnet werden können (siehe Bild 141). Wie im Falle der Schadenskartierung ist zu hoffen, dass diese Vorlage bald in den betroffenen Fachkreisen als Standard angenommen wird.

Die Dokumentation hat aus einem grafischen und einem schriftlichen Teil zu bestehen. Es empfiehlt sich, als Vorlage den Berichtbogen von HERICARE beim Hornemann Institut in Hildesheim zu verwenden. Für die Beschreibung der durchgeführten Arbeiten werden die gleichen Angaben wie bei der Musterfläche verlangt. Die erforderlichen Informationen sind in den Tabellen 15–23 zusammengestellt. Die durchgeführten Maßnahmen sind grafisch auf einem oder mehreren Plänen einzutragen (als Beispiele siehe Bild 142 und Bild 143).

DBU - Projekt Monitoring: Kartierung Maßnahmen Naturstein/ Kunststein/ SES								
Merkmal/Bezeichnung	Ziffer/Buchstabe			Symbol	Signatur		Farbton	
Festigung	1	A	I	△			RAL 1016 Stabilo 8744 alt Stabilo 87/205	
Mörtelkittung/ Anböschen	2	B	II	△			RAL 1033 Stabilo 8734 alt Stabilo 87/215	
	3	C	III	▽			RAL 2008 Stabilo 8754 alt Stabilo 87/235	
Hohlrauminjektagen	4	D	IV	▽			RAL 3002 Stabilo 8748 alt Stabilo 87/315	
	5	E	V	□			RAL 3015 Stabilo 8729 alt Stabilo 87/355	
Schutzanstrich/ Schlämmen	6	F	VI	□			RAL 4006 Stabilo 8727 alt Stabilo 87/340	
Salzminderung	7	G	VII	◇			RAL 5012 Stabilo 8757 alt Stabilo 87/450	
Hydrophobierung	8	H	VIII	◇			RAL 5002 Stabilo 8732 alt Stabilo 87/405	
	9	I	IX	○			RAL 6017 Stabilo 8733 alt Stabilo 87/575	
Biozidbehandlung	10	J	X	⊖			RAL 6005 Stabilo 8743 alt Stabilo 87/520	
	11	K	XI	⊕			RAL 8001 Stabilo 8739 alt Stabilo 87/685	
Mörtelantragung	12	L	XII	⊕			RAL 8014 Stabilo 8745 alt Stabilo 87/635	
Krustenreduzierung	13	M	XIII	◇				
Reinigung	14	N	XIV	⊕				
Verdübelung	15	O	XV					
Rissversorgung	16	P	XVI					
Fugenbehandlung	17	Q	XVII					
Verpressen/ Verkleben	18	R	XVIII	▼				

Bild 141: Vorlage für die Dokumentation von Maßnahmen nach DBU-Projekt »Monitoring« [AURAS et al. (2010)]

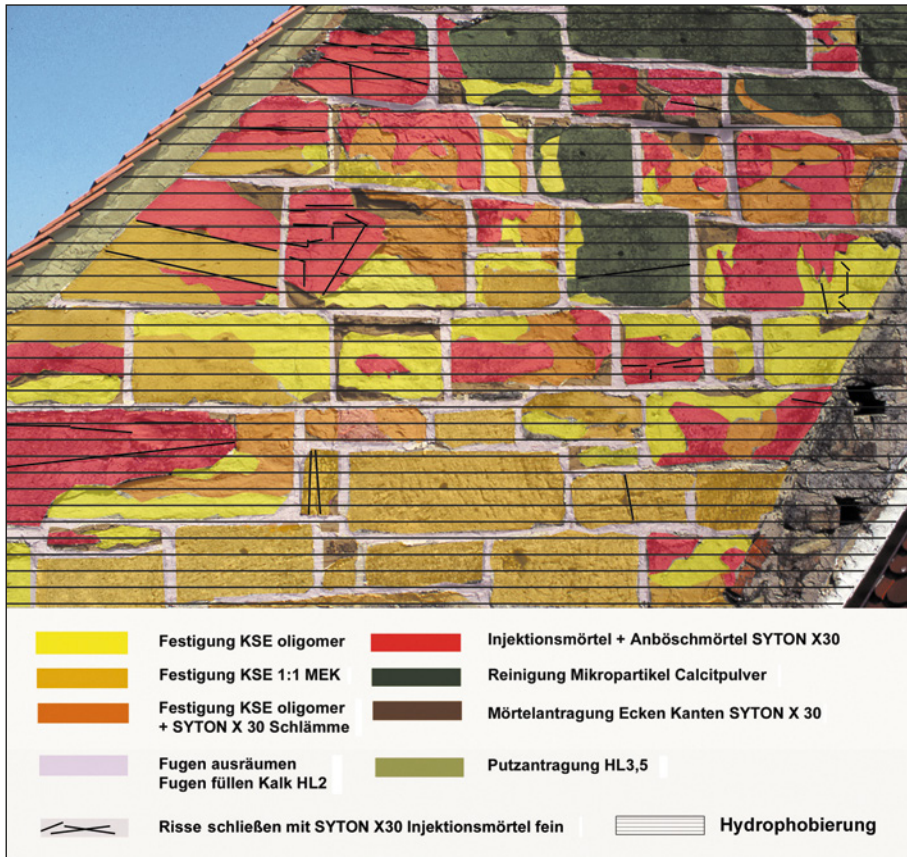


Bild 142: Maßnahmendokumentation für den Westgiebel (Ausschnitt) der Klosterkirche Birkenfeld

Mit besonderer Sorgfalt muss der schriftliche Bericht angefertigt werden. Alle wichtigen Arbeitsschritte sind mit aussagekräftigen SW-Fotos zu belegen, welche nach wie vor die beste Dauerhaftigkeit besitzen [vgl. SCHMIDT (1997)]. Von den Auftraggebern werden weiterhin heute mehrfache Ausdrücke und elektronische Versionen des Abschlussberichts gefordert. Material- und Herstellerlisten müssen vollständig sein und alle Angaben zur Verarbeitungstechnik und den verbrauchten Mengen enthalten. Die Produkte sind nach Handelsname und chemischer Stoffgruppe zu bezeichnen; Herstellerfirmen und Bezugsquellen mit vollständiger Anschrift sind zu benennen. Bei Mörteln, Injektionsstoffen und Hinterfüllmassen etc. sind die Rezepturen genau und vollständig anzugeben. Die Hinweise zu den klimatischen Bedingungen im Verlauf der Arbeiten müssen mindestens die Maximal- und Minimaltemperaturen beinhalten und auf besondere Ereignisse, z.B. die Unterbrechung oder Behinderung der Arbeiten durch Regenfälle oder andere Vorfälle hinweisen. Informative Beispiele finden sich in SNETHLAGE et al. (1996b, c, d).

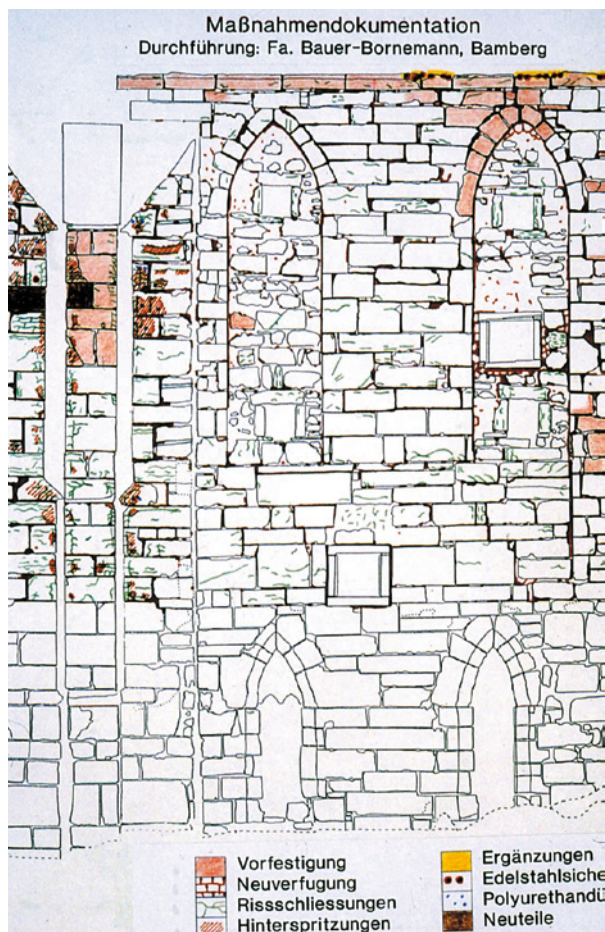


Bild 143:
Maßnahmenokumentation
an der Südfassade von
Kloster Birkenfeld (Fa. U.
Bauer-Bornemann, 1989)

13.2.9 Dokumentation in HERICARE, MONUDOC und arttheses.net

Damit die mit Hilfe dieser Vorgaben erstellten Dokumentationen nicht ausschließlich in behördlichen oder privaten Archiven verschwinden, sondern dem interessierten Fachpublikum zugänglich werden, sollten die Berichte entweder der Datenbank HERICARE beim Hornemann Institut in Hildesheim oder dem Fraunhofer Informationszentrum Raum und Bau IRB in Stuttgart (der Datenbank BAUF0) zur Verfügung gestellt werden. Die früher beim Umweltbundesamt angesiedelte Datenbank MONU-FAKT wurde bereits vor Jahren abgegeben und an das Hornemann Institut transferiert. Eine neuere Datenbank ist die Kunstgeschichtsdatenbank arttheses.net.

Ferner sei noch darauf hingewiesen, dass bei einer Projektförderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt oder den BMBF die Abgabe des Abschlussberichts an eine der genannten Institutionen ein verpflichtender Bestandteil der Bewilligung ist.

Den Archiven der Staatshochbauämter und den meisten Denkmalämtern ist in diesem Punkt leider ein schlechtes Zeugnis auszustellen. Einerseits verlangen sie mit Nachdruck nach den ausführlichen Berichten, andererseits verlaufen sich diese dann oft in den Arbeitszimmern und werden regelmäßig an die Hauptstaatsarchive abgegeben. Personalwechsel tun sein übriges dazu, weil die Nachfolger nicht ordentlich in ihr neues Gebiet eingeführt werden und nichts von den Berichten wissen. Die sichersten Quellen sind aus diesem Grund häufig die privaten Archive der Restaurierungsfirmen, die hier ein ungeheures Wissen angehäuft haben. Der Verfasser erinnert sich an unzählige Fälle, bei denen die Vertreter der Staatsbauämter treuherzig mitgeteilt haben, sie hätten keine Unterlagen finden können.

Zusätzlich zu den genannten Möglichkeiten der Dokumentation in öffentlichen Datenbanken bietet natürlich das Internet ausgezeichnete Voraussetzungen, die eigene Homepage mit aktuellen Berichten in Volltext oder in Ausschnitten anzureichern. Dieser Schritt ist aber mit dem Auftraggeber abzustimmen, der mit der Bezahlung der Leistung auch die Vertriebsrechte erwirbt.

14 Fünfte Sitzung der Projektleitung ***

Inhalt

14.1	Abnahme der Leistungen (VOB Teil B)	***	381
14.2	Kontrolle von Kosten- und Zeitplan	***	382
14.3	Programm für die Nachuntersuchungen	**	382
14.4	Wartungsverträge	*	382

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

14 Fünfte Sitzung der Projektleitung

14.1 Abnahme der Leistungen (VOB Teil B)

Nach Abschluss der Arbeiten trifft sich der Projektausschuss am Objekt, um die Leistungen abzunehmen. Damit die Begutachtung zielorientiert abläuft, muss sich der Koordinator im Vorfeld mit dem Sachstand vertraut machen und sich die visuell erkennbaren Mängel notieren, die er der Projektleitung vortragen will. Es ist zweckmäßig, vorab mit der ausführenden Firma eine Begehung zu machen (»Vorabnahme«), um Beanstandungen möglichst schon im Vorfeld zu klären.

Über die Abnahme wird ein Protokoll gefertigt (§ 12 VOB-Teil B), das die Mängelliste (§ 12 Nr. 4 VOB-Teil B) und die Vereinbarungen über die zu erfüllenden Nachbesserungen (§ 13 Nr. 5 VOB-Teil B) samt Fristsetzung enthält. Die Mängel sollen so eingehend besprochen werden, dass über die Nachbesserungen auf beiden Seiten Klarheit besteht. Häufige, bereits mit dem bloßen Auge erkennbare Fehler sind z. B. abgelöste Fugenflanken, in Struktur und Farbe ungeeignete Steinersatzmaterialien, lose Anstrichungen, unsachgemäße Verdübelungen von Verblechungen etc. Bei gravierenden Mängeln oder der Kumulation zahlreicher kleinerer Mängel kann die Abnahme verweigert werden. Sind die Beanstandungen so gravierend, dass eine Nachbesserung nicht möglich ist, sind Maßnahmen für einen Schadenersatz nach § 13 Abs. 7 VOB/B in die Wege zu leiten.

Die an der Abnahme beteiligten Personen sollten sich darüber im Klaren sein, dass nur die mit dem Auge sichtbaren, offensichtlichen Fehler festgestellt werden können. Fehlanwendungen von Konservierungsmitteln, der Gebrauch von anderen als den vorgeschriebenen Produkten sowie weitere, beabsichtigte oder unbeabsichtigte Unregelmäßigkeiten bleiben dagegen zumeist vorerst unerkannt. Solche Mängel können mit einer auf naturwissenschaftlichen Analysemethoden basierenden Nachuntersuchung aufgedeckt werden. Aus zwei Gründen wird deshalb zu einer gründlichen Nachkontrolle mit naturwissenschaftlichen Nachweismethoden geraten.

Zum einen erfährt der Bauherr die Gewissheit, dass seinem Objekt die nach dem Stand des Wissens und der Technik derzeit bestmögliche Behandlung zuteil geworden ist, die auch die größtmögliche Dauerhaftigkeit verspricht. Zum anderen bedeutet die Möglichkeit einer analytischen Nachkontrolle für unseriöse Verarbeiter das Risiko, dass ihre ungesetzlichen Praktiken aufgedeckt werden. Nicht zuletzt aber nützt die Nachkontrolle der angewandten Konservierungsforschung und liefert die für spätere Nachuntersuchungen zur Langzeitwirksamkeit erforderliche Datenbasis.

Soll die Abnahme durch die Ergebnisse einer Nachkontrolle mit naturwissenschaftlichen Analysemethoden unterstützt werden, dann geschieht dies sinnvollerweise vor der förmlichen Abnahme. Wie bereits gesagt, betrifft die Abnahme freilich nur die sichtbaren bzw. bekannten Mängel. Versteckte Mängel oder Täuschungsversuche,

die nach der Abnahme entdeckt werden, gehen dann selbstverständlich allein zu Lasten des Auftragnehmers.

In diesem Zusammenhang sei noch auf folgende Punkte hingewiesen: Der Auftragnehmer muss sein Werk bzw. seine Bauteile schützen, so lange sie nicht abgenommen sind. Eine Teilabnahme in sich geschlossener Abschnitte ist möglich und sinnvoll. Sobald die Abnahme erfolgt ist, kehrt sich die Beweispflicht um. Verantwortlich ist jetzt der Auftraggeber und nicht mehr der Auftragnehmer. Die Gewährleistungsfrist beginnt mit dem Tag der förmlichen Abnahme. Wird vertraglich keine gesonderte Frist vereinbart, so beträgt sie vier Jahre (§ 13 Abs. 4 Nr. 1 VOB/B).

14.2 Kontrolle von Kosten- und Zeitplan

Die Ergebnisse der Abnahme wirken sich auf den Kosten- und Zeitplan aus. Es ist die Aufgabe des Koordinators, der Projektleitung den Zeit- und Kostenrahmen für die erforderlichen Nachbesserungen vorzulegen. Der Koordinator hat auch die bis zur Abnahme entstandenen Kosten, aufgeschlüsselt nach einzelnen Gewerken und Firmen, offen zu legen. Die Ursachen für eingetretene Abweichungen vom Zeitplan und bei den Kosten sind zu begründen und zu diskutieren. Nur wenn die Mängel des Verfahrens klar erkannt sind, können sie bei künftigen Projekten auch vermieden werden.

14.3 Programm für die Nachuntersuchungen

Abschließend ist das Programm für die Nachuntersuchungen zu besprechen und zu bewilligen, durch die mit Hilfe von physikalischen und chemischen Untersuchungsmethoden der Nachweis erbracht werden soll, ob die Durchführung die Vorgaben der Laboruntersuchungen und des Praxistests an der Musterfläche erfüllen konnte oder ob beträchtliche Mängel aufgetreten sind, die einer weiteren Nachbesserung bedürfen.

14.4 Wartungsverträge

Nur die regelmäßige Wartung von Denkmälern schützt vor dem versteckten Anwachsen von Schäden. Wartungsverträge bieten die Gewähr, dass kleine Mängel behoben werden können, bevor sie ein bedrohliches Ausmaß annehmen. Die Projektleitung hat deshalb darüber zu befinden, ob ein Wartungsvertrag mit einem Restaurator für das betreffende Objekt geschlossen wird. Es ist die Aufgabe des Koordinators, diesen Punkt der Besprechung durch Einholung von Angeboten und Feststellung der Kosten vorzubereiten. Diese meist geringfügigen Kosten sollten im Etat für den laufenden Unterhalt unterzubringen sein, auch wenn staatlicherseits gern das Gegenteil behauptet wird.

15 Nachkontrolle, Monitoring und Wiederbehandlung **

Inhalt

15.1	Allgemeines		385
15.2	Messprogramm für die Nachuntersuchung	**	385
15.3	Auswertung für das Messprogramm/Nachkontrolle	**	386
15.4	Dokumentation der Nachkontrolle	**	386
15.5	Monitoring	**	387
15.5.1	Systematik des Langzeitmonitoring		388
15.5.2	Untersuchungsmethoden für das Naturstein-Monitoring		388
15.6	Empfehlungen für Untersuchungsschritte bei der Wiederbehandlung ...		390
15.7	Zeitplan für Monitoring und Wiederbehandlung		397

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

15 Nachkontrolle, Monitoring und Wiederbehandlung

15.1 Allgemeines

Die Nachkontrolle dient dazu, die nur mit messtechnischen Verfahren nachweisbaren Veränderungen der Gesteinseigenschaften zu beurteilen. Sie sind vielleicht der wichtigste Abschnitt der Qualitätsprüfung, da nur so festgestellt werden kann, wie gut es der Firma gelungen ist, die Vorgaben der Probefläche am Gesamtobjekt umzusetzen. Es wäre falsch, diese Kontrolle als Schikane aufzufassen. Sie dient nämlich in der Hauptsache nicht dem Zweck, mögliche Fehlanwendungen oder gar Betrugsfälle aufzudecken, obgleich sie auch in dieser Hinsicht ein nützliches Instrument darstellt.

Nachuntersuchungen haben ihren Wert nicht nur für die unmittelbar jetzt abgeschlossenen Maßnahmen, sondern besonders in der Zukunft. Ihr wesentlicher Nutzen ist darin zu sehen, verlässliche Daten zu erhalten und zu dokumentieren, mit denen später die Dauerhaftigkeit der Konservierungsmaßnahmen verfolgt und beurteilt werden kann. In dieser Hinsicht ist eine Nachkontrolle unverzichtbarer Bestandteil jeder Konservierungsmaßnahme. Auch der Wunsch von Bauherren und Denkmalpflegern, die Richtigkeit der getroffenen Entscheidungen und die Langzeitbeständigkeit der eingesetzten Materialien bestätigt zu bekommen, kann nur mit Hilfe einer Nachkontrolle erfüllt werden. Will man aus den heutigen Maßnahmen für die Zukunft lernen, dann sollte man auch davon überzeugt sein, dass die Nachkontrolle am Objekt immer noch die verlässlichsten Ergebnisse für die Bewertung der Wirksamkeit von Konservierungsmaßnahmen liefert.

Regelmäßiges Monitoring in bestimmten, festgelegten Zeitintervallen dient vor allem dazu, die nachlassende Wirksamkeit der Konservierungsmaßnahmen rechtzeitig zu erkennen, bevor gravierende Schäden sichtbar geworden sind. Die für ein Monitoring erforderlichen Messungen können zum Beispiel in die bereits erwähnten Wartungsverträge eingebunden werden. Der Vorteil gegenüber einem normalen Wartungsvertrag ohne Messprogramm besteht darin, dass auch mit dem bloßen Auge nicht erkennbare Mängel detektiert werden können.

Werden im Verlauf des Monitoring bestimmte Grenzwerte überschritten, dann ist die Zeit gekommen, eine Wiederbehandlung ins Auge zu fassen. Im Folgenden werden für die drei Maßnahmenpakete passende Messmethoden und Bewertungen beschrieben.

15.2 Messprogramm für die Nachuntersuchung

Die Nachuntersuchungen, welche am besten geeignet sind, die oben aufgeworfenen Fragen zu beantworten, lassen sich nicht pauschal beantworten. In erster Näherung

sollte das Untersuchungsprogramm diejenigen Messungen beinhalten, welche auch für die Auswertung der Probefläche eingesetzt worden sind. Selbstverständlich sind, wenn möglich, zerstörungsfreie, zumindest aber zerstörungsarme Methoden zu bevorzugen. Aus diesem Grunde kann an dieser Stelle zunächst auf die im Arbeitsschritt 11 gemachten Ausführungen verwiesen werden. Unter Umständen kann das Programm der Probefläche sogar vereinfacht werden, obwohl nicht ausgeschlossen werden kann, dass weitere Untersuchungen hinzugenommen werden müssen.

Da nicht die Notwendigkeit besteht, alle bereits genannten Untersuchungsmethoden mit ihren Anwendungsgebieten, Vor- und Nachteilen erneut zu wiederholen, mögen hier nur wenige Denkanstöße genügen.

Der Erfolg der Reinigungsmaßnahmen sollte an repräsentativen Stellen mikroskopisch, vielleicht sogar mit dem REM, beurteilt werden. Festigungsmaßnahmen wären auf jeden Fall mit Hilfe einer ausreichenden Zahl von Festigkeitsprofilen zu überprüfen, um die Umsetzung der an der Probefläche entwickelten Methoden zu überprüfen. Bei Hydrophobierungsmaßnahmen können mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen eine Reihe von Messstellen, die schon vor der Behandlung gemessen worden sind, erneut gemessen werden, um die Wirkung vor und nach der Behandlung zu ermitteln. Auch für Fugenmörtel und Antragungen können geeignete Methoden gefunden werden, welche später die Veränderung der Eigenschaften zu beurteilen gestatten.

15.3 Auswertung für das Messprogramm / Nachkontrolle

Für die Auswertung gelten im Grunde die gleichen Kriterien, die der Auswahl der Konservierungsmittel zugrunde gelegt sind. Den Idealfall, dass im Vergleich zu den Laboruntersuchungen und den Messungen an der Musterfläche keine Abweichungen aufgetreten sind, wird es im Realfall nicht geben. Aus diesem Grund sind Abweichungen in bestimmten Grenzen zugelassen, wie sie z. B. bei der Bewertung von Festigkeitsprofilen bereits ausführlich besprochen worden sind. Auch beim w-Wert können bestimmte Schwankungen auftreten, welche aber nicht das Wirksamkeitskriterium von $w \leq 0,1 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$ verletzen dürfen. Besonders kritisch ist die erzielte Eindringtiefe zu prüfen, bei der keine Abstriche von den gestellten Forderungen hingenommen werden sollten. Alle benötigten Informationen sind in den Tabellen 5–14 zusammengestellt.

15.4 Dokumentation der Nachkontrolle

Die Stellen, an denen Messungen vorgenommen worden sind, müssen für spätere Vergleichsmessungen auf einem Plan exakt festgehalten werden. Zusätzlich ist ein schriftlicher Bericht abzuliefern, der in möglichst straffer Form gehalten sein sollte.

Mängel und Abweichungen von den Anforderungskriterien sind offen zu legen und mit SW-Fotos zu belegen. Es sind Vorschläge zu machen, ob die Mängel durch Nachbesserungen behoben werden können und welche Maßnahmen hierfür gegebenenfalls in Frage kommen. Abschließend soll ein zeitliches Programm für künftige Nachuntersuchungen vorgeschlagen werden. Ein solches Folgeprogramm ist z. B. besonders bei Hydrophobierungen zu empfehlen, um den Zeitpunkt der nachlassenden Wirkung feststellen zu können.

15.5 Monitoring

Die Arbeitsgruppe Naturstein-Monitoring hat sich in dem gleichnamigen DBU-Projekt ausführlich über die Messmethoden Gedanken gemacht, die für das Monitoring von Konservierungsmaßnahmen geeignet sind, und darüber einen Leitfaden verfasst, der beim Fraunhofer IRB Verlag erschienen ist [AURAS et al. (2010)]. Im Entwurf der DIN EN 15898 des Technischen Komitees CEN TC 346 wird Monitoring als das Messen von Materialeigenschaften und/oder Einflussfaktoren der Umwelt über einen längeren Zeitraum hinweg erklärt.« [Arnold in AURAS et al. (2010)]. Die Tatsache, dass die regelmäßige Überwachung von Denkmälern im Rahmen der europäischen Normungsbestrebungen eine gesonderte Betonung erfährt, ist ein hinreichender Beleg dafür, dass man endlich den Nutzen nachhaltiger Gebäudebewirtschaftung erkannt hat und den Schritt von der in großen Zeitintervallen zwangsläufigen Generalsanierung zur regelmäßigen und Kosten sparenden Wartung vollziehen möchte.

Im Leitfaden Naturstein-Monitoring wird zunächst eine Systematik für das Langzeitmonitoring vorgeschlagen, welche die einzelnen Arbeitsschritte umfasst, die im Verlauf eines Monitoringprojekts bearbeitet werden müssen. Darauf folgt eine Liste mit geeigneten Untersuchungsmethoden, mit denen wichtige Materialeigenschaften und die Langzeit-Wirksamkeit der Konservierungsmaßnahmen erfasst und beurteilt werden können. Bei der Auswahl der Messmethoden wurde ganz bewusst Wert darauf gelegt, dass die Verfahren einfach und kostengünstig sind, und dass sie so erprobt sind, dass sie auch nach vielen Jahren noch in Gebrauch sind. Es handelt sich deshalb hauptsächlich um sogenannte Low-Tech-Methoden, die ohne großen apparativen Aufwand zum Einsatz kommen können. Weil die Vergleichbarkeit der Messungen, die von verschiedenen Menschen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt werden, bei jeder Art von Messmethode der ausschlaggebende Parameter ist, enthält der Leitfaden jeweils eine genaue Handlungsanweisung zur Durchführung und zur Auswertung der vorgeschlagenen Messmethoden.

15.5.1 Systematik des Langzeitmonitoring

Die Frage des Langzeitmonitoring ist eigentlich nicht neu [siehe RATHGEN & KOCH (1934)]. Schon zu Beginn des 20. Jh. sind groß angelegte Programme zur Bestimmung der Witterungsbeständigkeit von Natursteinen und zur Erprobung von Stein- schutzmitteln aufgelegt worden. Der große Unterschied zu den damaligen Ansätzen besteht heute darin, dass es geeignete Messmethoden gibt, die vor Ort eingesetzt werden können, und dass auf der Basis von deren Messwerten neutrale Bewertungskriterien aufgestellt werden können. Beides hatte man damals nicht zur Verfügung, und der größte Irrtum bei der Anlage von Testflächen bestand wohl darin, dass man sichtbare Veränderungen in zu kurzen Zeitabschnitten erwartete. Aus diesem Grund blieb die Aussagekraft all dieser Musterflächen in höchstem Maße begrenzt. Der dramatische Einschnitt des Zweiten Weltkriegs unterband zudem jede weitere Forschung in dieser Richtung, sodass diese wohl gemeinten Ansätze vollkommen in Vergessenheit gerieten und meist heute nicht mehr auffindbar sind. Die nachfolgende Tabelle 33 gibt einen Überblick über den Ablauf eines Monitoringprojekts.

Tabelle 33: Beispiel für den Ablauf eines Monitoringprojekts [nach Arnold in AURAS et al. (2011)]

1	Inspektion des Objekts
2	Sichtung von Archivunterlagen
3	summarische Bestands- und Zustandserfassung Beschreibung der Umgebungsbedingungen Lokalisierung früherer Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen und Vergleich mit den vorliegenden Dokumentationen
4	Festlegung der Referenzflächen
5	Dokumentation der Referenzflächen Bestands- und Schadenskartierung der Referenzflächen Beschreibung der Schadensarten und deren Umfang fotografische Dokumentation naturwissenschaftliche Untersuchungen
6	Auswertung: Bewertung der Zustandsveränderungen seit der letzten Inspektion, Festlegung der künftigen Monitoring Intervalle
7	Abfassung des Berichts
8	Abstimmung mit dem Eigentümer
9	bei Bedarf Konservierungs-, Restaurierungs-, Wartungsarbeiten

15.5.2 Untersuchungsmethoden für das Naturstein-Monitoring

Wie bereits erwähnt, hat die Arbeitsgruppe einige erprobte und kostengünstige Messmethoden ausgesucht, mit deren Hilfe der Verwitterungsverlauf und die Veränderung der Wirksamkeit der Konservierungsmittel aufgezeichnet werden können.

Die folgende Liste der Messmethoden umfasst nicht alle Methoden, die im Leitfaden Naturstein-Monitoring [AURAS et al. (2010)] aufgeführt sind und dort ausführlich beschrieben werden. Verzichtet wurde auf die Methoden, die einen größeren apparativen Aufwand erfordern.

- **Kartierung von Bestand und Schadensphänomenen**

Die Methoden der Kartierung sind in diesem Leitfaden bereits ausführlich besprochen und sollten deshalb bestens bekannt sein. Der Vorschlag zur einheitlichen Kartierung von Schadensphänomenen und Konservierungsmaßnahmen ist im Rahmen des Projekts Naturstein-Monitoring ausgearbeitet worden und wird im betreffenden Leitfaden eingehend erläutert. Es steht zu hoffen, dass er sich in der Praxis durchsetzen wird. Methoden der 2-D- und der 3-D-Erfassung erlauben, die flächenhafte Zunahme von Schadensformen quantitativ zu erfassen.

- **Befund mit Lupe und Mikroskop**

Die optischen Verfahren zur Erkennung von Schäden sind Allgemeingut des Wissens und brauchen an dieser Stelle nicht weiter erklärt zu werden. Ein geübter Mikroskopierer kann bereits aus Streupräparaten Pigmente und Salzphasen erkennen und kann mit Hilfe von Querschliffen auch aus kleinen Proben Aussagen über Beschichtungen und Oberflächenveränderungen machen.

- **Hohlstellendetektion mittels Resonanzklangfühler**

Die Klangprobe mit einem Metallstab zur Erkennung von Hohlstellen ist in der Praxis weit verbreitet. Eine feinere Bestimmung des Umfangs von hohl liegenden Schalen erlaubt der Klangresonanzfühler. Das Gerät besteht aus einer hohlen Edelstahlkugel von etwa 3 cm Durchmesser, die auf einem ausziehbaren Stab montiert ist. Streift man mit dem Fühler über eine Oberfläche, so erzeugt eine Hohlstelle die dafür typische Resonanz. Weil die Resonanzkugel auf einem Teleskopstab montiert ist, kann man auch Fassadenbereiche abtasten, die mit dem bloßen Arm nicht erreichbar wären. Bezogen werden kann der Resonanzklangfühler über das Institut für Allgemeine und Ingenieurgeologie der TU München.

- **Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten und Mirowski**

Beide Messmethoden sind in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben worden. Es sei nur noch daran erinnert, dass das Mirowski-Röhrchen eine viel kleinere Saugfläche besitzt und deshalb auch an runden Oberflächen verwendet werden kann. Allerdings ist seine Befestigung auch nicht immer gerade einfach. Das Karsten Prüfröhrchen hat den großen Vorteil, dass mit Hilfe eines Korrekturprogramms die wichtige Materialeigenschaft w-Wert errechnet werden kann.

- **Ultraschallmessung**

Die Ultraschallmessung wird vor allem bei Marmor zur Bestimmung der Materialgefährdung mit viel Erfolg eingesetzt. Bei Sandsteinen konzentriert sich der Einsatz vornehmlich auf die Ermittlung des Konservierungserfolgs an Bohrkernzylindern.

- **Abriebversuch mit Pinsel**

Diese Methode eignet sich für eine quantitative Bestimmung des Absandens von Oberflächen. Gemäß der Vorschrift werden die losen Mineralkörner mit dem Pinsel von der Oberfläche abgestreift, gesammelt und gewogen. Abriebfläche, Pinsel und Bewegung des Pinsels über die Oberfläche sind genau vorgegeben, sodass zu verschiedenen Zeiten erzielte Resultate miteinander verglichen werden können. Die bisher bekannten Einstufungen nach wenig – mittel – viel können mit dem Abriebversuch quantifiziert werden.

- **Bestimmung des Schälwiderstands**

Der Schälwiderstand erlaubt eine direkte Messung der Oberflächenfestigkeit von kreidenden oder leicht sandenden Oberflächen. Man erhält eine Messgröße, die beschreibt, wie fest die oberflächlichen Mineralkörner in die Gesteinsstruktur eingebunden sind. Bei der Messung wird ein Powerstrip auf die Oberfläche aufgeklebt und anschließend mit einer Federwaage abgezogen. Die dafür aufzuwendende Kraft ist ein Maß für den Zustand der Oberfläche. Zusätzlich können die an der Klebefläche haftenden Körner gewogen werden. Durch mehrmals an derselben Stelle durchgeführte Abzugsmessungen kann sogar eine Art »Tiefenprofil« der Oberflächenfestigkeit ermittelt werden. Bestimmungen vor und nach einer Festigung können als Maßstab für den Konservierungserfolg herangezogen werden.

- **Haftzugfestigkeit**

Der Unterschied zum Schälwiderstand besteht darin, dass für die Messung der Haftzugfestigkeit ein Stempel mit einem starken Kleber aufgeklebt und dann abgezogen wird. Dadurch wird die Oberfläche des Gesteins beschädigt, da die obersten Kornlagen ausgerissen werden.

- **Bohrwiderstand**

Die Bohrwidstandsmessung ist in diesem Leitfaden mehrfach erläutert und mit Diagrammen vorgestellt worden. Im Leitfaden Naturstein-Monitoring [AURAS et al. (2010)] ist die Methode nochmals eingehend erläutert. Eine Messvorschrift wird vorgelegt.

15.6 Empfehlungen für Untersuchungsschritte bei der Wiederbehandlung

Umfangreiche Untersuchungen zur Wiederbehandlung an der Alten Pinakothek und am Schloss Schillingsfürst [MEINHARDT-DEGEN (2002, 2003)] haben gezeigt, wie vielfältig die Probleme einer Wiederbehandlung aufgrund der verschiedenen Gesteinseigenschaften und Vorbehandlungen im Einzelnen sein können. Es lassen sich aus diesem Grund keine allgemein gültigen Empfehlungen aussprechen. Wohl aber können die Untersuchungsschritte aufgezeigt werden, die geeignet sind, die in Zusammenhang mit einer Wiederbehandlung anstehenden Fragen zu klären. Die nachfolgende Zusammenstellung listet alle erforderlichen Grundlagen und Untersuchungen auf.

Deren Umfang kann sich reduzieren, wenn in den Archiven einschlägige Berichte gefunden werden.

- **Planmaterial**

Ein steingerechtes Aufmaß der betreffenden Fassadenabschnitte bzw. anderweitig geeignetes Planmaterial für eine EDV-gestützte Dokumentation sollte zur Verfügung stehen.

- **Restaurierungsgeschichte**

Im Vorfeld jeglicher Maßnahmen ist die Archivrecherche über vorangegangene Maßnahmen unverzichtbar. Die Nachforschungen sollen klären, ob an dem fraglichen Objekt oder Objektabschnitt ältere Konservierungen belegbar sind und welche Konservierungsmittel dabei zur Anwendung gekommen sind. Bei Maßnahmen, die nicht länger als vielleicht 20 oder 30 Jahre zurückliegen, ist es auch nicht aussichtslos, nach Berichten über Materialuntersuchungen zu den Gesteinen und der Wirksamkeit der ausgesuchten Konservierungsmittel zu forschen.

- **Bestandskartierung**

Wenn noch keine Bestandskartierung vorhanden sein sollte, so ist diese nachzuholen. Die Untersuchungen dieses Berichts haben gezeigt, wie verschiedenartig selbst geologisch und genetisch verwandte Gesteine sind, sodass die Verteilung der Gesteinsvarietäten an einem Objekt bekannt sein muss. Ohne eine Gesteinskartierung kann kein dem Objekt individuell angepasstes Konservierungsprogramm entwickelt werden.

- **Schadenskartierung**

Eine Schadenskartierung ist erforderlich, um den Ist-Zustand festzuhalten und um gegebenenfalls dokumentierte Vorzustände zu vergleichen. Die Schadenskartierung sollte maßnahmenbezogen sein, d. h. es sollten nicht nur die wichtigsten Schadensformen, sondern auch die Schadensintensitäten kartiert werden, um daraus ein Maßnahmenkonzept ableiten zu können.

- **Reinigung**

Sollte eine Reinigung angezeigt sein, so wird die Einhaltung der in diesem Leitfaden formulierten Regeln empfohlen.

- **Festigung**

Um zu entscheiden, ob eine erneute Festigung nötig ist oder nicht, bedarf es der Bestimmung von mindestens einem Festigkeitsprofil einer jeden Gesteinsvarietät. Das Festigkeitsprofil liefert Ausmaß und Tiefe der Entfestigung des Gesteins und legt somit die bei der Wiederbehandlung zu erzielende Eindringtiefe fest.

Folgende Methoden eignen sich für die Messung von Festigkeitsprofilen. Die Vor- und Nachteile jeder Methode werden nachfolgend erläutert:

- **Biaxiale Biegezugfestigkeit**

Benötigt wird ein Bohrkern von mindestens 4,5 cm Durchmesser. Der Bohrkern wird trocken in Scheiben von 5 mm Dicke geschnitten. Jede Scheibe wird einzeln bei Ringauflage bis zum Bruch belastet. Aus der Aneinanderreihung der Messungen wird das Festigkeitsprofil zusammengesetzt. Es werden folgende Messgrößen erhalten:

- biaxiale Biegezugfestigkeit B_{BZF}
- statischer E-Modul (Biegezug)
- Bruchdehnung ϵ

Vorteile: Die drei Materialeigenschaften Biegezugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung sind erforderlich, um eine Überfestigung zu erkennen und deren mögliches Risiko abzuschätzen.

Nachteile: zerstörende Probenahme; Auflösung in 5 mm Schritten

- **Bohrhärte**

Ein WIDIA oder Diamantbohrer von 5 mm Durchmesser wird mit konstantem Anpressdruck oder konstantem Vorschub in das Gestein gebohrt. Die Kraft, die nötig ist, das Loch zu bohren, wird registriert und in Gestalt eines Bohrhärteprofils wiedergegeben. Aus der Form des Bohrhärteprofils kann man qualitativ Entfestigungen und deren Tiefenverlauf erkennen. Folgende Messgröße wird erhalten:

- Bohrwiderstand

Vorteile: Das Verfahren ist nur minimal zerstörend, weil die Löcher von 5 mm Durchmesser leicht gefüllt werden können und sowieso kaum erkennbar sind. Die Apparatur ist leicht transportabel, vor Ort einsetzbar. Zahlreiche Bohrhärteprofile können in kurzer Zeit gemessen werden, sodass ein statistischer Überblick über die Gesteinsvarietäten gewonnen wird.

Nachteile: Die Bohrhärteprüfung ist eine qualitative Prüfung in Bezug zur Festigkeit. Jeder Bohrer hat eine individuelle Schärfe und Abnutzung. Profile Vor-Nach-Behandlung sollten unbedingt mit demselben Bohrer gebohrt werden, um die Abnutzung des Bohrers gegebenenfalls korrigieren zu können. Die Kalibrierung an einem inerten Material ist unerlässlich.

- **Ultraschallgeschwindigkeit**

Ein Bohrkern wird senkrecht zur Längsrichtung in Schritten von 3 bis 5 mm durchschallt. Aufgezeichnet wird die Ultraschallgeschwindigkeit, im Normalfall die Geschwindigkeit der p-Welle, die über die Länge des Bohrkerne zu einem Profil zusammengesetzt wird. Zu bevorzugen ist ein Messgerät, bei dem die Form des empfangenen Signals abgerufen werden kann. Messgeräte mit Festeinstellung sind nicht geeignet. Folgende Messgrößen werden erhalten:

- Ultraschallgeschwindigkeit v_p
- dynamischer E-Modul nur mit passenden Messköpfen und Probenabmessungen

Vorteile: einfache und schnelle Messung. Der dynamische E-Modul liefert zusätzliche Informationen vergleichbar dem statischen E-Modul.

Nachteile: zerstörende Probenahme. Je nach verwendetem Ultraschallgeber ist die Auflösung relativ ungenau (die Wellenlänge der Ultraschallwelle ist zu berücksichtigen). Bei Sandsteinen liegen die zu erwartenden Ultraschallgeschwindigkeiten in einem recht engen Bereich zwischen ca. 2–3,5 km/s. Etwas höher sind die Ultraschallgeschwindigkeiten in carbonatischen Sandsteinen, weil die Ultraschallgeschwindigkeit in Calcit und Dolomit höher ist als in Quarz. Die Unterschiede der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen unverwittert – verwittert und unbehandelt – behandelt bewegen sich deshalb häufig an der Grenze der Messgenauigkeit bei 0,2 km/s. Anders verhält es sich bei Marmor. Bei diesem Gestein fällt die Ultraschallgeschwindigkeit von ca. 5 km/s bei unverwittertem Marmor bis auf 1,5 oder sogar 1,0 km/s bei vollständig zerstörtem Gefüge.

• Laborversuche

An entsprechend formatiertem und im Konstantklima 20/65 konditionierten Probenmaterial sollten verschiedene, alternative Steinfestiger erprobt und mit den oben genannten Methoden geprüft werden. Die Werte vor und nach der Behandlung sind gegenüber zu stellen. Es ist sicherzustellen, dass eine ausreichende Eindringtiefe erzielt und das Festigkeitsdefizit aufgefüllt wurde. In einer Darstellung Biegezugfestigkeit – E-Modul ist zu überprüfen, ob das Risiko einer Überfestigung gegeben ist. Ziel der Laborversuche ist die Festlegung derjenigen Steinfestiger, die an einer Probefläche am Objekt auf Praxisanwendung getestet werden sollen.

• Objekterprobung

Die ausgewählten Steinfestiger werden an Probeflächen unter Praxisbedingungen appliziert. Die Untersuchung über eine erfolgreiche Anwendung erfolgt mit dem gleichen Untersuchungsprogramm wie im Labor, wobei je nach Möglichkeit die oben genannten Untersuchungsmethoden zum Einsatz kommen. Die Auswahl des bestgeeigneten Mittels erfolgt unter Berücksichtigung von:

- Mittelaufnahme
- Eindringtiefe
- Festigkeitszunahme
- E-Modul-Veränderung

• Hydrophobierung

Durch Besprühen der Oberfläche kann man zunächst feststellen, ob und an welchen Stellen der Abperleffekt bereits verschwunden ist. Den eigentlichen Ist-Zustand einer Hydrophobierung beurteilt man am besten mit zahlreichen Karsten-Messungen am Objekt. Zusätzlich empfiehlt sich die Entnahme von Bohrkernen, deren

Zahl und Größe im Einzelfall festzulegen ist. Es kann auf Bohrkerne, die für die Bestimmung der Festigkeit entnommen worden sind, zurückgegriffen werden. Unterschiedliche Gesteinsvarietäten sind getrennt zu behandeln.

- **Karsten-Messung**

An beliebig vielen Stellen wird die kapillare Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen gemessen. Die Messwerte werden in w-Werte und B-Werte umgerechnet. Das Korrekturprogramm Calcarow ist dabei eine große Hilfe. Die w-Werte können auch in ihrer flächigen Verteilung kartiert werden.

Vorteile: zerstörungsfreies, sicheres und schnelles Messverfahren; flächige Kartierung bei ausreichender Anzahl von Messungen möglich

Nachteil: kein direkter Hinweis auf Tiefenwirkung der Hydrophobierung

- **w-Wert-Bestimmung am Bohrkern**

Im Labor wird die kapillare Wasseraufnahme an der Vorderseite und an der unbehandelten Rückseite des Bohrkerns bestimmt. Die Messwerte werden in w-Werte und B-Werte umgerechnet. Der Vergleich behandelt – unbehandelt liefert ein Maß für die verbliebene Restwirksamkeit. Die Tiefenverteilung der Hydrophobierung kann durch Eintauchen des Bohrkerns in Wasser oder mit Hilfe von Wassertropfen, die auf die Zylinderfläche aufgesetzt werden, bestimmt werden.

Vorteil: absoluter w-Wert gemäß DIN Vorschrift und Tiefenwirkung der Hydrophobierung

Nachteil: zerstörendes Prüfverfahren. Kleinflächige, verstreute Fehlstellen in der Hydrophobierung werden möglicherweise übersehen.

- **Laborversuche zur Hydrophobierung**

Verschiedene Hydrophobierungsmittel werden an geeignetem Probenmaterial, am besten an Bohrkernen aus Originalgestein, versuchsweise getestet. Geprüft wird auf Eindringtiefe und Wirksamkeit. Über die Bestimmung des w-Werts und des B-Werts hinaus sollte die Änderung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ bestimmt werden.

- **Objekterprobung**

Die aus den Laborversuchen als bestgeeignet hervorgegangenen Mittel werden an Probeflächen am Objekt unter Praxisbedingungen appliziert. Wirksamkeit und Eindringtiefe werden mit Hilfe von Karsten-Messungen und Bohrkernen geprüft. Zusätzlich zu w-Wert und B-Wert wird die Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ empfohlen.

- **Auswertung**

Eine wirksame Hydrophobierung wird gemäß Übereinkunft bei w-Werten $< 0,1 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$ angesetzt. Eine Wiederbehandlung sollte immer dann durchgeführt werden, wenn an allen Stellen einer Fassade, aber auch zum Beispiel nur an den Schlagregen exponierten Bereichen der Mittelwert der gemessenen w-Werte über $0,5 \text{ kg/m}^2\text{Vh}$

ansteigt. In diesem Fall besteht das Risiko, dass bei den in Deutschland herrschenden klimatischen Bedingungen eine Austrocknung nicht mehr gewährleistet ist. Der w-Wert und der B-Wert ergeben für sich allein noch kein vollständiges Bild, die Auswirkungen einer Hydrophobierung zu beurteilen. Mit Hilfe von w-Wert, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und Schichtdicke der hydrophobierten Zone sollte die Künzel-Zahl berechnet werden und eine Beurteilung hinsichtlich einer möglichen Dampfsperre vorgenommen werden.

Bild 144 und Bild 145 zeigen am Beispiel der Alten Pinakothek in München und des Schlosses Schillingsfürst in Franken die Überprüfung des Ist-Zustands der Hydrophobierung am Objekt sowie die Versuche zur Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade.

Im Fall von Schloss Schillingsfürst ergibt der Vergleich mit dem unbehandelten Gestein, dass der Zustand der Hydrophobierung kaum mehr nachweisbar ist. Die w-Werte liegen weit über dem Grenzwert von $0,5 \text{ kg/m}^2\text{vh}$ (Bild 144). Die Ergebnisse der Wiederbehandlung differieren nach den Gesteinsarten. Während die Wiederbehandlungen im Labor noch recht zufriedenstellend verlaufen, geben die Wiederbehandlungen am Objekt keine Garantie, dass das Anforderungskriterium $w \leq 0,1 \text{ kg/m}^2\text{vh}$ überall erreicht werden kann. Eine Wiederbehandlung mit den in der Versuchsserie erprobten Produkten kann nicht empfohlen werden. Es müssen noch andere Produkte getestet werden. Falls sich kein Mittel als problemlos wirksam herausstellen sollte, kann die Konsequenz nur heißen, auf eine Hydrophobierung zu verzichten.

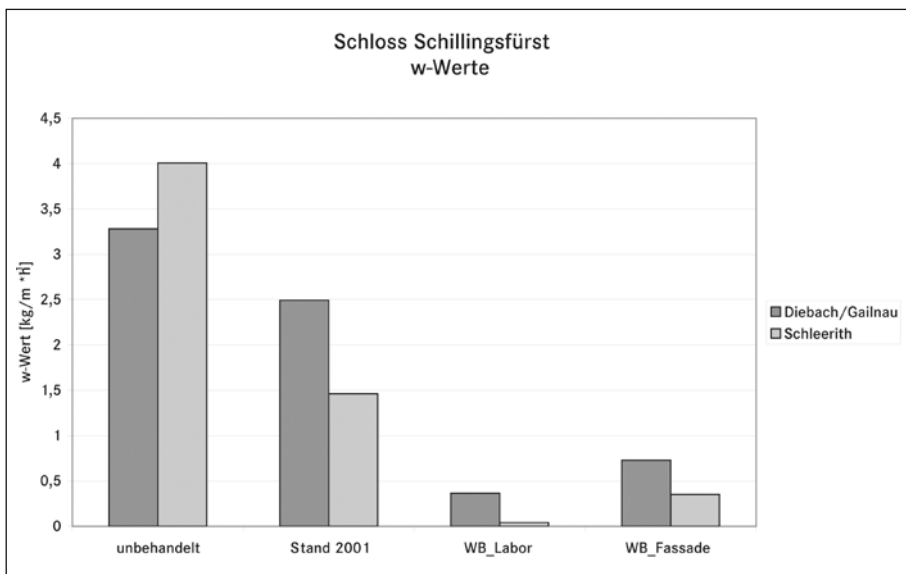


Bild 144: Wiederbehandlung der Hydrophobierung an den Sandsteinen von Diebach/Gailnau und Schleierith am Schloss Schillingsfürst. Abgebildet sind die Mittelwerte der w-Wert-Messungen.

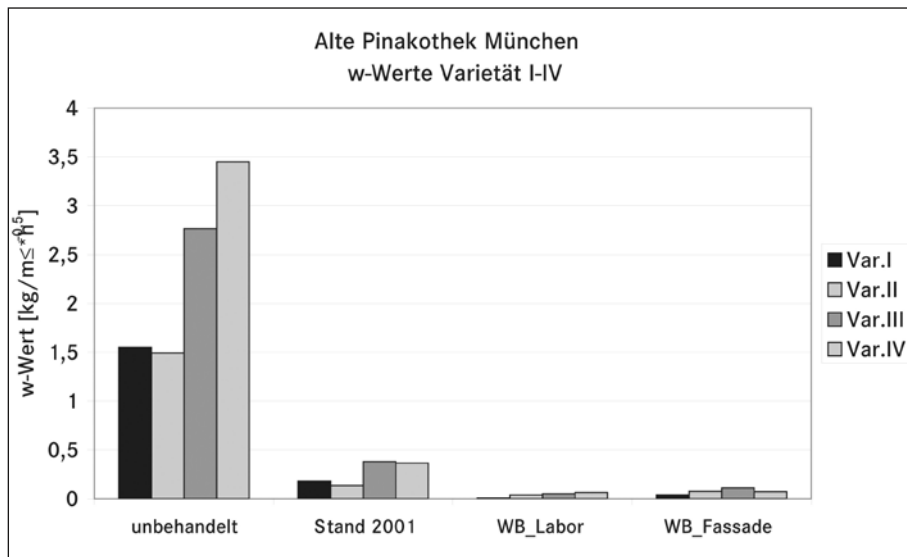


Bild 145: Wiederbehandlung der Hydrophobierung an den Grünsandsteinen der Alten Pinakothek in München, getrennt nach den Varietäten I bis IV. Abgebildet sind die Mittelwerte der w-Wert-Messungen.

An der Alten Pinakothek sind die Verhältnisse weit günstiger einzustufen. Die gegenwärtige Hydrophobierung ist noch hinreichend wirksam, weil das Grenzwertkriterium von $0,5 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$ im Mittel noch nicht erreicht ist. Es gibt jedoch, wie die Einzelwerte zeigen, Bereiche, an denen der w-Wert den Grenzwert übersteigt. Auch der seit den ersten Messungen 1985–1988 feststellbare Trend bedeutet eine langsame, aber stetige Zunahme des w-Werts, sodass man erwarten kann, dass der Grenzwert $w = 0,5 \text{ kg/m}^2\text{v/h}$ in möglicherweise fünf Jahren erreicht wird. Die letzten Messungen im Jahr 2008 bestätigen grundsätzlich den bisherigen Trend. Es wurden aber deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Messbereichen festgestellt. Es zeigte sich, dass die Messbereiche 1 und 5, welche nach Westen exponiert sind, die schlechteste Resthydrophobierung aufweisen. Wie die Messwerte auf Bild 145 dokumentieren, lassen sich die Grünsandsteine sowohl im Labor als auch an der Fassade gut nachbehandeln, sodass eine erfolgreiche Wiederholung der Hydrophobierung möglich ist.

- **Weitere Maßnahmen und Untersuchungen**

Hinsichtlich Steinantragungen, Natursteinaustausch und Farbfassungen auf Stein wird auf die Regeln dieses Leitfadens verwiesen.

- **Durchführung der Wiederbehandlung**

Die hier skizzierten Voruntersuchungen fließen in ein Leistungsverzeichnis ein, welches die Grundlage für eine qualifizierte Ausschreibung darstellt. Dabei ist es sicherlich von Vorteil, die Empfehlungen des Untersuchungsberichts in grafischer

Form als Kartierung darzustellen. Ein besonderer Hinweis gilt einer möglichst detaillierten Beschreibung der Anwendungsbedingungen.

- **Wer kann Untersuchungen und Maßnahmen durchführen?**

Die Wiederbehandlung von Natursteinen erfordert noch höhere Sorgfalt und Verständnis der Materialparameter als eine Erstbehandlung. Nur der Einsatz von Fachlabors und Fachfirmen kann den gewünschten Erfolg sicherstellen.

15.7 Zeitplan für Monitoring und Wiederbehandlung

Für den Zeitpunkt, zu dem ein Monitoring durchgeführt oder Maßnahmen ergriffen werden sollen, hat die Arbeitsgruppe Naturstein-Monitoring einen Zeitplan aufgestellt, der sich am Befund der festgestellten Schäden orientiert.

Tabelle 34: Bewertungsschlüssel und Zeitplan für Monitoringaktionen bzw. Restaurierungsmaßnahmen

Bewertungsziffer	Schadensausmaß	Maßnahme	Zeitraum
1	keine neuen Schäden erkennbar	Monitoring	in fünf Jahren
2	leichte Schäden	Monitoring	in drei Jahren
3	mittlere Schäden	Pflegemaßnahmen	in den nächsten drei Jahren
4	starke Neu- bzw. Folgeschäden	Notsicherung	sofort
		Maßnahme	innerhalb eines Jahres
5	Neuschäden mit Funktionsverlust (Statik, Wasserführung) oder Verlust des künstlerischen Informationsgehalts	Notsicherung	sofort
		Maßnahme	sofort

Aus Tabelle 34 geht eindeutig hervor, dass sich die Intervalle für gravierende Eingriffe zeitlich weit hinausschieben lassen, wenn durch regelmäßiges Monitoring und sofort durchgeführte Pflegemaßnahmen das schleichende und unerkannte Fortschreiten der Schadensbildung vermieden wird.

16 **Sonderverfahren**

Acrylharzvolltränkung (AVT) *

Inhalt

16.1 **Allgemeines und Entscheidungskriterien** * 401

16.2 **Beschreibung der AVT** 402

16.3 **Begleitmaßnahmen** * 402

16.4 **Risiken** 403

16.5 **Weitere Anmerkungen** 403

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

16 Sonderverfahren Acrylharzvolltränkung (AVT)

16.1 Allgemeines und Entscheidungskriterien

Die Entwicklungen der Acrylharzvolltränkung (AVT) gehen auf die frühen 1970er-Jahre zurück. Erste getränkte Objekte waren eine Fiale des Kölner Doms und ein Element des Seegitters von Schloss Seehof. Eingehende Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop REM (Snethlage, Interner Bericht BLfD) belegten die Eignung des Verfahrens für besonders stark geschädigte Objekte. Nach Firmenangaben wurden in den 45 Jahren der Anwendung bis 2018 rund 20 000 Objekte, vornehmlich Flurdenkmäler, Skulpturen und mobile Bauzierteile getränkt.

Leider kam es aufgrund von ungenügender Trocknung und Abkühlzeit immer wieder zu Fehlschlägen, obwohl die Problematik im Laufe der Zeit sehr wohl erkannt war. Am besten bewährt hat sich die Methode bei der Tränkung von Marmorskulpturen. Seit 2010 liegt die Anlage mehr oder weniger still und wird nur noch bei Bedarf aktiviert. Der wesentliche Grund, weshalb das Verfahren kaum mehr nachgefragt wird, liegt darin, dass die meisten Objekte, die für eine AVT in Frage kommen, bereits behandelt sind. Der Großteil von ihnen kam aus Bayern; in den anderen Bundesländern und vor allem im Ausland konnte die AVT dagegen nur in weit geringerem Umfang Fuß fassen.

Da der Ablauf von dem einer gängigen Konservierungsmaßnahme in vielen Punkten abweicht, soll die Acrylharzvolltränkung (AVT) an dieser Stelle etwas genauer besprochen werden. Die Entscheidung, ob eine AVT vorgenommen werden soll, erfolgt bereits bei der Schadensdiagnose (Arbeitsschritt 6.4) bzw. in der sich anschließenden zweiten Sitzung der Projektleitung, sodass sich schon an dieser Stelle die Wege zwischen den mit herkömmlichen Methoden und mit der AVT behandelten Objekten trennen.

Für die Entscheidung, ob ein Objekt durch eine AVT konserviert werden soll, gibt es aus der Sicht der Denkmalpflege folgende Kriterien:

- Das Objekt darf kein Denkmal allerersten Ranges sein.
- Es soll einen hohen Schädigungsgrad aufweisen, der nach heutigem Kenntnisstand eine dauerhafte Behandlung mit herkömmlichen Methoden nicht zulässt.
- Es kann nicht in ein Museum gebracht, da es künstlerisch nicht bedeutend genug ist, und auch sonst nirgends in geeigneter Form aufbewahrt und ausgestellt werden, weil kein geeigneter Raum vorhanden ist.
- Es erfüllt an seinem Standort eine wichtige Funktion als Teil eines Ensembles oder der Kulturlandschaft.

- Es ist an seinem Standort der Witterung ausgesetzt.
- Es muss transportabel sein, da die AVT nicht vor Ort durchgeführt werden kann.

Mit Hilfe dieser Liste lässt sich auch der Kreis der in Frage kommenden Objekte eingrenzen: Feldkreuze, Flurdenkmäler, Grabsteine, Treppenanlagen im Freien (Stufen, Baluster, Abdeckplatten), Bauornamente, insbesondere auf Attiken (Trophäenstände, Vasen etc.), Figuren, Vasen, Bänke, Postamente etc. in Parkanlagen usw.

16.2 Beschreibung der AVT

Die AVT wird in einer großen Kammer ausgeführt, in der das vorher getrocknete Objekt zunächst unter Vakuum in flüssiges, monomeres Methylmethacrylat (MMA) eingetaucht wird, bis sich der Porenraum völlig mit dem Monomer gesättigt hat. Nach Ablassen der überschüssigen Tränkflüssigkeit beginnt unter Druck und Temperatursteigerung bis ca. 60°C die Aushärtung in festes Polymethylmethacrylat (PMMA). Nach langsamer Abkühlung wird das Objekt aus der Kammer genommen. Der gesamte Prozess dauert in etwa eine Woche, weil insbesondere die Abkühlung auf Raumtemperatur sehr vorsichtig vonstattengehen muss.

Mit einer AVT behandelte Objekte sind auch für den Fachmann kaum von unbehandelten zu unterscheiden. Sie besitzen keinen Glanz und weisen auch sonst durch nichts darauf hin, dass der gesamte Porenraum mit PMMA ausgefüllt ist.

Seit etwa 2010 kann auch eine modifizierte Tränklösung eingesetzt werden, die auf einer Mischung von Methylmethacrylat MMA und reaktiven Silanen aufgebaut ist. Im Gegensatz zur AVT wird der Porenraum nicht gänzlich gefüllt. Die Porenwände werden mit einem visco-elastischen Film überzogen, der dem »Aachener Modell« nahekommt. Die Tränkung wird AVT 50 im Gegensatz zur alten AVT 100 genannt. Weil der Porenraum nicht vollständig ausgefüllt wird, bleiben eine gewisse Wasserdampfdiffusion und Wasseraufnahme erhalten. Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, E-Modul und thermische Dehnung werden erhöht, aber nicht in dem Maße wie bei der AVT 100 [Sobott et al. (2019)].

16.3 Begleitmaßnahmen

Vor und/oder nach einer AVT sind je nach Zustand des Objekts begleitende Maßnahmen erforderlich, welche beispielsweise das Sichern von losen Teilen, das Schließen von Rissen und Fehlstellen oder das Hinterfüllen von Schalen zum Inhalt haben. Über diese Begleitmaßnahmen sei hier nur so viel gesagt, dass sie natürlich mit Materialien ausgeführt werden müssen, welche von der Tränkflüssigkeit nicht angegriffen werden und auch die thermischen Belastungen im Verlauf der AVT überstehen. Die verarbeitende Firma gibt Richtlinien für Restauratoren heraus, wie und mit welchen Materialien solche Arbeiten ausgeführt werden müssen.

Zum besseren Verständnis, weshalb diese restauratorischen Begleitmaßnahmen notwendig sind, ist es wichtig zu wissen, dass das noch flüssige monomere MMA wie Wasser aus Fehlstellen oder Hohlräumen herausläuft, weil es nur durch die Kapillarkräfte festgehalten wird. Ohne Hinterfüllung würden sich beispielsweise hohl liegende Schalen nicht mit dem Stein verbinden, sodass weiterhin die Gefahr des Abplatzens bestünde.

16.4 Risiken

Die AVT ist eine irreversible Maßnahme. Der Porenraum kann später nicht mehr vom Kunststoff befreit werden. Die Entscheidung für eine AVT muss deshalb gründlich bedacht sein. In den Anfangsjahren aufgetretene Fehlschläge, verursacht durch eine zu kurz gewählte Trocknungs- und Abkühlzeit, konnten, wie schon erwähnt, durch konsequentes Qualitätsmanagement vermindert, aber nie gänzlich abgestellt werden. Ein zwischen 2005 und 2010 mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördertes Projekt hatte eine nochmalige Verbesserung des Verfahrensablaufs zur Folge. Verglichen mit Fehlern, die von Restauratoren auch bei herkömmlichen Behandlungen gemacht werden, dürfte die Fehlerquote bei der AVT sogar niedriger liegen. Bei der AVT handelt es sich also um ein Konservierungsverfahren, das durchaus in Erwägung gezogen werden kann, sollten die oben genannten Kriterien erfüllt sein.

16.5 Weitere Anmerkungen

Die AVT wird nur von Jbach Steinkonservierung in Scheßlitz durchgeführt. Steht eine Entscheidung über eine AVT an, so ist die Firma rechtzeitig in die Gespräche einzubinden, damit der zeit- und kostengünstigste Verfahrensablauf entwickelt werden kann. Ästhetische Erörterungen über Materialpurismus und Materialechtheit sind, da sie sich nicht mit materialtechnischen Untersuchungen beurteilen lassen, bewusst nicht Gegenstand dieses Leitfadens.

17 Sechste Sitzung (Abschlusssitzung) der Projektleitung * * *

Inhalt

17.1	Abnahme der Leistungen	***	407
17.2	Objektarchiv	***	407
17.3	Ausblick		408

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme

17 Sechste Sitzung (Abschlusssitzung) der Projektleitung

In der Abschlusssitzung werden die Ergebnisse der Nachkontrolle diskutiert. Da es wieder in erster Linie um restauratorische und naturwissenschaftliche Fragen geht, ist die Einbindung entsprechender Fachleute selbstverständlich. Aufgrund der Anregungen der Gutachter, welche die Nachkontrolle ausgeführt haben, sind die möglicherweise erforderlichen Nachbesserungen zu besprechen.

17.1 Abnahme der Leistungen

Der Koordinator führt im Vorfeld der Sitzung mit der ausführenden Firma eine Begehung durch, um sich ein Bild von den erbrachten Leistungen zu machen. Er kann dann bei der allgemeinen Schlussbegehung die Teilnehmer gleich an die kritischen Stellen führen, sollte aber auch besonders gelungene Arbeiten nicht unerwähnt lassen. Liegen keine Mängel vor, die nach Ansicht der Gutachter die Dauerhaftigkeit der Maßnahmen beeinträchtigen, kann die Leistung nach einer nochmaligen Besichtigung als abgeschlossen betrachtet und abgenommen werden. Über diesen Punkt ist nach § 12 VOB Teil B ein Protokoll anzufertigen.

Über den Bedarf und die Finanzierung der Langzeitkontrolle ist ein Beschluss herbeizuführen. Terminvereinbarungen sind zu treffen, wann über die ersten Ergebnisse der Langzeitkontrolle zu berichten ist. Ist alles ordnungsgemäß ausgeführt worden, dann wäre gemäß der Empfehlung der Arbeitsgruppe Naturstein-Monitoring die erste Nachkontrolle in fünf Jahren zu terminieren.

Danach legt der Sekretär der Projektleitung den Zeit- und Kostenplan vor, mit dem das Projekt zum Abschluss gebracht wurde. Dieser Schlussbericht sollte nicht vergessen werden, da er noch einmal Gelegenheit bietet, sich des Projektablaufs zu erinnern und die Auslöser für Schwierigkeiten und Verzögerungen bewusst zu machen. Ein solcher Rückblick sollte nicht als Gelegenheit verstanden werden, sich gegenseitig Versäumnisse und Fehler vorzuwerfen, sondern als Chance, für künftige Vorhaben zu lernen und alte Fehler zu vermeiden.

17.2 Objektarchiv

Damit die schriftlichen Berichte später auch vom möglichen Nachfolger wieder gefunden werden, muss ein gut gegliedertes und beständig nachgeführtes Archiv vorhanden sein, um einen schnellen und unkomplizierten Zugriff zu ermöglichen. Innerhalb des Archivs werden die Berichte entsprechend dem eingangs angesprochenen

Orientierungssystem, das für das betreffende Objekt angelegt wurde, eingeordnet. Die EDV-basierten Berichte werden hingegen einfach in »MonArch« abgelegt, das alle zu dem betreffenden Objekt vorhandenen Informationen enthält und auf dem Server hinterlegt ist. Für den Ort des Objektarchivs kommt zunächst in erster Linie der Bauherr bzw. Eigentümer in Frage. Es könnte sich aber auch herausstellen, dass es vorteilhafter sein kann, die Fachbehörde mit der Einrichtung und Führung des Archivs zu betrauen.

Die Archivpflege, die meist als zeitraubend und kostspielig angesehen wird, sollte auf keinen Fall als nebensächlich abgetan werden. Ein gut geordnetes Archiv wird den Ablauf künftiger Arbeiten erleichtern und beschleunigen. Im Bibliothekswesen gilt die Regel, dass ein Buch etwa den doppelten Kaufpreis für Archivierung und Bereitstellung verursacht. Auch EDV-gestützte Archive aktualisieren sich nicht von selbst und bedürfen der ständigen Pflege, wofür ausreichend Personalmittel zur Verfügung stehen müssen.

Unnötige Doppelarbeiten können vermieden werden, wenn die erforderlichen Informationen einfach und schnell zugänglich sind. In fast allen Fällen liegt der Grund für den Entschluss, mit neuen Untersuchungen zu beginnen, darin begründet, dass die Suche nach den alten Plänen und Berichten als langwierig und vor allem wenig Erfolg versprechend eingeschätzt wird. Vor allem in staatlichen Bauverwaltungen sind die Unterlagen zu vorangegangenen Maßnahmen häufig nicht mehr griffbereit, weil sie in die Staatsarchive abgegeben wurden. Ein gewissenhaftes Orientierungssystem in Verbindung mit einem gepflegten Objektarchiv wird sich auf lange Sicht immer auszahlen, nicht allein in Euro, sondern auch in Freude an der Arbeit. Jeder, der sich dieser Aufgabe stellt, soll deshalb in seinen Bemühungen bestärkt werden, weil sich seine Arbeit auf Dauer für ihn und seine Nachfolger gewinnbringend auswirken wird.

17.3 Ausblick

Mit der sechsten Sitzung der Projektleitung wäre das Konservierungsvorhaben offiziell am Ende angelangt. Damit die Ergebnisse nicht in der Schublade verschwinden, sondern auch anderen Interessenten zur Verfügung stehen, wäre noch zu klären, ob und in welcher Form die Ergebnisse publiziert werden. Auf die Möglichkeit, das Projekt in die Datenbanken HERICARE beim Hornemann Institut an der Hochschule Hildesheim/Holzminden oder MONUDOC einzubringen, ist an anderer Stelle bereits hingewiesen worden. Es ist zu hoffen, dass von dieser Möglichkeit freiwillig und stetig Gebrauch gemacht wird, damit sich die Datenbanken füllen und damit sie ihre Funktion als Informationsträger erfüllen können.

Die Verfasser wünschen sich, dass die in diesem Leitfaden zu Papier gebrachten Anregungen und Vorschläge, ein Konservierungsprojekt nach Managementregeln zu strukturieren, durch naturwissenschaftliche Untersuchungen zu begleiten und einer Qualitätskontrolle zu unterziehen, zu einer Selbstverständlichkeit beim Umgang mit

historischer Bausubstanz werden. Bedauerlicherweise hat sich diese Erkenntnis seit der ersten Auflage des Leitfadens im Jahr 1997 noch nicht so richtig durchgesetzt, obwohl Fortschritte nicht zu verkennen sind. Es sind immer wieder die gleichen aufgeschlossenen Baudirektoren und Denkmalpfleger, die sich bereits im Stadium der Planung der Mitarbeit externer Experten versichern. Andere dagegen scheuen den Kontakt zu den Natur- und Materialwissenschaftlern nach wie vor, weil sie wohl befürchten, in ihrer Arbeit behindert zu werden oder den alleinigen Einfluss zu verlieren. So kommt es auch heute immer noch vor, dass höchstrangige Objekte ohne naturwissenschaftliches Untersuchungsprogramm restauriert werden, allein auf die denkmalpflegerische und restauratorische Erfahrung vertrauend.

Untersuchungen belegen, dass gründliche Voruntersuchungen und Planungen die Risiken, später durch unerwartet zu Tage tretende Schäden überrascht zu werden, fast vollkommen ausschließen können. Rechtzeitig eingesetzte geringe Geldmittel für Voruntersuchungen können ein Vielfaches an Kosten verhindern, die dann anfallen, wenn mitten im Projektverlauf unvorhergesehene Hindernisse auftreten. Bei kommunalen und staatlichen Bauverwaltungen hat es sich aber eingebürgert, immer von den einfachsten Voraussetzungen auszugehen und die Kosten so gering wie möglich anzugeben, vor allem auch, um Projekte überhaupt genehmigt zu bekommen. Zumeist wissen die Verantwortlichen darüber Bescheid, dass die Kostenschätzungen von Beginn an wohl nicht zu halten sind. Sie werden aber durch die höher gestellten Instanzen praktisch zur Unehrllichkeit erzogen.

Eine weitere unrühmliche Rolle spielen die Vergabestellen. Sie sind keineswegs gehalten, immer den billigsten Anbieter zu wählen, tun dies aber oft aus Angst vor den Vergabeprüfstellen, welche wider bessere Einsicht sofort einschreiten, wenn zu viele beschränkte Ausschreibungen vorgenommen wurden oder wenn mehrmals nicht der billigste Anbieter ausgewählt wurde. Aus Furcht vor einer Rüge wird dann beim nächsten Mal der billigste Anbieter genommen, auch wenn er offenkundig nicht hinreichend qualifiziert ist. Läuft die Baustelle schief, ist natürlich der Auftraggeber verantwortlich und nicht die Vergabeprüfstelle, die bedauerlicherweise nicht für die von ihr verursachten Fehlleistungen zur Rechenschaft gezogen werden kann. Das illustre Beispiel der Pinakothek der Moderne in München ist wohl bekannt. Das staatliche Bauamt hatte dem Architekten die Bauleitung entzogen. Der Terrazzoboden musste gleich wieder ausgetauscht werden, die Mängel an der Rotunde führten zu einer Schließung des Museums 2012 und 2013.

Immer noch scheint es eine gängige Praxis zu sein, Natur- und Materialwissenschaftler als schmückendes Beiwerk zu betrachten, dem man ein paar Analysen vermittelt, damit der Schlussbericht ein bisschen angereichert wird, oder aber als einen willkommenen Rettungsanker, der dann eingeschaltet wird, wenn das Projekt schief zu gehen droht. Diese Rolle ist für Natur- und Materialwissenschaftler unangemessen und unbefriedigend. Das Argument ist nicht von der Hand zu weisen, dass es den Konservierungswissenschaften deshalb immer noch schwer fällt, in der Denkmalpflege als gleichberechtigter Partner wahrgenommen zu werden, weil diese von

Kunsthistorikern, Architekten und Restauratoren beherrscht wird, welche die Denkmalpflege rein als ihre Domäne betrachten, die sie nicht mit weiteren Akteuren teilen wollen. Dabei wird doch von Denkmalpflegern immer wieder die Substanz des Denkmals als Informationsträger hervorgehoben. Doch was ist Substanz im Kern anderes als Material?

Anhang

Inhalt

Literaturverzeichnis	413
Ausgewählte DIN-Normen	430
Bereits als DIN EN-Normen vorliegende Normen	432
Als Eurocode 6 zusammengefasste vorliegende Normen (Auswahl mit jeweiligem nationalem Anhang)	435
Internationale Normen	436
Inzwischen zurückgezogene Normen	437
Ausgewählte Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege	440
Ausgewählte WTA-Merkblätter	442
Sachregister	445

Anhang

Literaturverzeichnis

Dieses Literaturverzeichnis enthält nicht nur die im Text verwendete Literatur, sondern gibt auch Anregungen für die weiterführende Lektüre.

ARENDT, C. (1994): Technische Untersuchungen in der Altbausanierung. Verlag R. Müller Verlag, Köln.

ARNOLD, A.; KÜNG, A. (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls. Part I: Methods of investigation and habits. In: Felix, G.; Furlan, V. V. (eds.): Vth Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Sept. 25–27, 1985, pp. 255–268, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.

ARNOLD, A.; ZEHNDER, K. (1985): Crystallization and habits of salt efflorescences on walls. Part II: Conditions of Crystallization. In: Felix, G.; Furlan, V. V. (eds.): Vth Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Sept. 25–27, 1985, pp. 269–278, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne.

ARNOLD, A. (1992): Salze – Lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache? In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinerfall – Steinkonservierung, Band 2-1990, S. 1–9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

ASHURST, J.; DIMES, F. G. (1990): Conservation of Building and Decorative Stone, vol. 1 + 2, Butterworth – Heinemann, London.

AUMÜLLER, TH. (2002): Die Porta Prætoria und die Befestigung des Legionslagers in Regensburg. Dissertation Lehrstuhl Baugeschichte und Bauforschung, TU München.

AURAS, M.; MEINHARDT, J.; SNETHLAGE, R. (2010): Leitfaden Naturstein-Monitoring. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

BERNHARD, F. (Hrsg.) (1996): Der Steinmetz und Steinbildhauer, Band 1, Ausbildung und Praxis. Callwey Verlag, München.

BERUFSBILDUNGSWERK DES STEINMETZ- UND BILDHAUERHANDWERKS E. V. (Hrsg.) (1997): Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege – 1. Auflage. Ebner Verlag GmbH & Co. KG, Ulm/Donau.

BIERWIRTH, H.; STÖCKL, S.; KUPFER, H. (1995): Dreiachsige Druckversuche an Mörtelproben aus Lagerfugen von Mauerwerk: Abschlussbericht zu den DFG-Forschungsvorhaben Ku 239/74-1 und 74-2. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

BINDA, L.; ANZANI, A. (1997): Structural Behaviour and Durability of Stone Masonries. In: Baer, N.; Snethlage, R. (eds.): Saving Our Cultural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Dahlem Workshop Report ES20, pp. 113–150. John Wiley & Sons, Chichester, New York.

BLEIBERATUNG E. V. (Hrsg.) (1998 und 1999): Blei im Bauwesen, Teil 3 Abdeckungen und Teil 4 Dächer und Fassaden. Eckhard Dertz Werbeagentur, Kaarst.

BLEIBERATUNG E. V.; SATURNBLEI (Hrsg.) (1995–2003): Blei im Bauwesen, Teil 1–Teil 4.

- BOCK, E.; FAHRIG, N. (1993): Mikroorganismen in Steinen historischer Bauten – eine Datenanalyse. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 3-1991, S. 179–195. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BOCK, E.; JOZSA, P. G.; KUSSMAUL, M.; MANSCH, R.; SAND, W.; SCHRÖDER, S.; SPIEK, E.; VOLLMER, M.; WILIMZIG, M. (1994): Fortschritte bei der Beurteilung mikrobiell beeinflusster Gesteinszerstörung. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 33–47. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BOCK, E.; JOZSA, P. G.; SAND, W.; MANSCH, R.; WILIMZIG, M. (1996): Natursteinzerstörung durch biologische Verwitterung – der Beitrag der Nitrifikanten. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Naturwissenschaft und Denkmalpflege, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- BOENKENDORF, U.; DEGENKOLB, M.; KNÖFEL, D. (1995): Proteine als Zusatzmittel in Kalkmörteln. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 5-1993, S. 129–137. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BORRMANN, T.; HEUSER, M.; HOFFMANN, M.; JULING, H.; SCHLÜTTER, F. (1992): Mikroskopische Beurteilung trocken gereinigter Bauwerksteine am Beispiel des Schlaitdorfer Sandsteins. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 157–163. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BRANDES, CH. (1995): Natursteinkonservierung durch Beschichtung. Dissertation Fb Geowissenschaften, Universität Hannover.
- BRANDES, CH.; STADLBAUER, E. (1995): Anstrichsysteme auf Naturstein im Bewitterungstest. Bautenschutz & Bausanierung, S. 64–67, 4/95. Verlag R. Müller, Köln.
- BRAUNS, J.; VOGEL, H. (1993): Wasserwirkungen aus dem Baugrund – Problemerkennung und Beeinflussung. In: Gudehus, G. (Hrsg.): Geotechnik in der Denkmalpflege, Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT Verbundforschung für die Denkmalpflege, S. 61–70. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- BRIMBLECOMB, P. (2011): Environment and Architectural Stone. In: Siegesmund, S.; Snethlage R. (eds.): Stone in Architecture, Chapter 5, pp. 317–346. Springer Verlag, Heidelberg, New York.
- BRUSCHKE, A. (Hrsg.) (2005): Bauaufnahme in der Denkmalpflege, MONUDOCthema Band 2. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- CAIN, H.-U.; PFANNER, M. (2008): Marmor in Rom – Verfall und die Aura der Originale. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalgesteine. Festschrift Wolf-Dieter Grimm. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften – DGG –, Hannover, 2008, S. 236–258. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- DAMJANOVIC, S. (2013): Sehen – Fühlen – Messen. Erprobung der Profilmessmethode zur Einschätzung der Kantenabwitterung und der Beurteilung von Oberflächenrauheiten mit Hilfe von Sandpapieren und die messtechnische Ermittlung von Rauheitskenngrößen mit Hilfe des TRACE-IT Systems an Carrara Marmorproben. Bachelorthesis FH Potsdam.
- DANNECKER, W. (1989): Depositionsprozesse atmosphärischer Schadstoffe auf Oberflächen von Werksteinen. In: VDI (Hrsg.): Wechselwirkungen zwischen technischen Oberflächen und Atmosphäre, S. 237–264. VDI Verlag, Düsseldorf.

- DEGENKOLB, M.; KNÖFEL, D. (1994): Untersuchungen zum Einfluss von Holzkohle-Zusatz zu Kalkmörteln. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, 1994–1996. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (2001): Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie) Ausgabe 2001; Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze; Teil 2: Bauprodukte und Anwendung; Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung; Teil 4: Prüfverfahren – Herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Berlin.
- DEUTSCHER NATURWERKSTEINVERBAND DNV (2011): Bautechnische Information Naturwerkstein (BTI) 3.1. – Gebäudeerhaltung von historischen Bauten. Deutscher Natursteinverband e. V., Würzburg.
- DNK Deutsches Nationalkomitee für Denkmalschutz (1998): Schon aufgegeben und doch erhalten. DNK Schriftenreihe Band 58. Bonn.
- DREWELLO, R.; DREWELLO, U.; KOCH, R. (2002): Neue Konzepte in der Kalksteinkonservierung an der römischen Porta Prätoria – Zwischenbericht März 2002. Forschungsprojekt DBU AZ. 16656. Bamberg.
- DREWELLO, R.; FREITAG, B.; SCHLIEDER, Ch. (2010): Neues Werkzeug für alte Gemäuer. S. 10–14. DFG Forschung Magazin, 2010(3).
- DUTTLINGER, W.; KNÖFEL, D. (1991): Salzkristallisation und Salzschadensmechanismen. Jahresberichte Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 3-1991, S. 197–214. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- ECKERT, H. (1991): Altes Mauerwerk nach historischen Quellen. In: Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahresbericht 1991, S. 19–64. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- ECKSTEIN, G. (1999): Empfehlungen für Baudokumentationen. Arbeitsheft 7 – Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.). Konrad Theiss Verlag, Stuttgart.
- EICKELBERG, U.; HERPPICH, S.; ZALLMANZIG, J. (Hrsg.) (1990): Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme – Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte, Bericht der Arbeitsgruppe »Dokumentation« des BMFT-Projekts »Steinzerfall«, 1990, Bautenschutz & Bausanierung. Verlag R. Müller, Köln.
- ETTL, H.; SATTLER, L.; SCHUH, H. (1996): Konservierung von Sandstein mit Kieselgel-gebundenen Steinersatzstoffen. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 105–126. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- EXNER, M.; SNETHLAGE, R. (2008): Modell Weltgerichtsportal an Sankt Sebald in Nürnberg. Ein Kolloquium zu neuen Konservierungstechniken für gefasste Steinskulptur. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Info 141.
- FALSER, M. (2008): Zwischen Identität und Authentizität. Zur politischen Geschichte der Denkmalpflege in Deutschland, Dresden 2008 (Diss. TU Berlin).
- FIDA Hrsg. (2018): Nachweismöglichkeiten von mikrobiologischen Besiedlungen auf Marmoroberflächen. FIDA E. V. c/o Wolfram Köhler, Potsdam.

- FITZNER, B.; HEINRICHS, K.; KOWNATZKI, R. (1996): Weathering Forms – Classification and Mapping. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Naturwissenschaft und Denkmalpflege, Naturstein-konservierung I, S. 41–88. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- FITZNER, B.; HEINRICHS, K. (2002): Damage diagnosis on stone monuments – weathering forms, damage categories and damage indices. In: Prkryl, R.; Viles H. A. (eds.): Understanding and managing stone decay, Proceedings Intern. Conference Stone weathering and atmospheric pollution network SWAPNET, May 7–11, 2001, pp. 11–56. The Karolinum Press, Charles University, Prague.
- FRANK, L.; KITTL, R. (1995): Leistungsfähigkeit von Steinerfüllungsmitteln. Bautenschutz & Bausanierung, 7-1995, S. 60–68. Verlag R. Müller, Köln.
- FREITAG, B.; ZUKOWSKI, U.; BLOCH, G. (2005): Digitale Kartierung und Archivierung, S. 486–493. *Restaura* 7/2005.
- FREITAG, B.; SCHLIEDER, Ch. (2009): MonArch – Digital Archives for Monumental Buildings. Künstliche Intelligenz, S. 30–35. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- FRIEDRICH, K. (1932): Die Steinbearbeitung in ihrer Entwicklung vom 11. bis zum 18. Jahrhundert. Nachdruck 1988, AEGIS-Verlag, Ulm/Donau.
- GARRECHT, H. (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation Uni Karlsruhe.
- GARRECHT, H. (1996): Die Feuchtesituation im Erdgeschoss des Dormentbaus der Klosteranlage Maulbronn. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, SFB 315, Universität Karlsruhe, Jahrbuch 1993, S. 315–342. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- GEMEINDE KNETZGAU, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.) (1996): Die Restaurierung von Schloss Oberschwappach. Arbeitsheft 71, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
- GISKOW, R. (1987): Messungen von Diffusionsparametern an Sandsteinen: Ein Beitrag zur Frage des Stofftransports in Sedimenten. Dissertation Universität Heidelberg, Heidelberger Geowissenschaftl. Abh. Heft 7.
- GLASER, H. (Hrsg.) (2004–2011): König Ludwig I. von Bayern und Leo von Klenze. Band I – III mit jeweils 3 Teilbänden. Kommission für Bayerische Landesgeschichte, München.
- GÖDICKE-DETTMERING, T. (1997): Mineralogische und technologische Eigenschaften von hydraulischem Kalk als Bindemittel von Restaurierungsmörteln für Baudenkmäler aus Naturstein. Institut für Steinkonservierung, IFS-Bericht Nr. 6, Mainz.
- GRASSEGGGER, G.; GRÜNER, F. (1991): Extraction of Salts on Monuments – Evaluation of Results from Application and Boundary Conditions. *Otto Graf Journal*, vol. 2, 1991, pp. 57–71, FMPA Stuttgart.
- GRIMM, W. D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitsheft 50. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
- GRIMM, W. D. (2018): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Teil I: Textband. Teil 2: Bildband. 2. erweiterte Auflage. Ebner Verlag, Ulm.

- GUDEHUS, G. (1992): Zur geotechnischen Untersuchung und Sicherung von Burgen. In: Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahresbericht 1992, S. 163–176. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- GUDEHUS, G. (Hrsg.) (1993): Geotechnik in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT Verbundforschung für die Denkmalpflege. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- HERM, CH.; SNETHLAGE, R. (1992): Water Vapour Permeability of Painted Stone. Proceedings 7th Intern. Congress Deterioration and Conservation of Stone, vol. 2, Delgado, J.; Rodrigues, F.; Henriques, F.; Jeremias, T. (eds.): pp. 67–686, June 15–18, 1992, Lisbon.
- HERM, CH.; PFEFFERKORN, S.; SNETHLAGE, R. (1996): Historische Verfahren und Handelsmarken in der Steinkonservierung 1840 bis 1940. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- HILBERT, G.; MÜLLER-ROCHHOLZ, J.; ZINSMEISTER, K. (1992): Salzeinlagerung in Sanierputze. Teil 1: Bautenschutz & Bausanierung, Jg. 15, Nr. 6, S. 69–71; Teil 2: Bautenschutz & Bausanierung, Jg. 15, Nr. 7, S. 78–80. Verlag R. Müller, Köln.
- HILBERT, G. (1995): Der Einfluss von Bindemitteln auf die Eigenschaften von Opferputzen, S. 71–75, Bautenschutz & Bausanierung, 7-1995. Verlag R. Müller, Köln.
- HIRSCHWALD, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Verwitterungsbeständigkeit. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- HODEK, S. (2012): OMA's CRONOCAOS. Die Auseinandersetzung zeitgenössischer Architektur mit den Bestimmungen der Bewahrung, München, 2012.
- HOFFMANN, M.; HEUSER, H.; PRICKARTZ, R. (1992): Beurteilungskriterien für die Reinigung von Natursteinfassaden aus Sandstein mit einem Trockenstrahlverfahren. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 147–156. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- HOLM, A.; KRUS, M.; KÜNZEL, H. M. (1996): Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk. S. 375–396. Intern. Zeitschrift f. Bauinstandsetzen, 2 (5).
- HONSINGER, D. (1990): Strukturmerkmale polymerimprägnierter Sandsteine. Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen und Vermessungstechnik, RWTH Aachen.
- HUBEL, A. (2006): Denkmalpflege. Geschichte. Themen. Aufgaben. Eine Einführung, Stuttgart
- HUBEL, A. (2010): Welterbe – Wertewandel? in: DENKmalWERTE, hrsg. von Hans-Rudolf Meier und Ingrid Scheuermann, Berlin/München 2010, S. 177–190.
- HUSE, N. (Hrsg.) (2006): Denkmalpflege. Deutsche Texte aus drei Jahrhunderten, München.
- HUSTER, U. (2000): Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung, Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Programmes. Dissertation, Kassel University Press GmbH 2000, XII, Kassel.
- Icomos Iscs (2010) International Scientific Committee for Stone: Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns. Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Michael Imhof Verlag, Petersberg.

INSTITUT FÜR DIAGNOSTIK UND KONSERVIERUNG AN DENKMALEN IN SACHSEN UND SACHSEN-ANHALT – IDK (2002): Kalksteinkonservierung am Westportal des Halberstädter Domes St. Stephan und St. Sixtus. Schlussbericht für DBU Förderprojekt. Schmuhl, B. Direktor Stiftung Erhalt und Nutzung der Dome, Kirchen, Klöster Sachsen-Anhalt (Hrsg.): Leitzkau.

INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG IFS (2003): Umweltbedingte Gebäudeschäden an Denkmälern durch die Verwendung von Dolomitmalkmörtel. Förderprojekt DBU. Wiesbaden.

INSTITUT FÜR STEINKONSERVIERUNG IFS (2011): Wirkung Verkehrsbedingter Immissionen auf Baudenkmäler. Eine Pilotstudie zu den Innenstädten von Mainz und München. IFS Bericht Nr. 37–2011. Mainz.

JÄGERS, E. (2000): Dispergiertes Weißkalkhydrat für die Restaurierung und Denkmalpflege Altes Bindemittel – Neue Möglichkeiten. Michael Imhof Verlag, Petersberg.

KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten. Verlag F. Deutike, Leipzig und Wien.

KIESOW, G. (2000): Denkmalpflege in Deutschland. Eine Einführung, 4. Aufl. Darmstadt.

KNÖFEL, D.; SCHUBERT, P. (1992): Zur Beurteilung von Putzmörtel für historische Bauwerke. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1990, S. 123–138. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

KNÖFEL, D.; SCHUBERT, P. (1992a): Zur Beurteilung von Mörteln für die Instandsetzung von Mauerwerk. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 2-1990, S. 105–122. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

KNÖFEL, D.; SCHUBERT, P. (1992b): Zur Beurteilung von Putzmörteln für historische Bauwerke. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 2-1990, S. 123–136. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

KNÖFEL, D.; SCHUBERT, P. (Hrsg.) (1993): Handbuch der Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege. – Sonderheft der Publikationsreihe BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

KNÖFEL, D.; WINNEFELD, F. (1995): Anpassung von Fugendeckmörteln an Ziegelmauerwerk. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 5-1993, S. 147–157. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

KOCHER, M. (2005): Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen. Dissertation Fakultät Geo- und Umweltwissenschaften, Universität München.

KÖHLER, W. (1988): Preservation problems of Carrara marble sculptures, Potsdam Sanssouci. In: Proceedings 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Vol. I, pp. 653–662. Nikolaus Kopernikus University Torun Poland.

KÖHLER, W. (2015): Erarbeitung eines Bewertungs-Leitfadens für Ultraschallmessungen an umweltgeschädigten Marmorskulpturen am Beispiel u.a. des Parks Potsdam Sanssouci (UNESCO Weltkulturerbe). Abschlussbericht DBU-Projekt AZ 29544-45.

KÖHLER, W. (2018a): Nachweismöglichkeiten von mikrobiologischen Besiedlungen auf Marmoroberflächen. FIDA Arbeitshefte 1/2018 Potsdam. Forschungsbericht für das DBU geförderte Projekt: Entwicklung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden anthropogen bedingter biogener Oberflächenveränderungen von Marmorskulpturen am Beispiel von ausgewählten Objekten der Parkanlagen von Schloss Sanssouci und Schloss Rheinsberg.

- KÖHLER, W. (2018b): Ultraschalldiagnostik – ein essentieller Bestandteil bei der Berechnung der Risikoziffer. In: Drewello, R. Hrsg.: Risikoziffer – Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten. S. 65–78. Bamberg University Press.
- KROMPHOLZ, R. (2018): Messgenauigkeiten und Fehlergrenzen bei der Ultraschallmessung. In: Drewello, R. Hrsg.: Risikoziffer – Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten. S. 107–108. Bamberg University Press.
- KOLBITSCH, A. (2002): Aktuelle Verfahren zur Sanierung von Altbauten unter besonderer Berücksichtigung von Mauerwerkskonstruktionen. In: Baustofflehre Bauphysik Brandschutz, S. 85–93, Technische Universität Wien.
- KOWNATZKI, R.; FITZNER, B. (1999): Verwitterungszustandserfassung an Natursteinbauwerken. S. 543–564. Z. Dt. Geol. Ges. 150 (3).
- KRAUTZBERGER, M; MARTIN, D. (2004): Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege, München.
- KRUMBEIN, W. E.; BODE-WARSCHEID, K.; BRAAMS, J.; CHAMIER, B.; GEHRMANN, C.; GROTE, K.; GROSS, M.; LAU, R.; PETERSEN, K.; SCHOSTAK, V.; WARSCHEID, T. (1992): Mikrobiologie an Natursteinmonumenten – Schadenspotential, Wechselwirkungen mit Behandlungen. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 2-1990, S. 39–66. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- KRUS, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation Universität Stuttgart.
- KUCERA, V. (2005): Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage. Project Period January 1, 2002 – April 30, 2005, publishable final report. www.corr-institute.se/MULTI-ASSESS [Stand Februar 2013].
- KÜHN, H. (1981): Farbe, Farbmittel: Pigmente und Bindemittel in der Malerei. In: Zentralinstitut für Kunstgeschichte München (Hrsg.): Reallexikon zur Deutschen Kunstgeschichte, Bd. VII, Sp. 1–54. Verlag C. H. Beck, München.
- KÜNZEL, H. (1969): Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunstharzdispersion. Kunststoffe im Bau, 12, S. 6–32, Heidelberg.
- KÜNZEL, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart.
- KÜNZEL, H. M.; KIESSL, K.; KRUS, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. S. 26–280. Intern. Zeitschrift f. Bauinstandsetzen, 1 (4).
- KÜNZEL, H. M.; KRUS, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. S. 5–20. Intern. Zeitschrift f. Bauinstandsetzen, 1 (1).
- LEWIN, S. Z. (1966): The Preservation of Natural Stone, 1839–1965, pp. 185–277, Art and Archaeology, Technical Abstracts 6 (1).
- LIPP, W. (2008): Kultur des Bewahrens. Schrägansichten zur Denkmalpflege, Wien/Köln/Weimar, 2008.

- LITTMANN, K.; RIECKEN, B.; SASSE, H. R. (1997): Steinschutzstoffe nach dem Aachener Konzept. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalspflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- MAIER, J. (2012): Handbuch Historisches Mauerwerk – Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren, 2. Auflage. Verlag Springer Vieweg, Wiesbaden.
- MANN, W. (1983): Zum Tragverhalten von Mauerwerk aus Natursteinen. In: Mauerwerk-Kalender 1983, S. 687–699. Verlag Ernst & Sohn, Berlin – München.
- MAUS, H. (1988): Ingenieurmäßige Sicherungsmaßnahmen in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts an historischen Bauten. In: Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahresbericht 1988, S. 131–142. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- MAYER, G.; WITTMANN, F. H. (1996): Ein Modell zur Beschreibung des Wasser- und Salztransports in Mauerwerk. S. 509–524. Intern. Zeitschrift f. Bauinstandsetzen, 1 (6).
- MEINHARDT-DEGEN, J.; SNETHLAGE, R. (2002): Alte Pinakothek in Munich and Schillingsfürst Castle – Investigations of the effects of re-treatment on consolidated as well as hydrophobed sandstone facades. In: Snethlage, R.; Meinhardt-Degen, J. (eds.): Workshop DBU Project: Evaluation of Protective Measures on Sandstone Buildings, Oct. 10–12, 2002, pp. 27–38. Bayerisches Landesamt für Denkmalspflege – Zentrallabor, München.
- MEINHARDT-DEGEN, J.; SNETHLAGE, R.; HESTERMANN, M.; TUCIC, V. (2003): Evaluierung von Schutzmaßnahmen an umweltgeschädigten Denkmälern aus Naturstein am Beispiel Alte Pinakothek in München und Schloss Schillingsfürst in Franken (Bayern). Abschlussbericht DBU-Projekt AZ 17619. Bayerisches Landesamt für Denkmalspflege, München.
- MEYER, U.; SCHUBERT, P. (1991): Mauer- und Verfügmörtel (Restauriermörtel) für die Instandsetzung von Natursteinbauwerken. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1989, S. 85–92. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- MIDDENDORF, B. (2007): Mörtel für die Instandsetzung historischer Bauwerke – Voruntersuchung und Rezeptierung. In: Diekamp, A. (Hrsg): Naturwissenschaft und Denkmalspflege, S. 167–175. Innsbruck University Press, Austria.
- MÜLLER, N.; GÜCKER, R. (1990): Gründungsschäden an historischen Bauwerken. Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung, Heft 2.9-1990.
- NAPPI, A.; COTE, P. (1997): Non-destructive Test Methods Applicable to Historic Stone Structures. In: Baer, N.; Snethlage, R. (eds.): Saving Our Cultural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Dahlem Workshop Reports ES20, pp. 151–166. John Wiley and Sons, Chichester, New York.
- NEUMANN, H. H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. Dissertation Universität Hamburg.
- NIETZOLD, A. (2001): Vorspannen ohne Verbund im Mauerwerk historischer Bauten. Dissertation, aus Forschung und Lehre Band 39, Institut für Tragkonstruktionen, Technische Universität Karlsruhe.

ORIAL, G.; RIBOULET, G. (1993): Technique de nettoyage de la statuaire monumentale par désincrustation photonique. Realisation d'un prototype mobile. Conservation of Stone and Other Materials, Proceedings of the Intern. UNESCO-RILEM congress, June 29 – July 1, 1993, Paris, vol. 2. E. & F. N. Spon, London.

PAMPLONA, M.; KOCHER, M.; SNETHLAGE, R.; AIRES-BARROS, L. (2008): Drilling Resistance: State of the Art and Future Developments. In: Lukaszewicz, J. W.; Niemcewicz, P. (eds.): Proceedings 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Sept. 15–20, 2008, pp. 449–456. Nikolaus Copernicus University Press, Torun.

PAMPLONA, M.; KOCHER, M.; SNETHLAGE, R. (2010): Halite – A new calibration material for microdrilling resistance measurements. *Journal of Cultural Heritage* 11: pp. 180–184.

PETERSEN, K.; GEHRMANN-JANSSEN, C.; FRITZ, U.-M. (2018): Möglichkeiten des zerstörungsfreien Monitorings der mikrobiellen Besiedlungen von Marmor mittels TRACE-IT Messkopf. In: W. Köhler Hrsg.: FIDA Arbeitsheft 1/2018, S. 11–22.

PETZET, M. (1993): Denkmalpflege heute. Arbeitsheft 60, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.

PFANNER, M.; PFANNER, J. (2005): Stein und Statik – Steinverbindungen und Steinerergänzungen am Markttor von Milet. In: Grassegger, G.; Patitz, G. (Hrsg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2005, S. 117–127. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

PFANNER, J.; PFANNER, M.; JEGGLE A.; POSSELT, E.; REICHENBACH, L. (2006): Altehrwürdige Steindenkmäler und moderner Stahlbau – Vier aktuelle Beispiele zeitgemäßer Stein-sanierung. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2006, S. 302–317. Huss-Medien GmbH, Verlag Bauwesen, Berlin.

PFANNER, J.; PFANNER, M.; JEGGLE A.; POSSELT, E.; REICHENBACH, L. (2007): Risse und Restaurierung – Rissbeobachtung, Rissmonitoring, Rissanalyse und Rissanierung an historischen Gebäuden. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2007, S. 379–400. Rudolf Müller und Beuth Verlag, Berlin.

PFANNER, M.; PFANNER, J. (2007a): Regenschutz außen ist gleich Kollateralschaden innen? Vom Nutzen und Schaden der Gesimsabdeckungen an historischen Monumenten. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Feuchteschutz. 18. Hanseatische Sanierungstage, 08.–10. November 2007, Heringsdorf/Usedom, S. 175–186. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin.

PFANNER, M.; REICHENBACH, L.; PFANNER J.; JEGGLE A.; KOWALSKI, W. (2009): Historische Ziegelfassaden – Wie gut gemeinte Sanierungen zu Totalzerstörungen führen. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2009, 4. Jahrgang, S. 395–408. Beuth Verlag, Berlin.

PFANNER, M.; REICHENBACH, L.; PFANNER, J.; CLAUS, H. (2010): Verschrauben statt Vermörteln – Zu nachhaltigen und reversiblen Befestigungen von Natursteinen. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2010, 5. Jahrgang, S. 375–388. Rudolf Müller und Beuth Verlag, Berlin.

PFANNER, M. (2011): Marmor und Putz – Kupfer und Blei; Abdichtung und Regenschutz bei der Befreiungshalle in Kelheim. In: Abdichten im Holz- und Bautenschutz. Normen, Regeln und Entwicklungen. B+B FORUM Bautenschutz 28. bis 29. April 2011 in Wismar, S. 175–203. Rudolf Müller und Beuth Verlag, Berlin.

- PFANNER, M. (2015): Überlegungen zur Herstellung antiker und karolingischer Marmorwerke, in: K. Roth-Rubi, Die frühen Marmorskulpturen aus dem Kloster St. Johann in Münstair, S. 300–319. Jan Thorbecke Verlag, Ostfildern.
- PFEFFERKORN, S. (1994a): Auswertung von Untersuchungen mit dem Bohrhärte-Prüfgerät an Gesteinen mit makroskopisch inhomogenem Gefüge. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, 1994–1996, Band 6. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- PFEFFERKORN, S. (1994b): Der Einfluss des Steinkohlebergbaus im Zwickauer Revier auf die übertägige Bausubstanz am Beispiel des Domes Sankt Marien in Zwickau. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, 1994–1996, Band 6. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- PFEUFFER, C. (2018): 3D-Modellierung von Skulpturen mit Laserscan und die quantitative Erfassung der 3D-Flächenmaße von Verwitterungsphänomenen. In: Drewello, R. (Hrsg.): Risikoziffer. Umweltschäden an Marmor und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten. S. 43–64. Bamberg University Press Bamberg.
- PICK, R.; BEYER, S.; DREWELLO, R.; FÖRSTER, D.; LABER, A.; RAU, M.; SCHMIEDINGER, A.; WEISSMANN, R. (2002): Denkmalpflege und Ökologie. Instandhaltung von ökologisch bedeutsamem Mauerwerk am Beispiel der Wallmauern der Festung Rosenberg in Kronach. Gefördert durch DBU. Denkmalpflege Informationen A 87, München.
- PIEPER, K. (1983): Sicherung historischer Bauten. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, München.
- PRIM, P.; WITTMANN, F. H. (1985): Méthode de mesure de l'effet consolidant de produits de traitement de la pierre. In: Proceedings Vth Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, vol. 2, pp. 787–794, Lausanne.
- PROSKE, D.; LIEBERWIRTH, P.; VAN GELDER, P. (2006): Sicherheitsbeurteilung historischer Steinbogenbrücken. Sonderdruck zum 16. Dresdner Brückenbausymposium. Dirk Proske Verlag, Dresden.
- PROSKE, D. (2009): Sicherheitsbeurteilung historischer Mauerwerksbrücken. In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 34, S. 537–572. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- PURSCHE, J. (1992): Befundprotokoll. Denkmalpflege Informationen, Ausgabe A Nr. 75/21. August 1992, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
- PURTAKE, F. (2001): Tragfähigkeit von schlankem Quadermauerwerk aus Naturstein. Dissertation, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Technische Universität Dresden.
- PURTAKE, F. (2010): Gewölbebrücken aus Natursteinmauerwerk – Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zum statischen Nachweis von Gewölbebrücken unter Ausnutzung der räumlichen Tragwirkung. Forschungsvorhaben Nr. IW061178, Schlussbericht 05/2010, Dresden.
- RATHGEN, F. (1915): Die Konservierung von Altertumsfunden. Teil 1: Stein und steinartige Stoffe. Berlin.
- RATHGEN, F.; KOCH, J. (1934): Verwitterung und Erhaltung von Werksteinen – Beiträge zur Frage der Steinschutzmittel. Verlag Zement und Beton, Berlin.
- REIS, O. M. (1935): Die Gesteine der Münchner Bauten und Denkmäler. Gesellschaft für Bayerische Landeskunde e. V. München

- REMMERS (2000): Neue Möglichkeiten zur Natursteinkonservierung. Mit Aufsätzen von G. Hilbert, M. Boos, L. Sattler, E. Wendler, T. Lehmkuhl, S. Pfefferkorn, H. Siedel. Löniger Beiträge zur Baudenkmalpflege, Band I, Dezember 2000.
- RESTAURATOREN HANDBUCH (2018/19): Hrsg. Redaktion RESTAURO. Erscheint jährlich. Callwey Verlag, München.
- RESTAURO (2012): Themenheft zu 3-D-Verfahren. Restauro 5, Juli/August 2012. Callwey Verlag, München.
- REUL, H. (1991): Handbuch Bauchemie – Einführung in die Grundlagen – Rohstoffe, Rezepturen. Verlag für chemische Industrie, H. Ziolkowsky, Augsburg.
- RIEGL, A. (1903): Der moderne Denkmalkultus. Sein Wesen und seine Entstehung. In: Riegl, A.: Gesammelte Aufsätze. Augsburg, Wien.
- RILEM (1994): Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion. – P. Schießl, coordinator, 124-SCR, pp. 415–436, Materials & Structures, 1994, 27.
- RÜDRICH, J. (2003): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Dissertation Universität Göttingen.
- SASSE, H.-R.; SNETHLAGE, R. (1997): The Methods for the Evaluation of Stone Conservation Treatments. In: Baer, N.; Snethlage, R. (eds.): Saving Our Cultural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures, Dahlem Workshop Reports ES20, pp. 223–243. John Wiley and Sons, Chichester, New York.
- SATTLER, L.; WENDLER, E. (1989): Untersuchungen zur Aussagefähigkeit von Musterflächen für die Steinkonservierung. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 1-1989, S. 305–310. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- SATTLER, L. (1992): Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. Dissertation Universität München, published in: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Forschungsbericht 9/1992, 156 S. mit Anhang.
- SAUDER, M.; SCHLOENBACH, R. (1995): Schäden an Außenmauerwerk aus Naturstein. In: Zimmermann, G. (Hrsg.): Schadenfreies Bauen, Band 11. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- SCHAFER, R. J. (1931): The weathering of natural building stones. Building Research Establishment, spec. report 18, Garston-Watford (reprint 1972).
- SCHEUVENS, D.; DIRSCH, TH.; KÜPPER, M.; EBERT, M.; WEINBRUCH, S. (2011): Schadstoffe an der Christuskirche in Mainz und am Bayerischen Nationalmuseum in München: Einzelpartikel-Analyse, PM-Messungen und Auswertung von ZIMEN-Daten. IFS Bericht Nr. 37–2011, S. 55–77.
- SCHMIDT, W. (1993): Das Raumbuch als Instrument denkmalpflegerischer Bestandsaufnahme und Sanierungsplanung. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft 44, 2. verb. Auflage, München.
- SCHMIDT, W. (1994): Orientierungssysteme 1 und 2. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.
- SCHMIDT, W. (1995a): Befunduntersuchung in profanen Baudenkmalern. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.

- SCHMIDT, W. (1995b): Befundbericht bei Untersuchungen in profanen Baudenkmälern. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.
- SCHMIDT, W. (Hrsg.) (1997): Fotografie in der Denkmalpflege – Fotodokumentation und Fotoarchivierung. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.
- SCHOONBROOD, J.; PRICKARTZ, R. (1994): Praxisorientierte Steinschutzstofftränkung. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung, 1994–1996, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- SCHOONBROOD, J. (1996): Entwicklung und Optimierung eines Verfahrens zur Erzielung adäquater Eindringtiefen bei der Applikation von Steinschutzstoffen aus Naturstein. Berichte aus dem Institut für Baumaschinen und Baubetrieb, Dissertation RWTH Aachen. Shaker Verlag, Aachen.
- SCHRAMM, H.-P.; HERING, B. (1988): Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung. Akademische Verlagsanstalt, Graz.
- SCHUH, H. (1987): Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Heft 6, 1987.
- SFB 315 (Hrsg.) (1995): Bergbau und Denkmal 2, Erhaltung und Sicherung von Gründung und Mauerwerk. Sonderforschungsbereich 315 »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke«, Arbeitsheft 13/1995.
- SFB 315 (Hrsg.) (1996): Historische Bauwerke – konstruktiv sichern, behutsam konservieren, schonend nutzen. Intern. Tagung d. SFB 315, Karlsruhe, 26.–28.10.1995, Arbeitshefte des Sonderforschungsbereichs 315 »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke«, Arbeitsheft 14/1996, Universität Karlsruhe.
- SIEDEL, H.; WIEDEMANN, G. (2002): Laserstrahlreinigen von Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- SIEGESMUND, S.; HOPPERT, M. (Hrsg.) (2010): Die Drei Gleichen. Baudenkmäler und Naturraum. Edition Leipzig.
- SIEGESMUND S.; SNETHLAGE, R. (2011): Stone in Architecture, 4th edition. Springer Verlag, Berlin – Heidelberg
- SIMADER, J. (2007): Vorgespannte Aramidstäbe und Vernadelungen in denkmalgeschützten Gebäuden. In: Fortbildungsveranstaltung 2007 – Sektion Spannbeton der ÖVBB, Heft 65, S. 55–58, Innsbruck.
- SNETHLAGE, R. (1996): Naturstein-Reinigung 1. und 2. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.
- SNETHLAGE, R.; WENDLER, E. (1996): Methoden der Steinkonservierung, Anforderungen und Bewertungskriterien. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 3–40. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- SNETHLAGE, R.; WENDLER, E.; KLEMM, D. D. (1996a): Tenside im Gesteinsschutz – bisherige Resultate mit einem neuen Konzept zum Schutz von Denkmälern aus Naturstein. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 127–146. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

SNETHLAGE, R.; AURAS, M.; LEISEN, H. (1996b): Zisterzienserinnenkloster Birkenfeld. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 277–339. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

SNETHLAGE, R.; AURAS, M.; SATTLER, L.; WENDLER, E. (1996c): Die Allerheiligenhofkirche in München. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 195–220. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

SNETHLAGE, R.; LEISEN, H.; SATTLER, L.; WENDLER, E. (1996d): Schloss Schillingsfürst. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, S. 221–275. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

SNETHLAGE, R. (1997): Mineralische Außenputze. Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München.

SNETHLAGE, R.; AURAS, M.; HERM, CH.; SIMON, S. (1997): St. Moriz in Coburg. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

SNETHLAGE, R.; WENDLER, E. (1997): Moisture Cycles and Sandstone Degradation. In: Baer, N.; Snethlage, R. (eds.): Saving Our Cultural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures. Dahlem Workshop Reports ES20, pp. 8–24. John Wiley and Sons, Chichester, New York.

SNETHLAGE, R.; WENDLER, E. (2001): Chemical Conservation of Stone Structures. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Electronic Release 2001. Wiley-VCH, Weinheim.

SNETHLAGE, R.; MEINHARDT-DEGEN, J. (Hrsg.) (2003): Workshop DBU Project: Evaluation of Protective Measures on Sandstone Buildings, Oct. 10–12, 2002, pp. 68–80, Forschungsbericht 21/2003, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege – Zentrallabor, München.

SNETHLAGE, R.; GRUBER, CH.; TUCIC, V.; KOCHER, M. (2008): Transforming Gypsum into Calcium-phosphate – the better way to preserve lime paint layers on stone? Delgado Rodrigues, J.; Mimoso, J. M. (eds.): Proceedings International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage. May 6–7, 2008, pp. 1–13. LNEC Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon.

SNETHLAGE, R.; SIMON, S.; HEINRICHS, K. (2010): Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. Deutsche Übersetzung der englisch-französischen Vorlage. ICOMOS Reihe Monuments and Sites XV. www.international.icomos.org [Stand Februar 2013]. Michael Imhof Verlag, Petersberg.

SNETHLAGE, R. (2011): Stone Conservation. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture, 4th edition. Chapter 7, pp. 411–544. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

SNETHLAGE, R. (2018): Risikoziffer I bis VII. In: Drewello R. Hrsg.: Risikoziffer. Umweltschäden an Marmor- und Sandsteinskulpturen erfassen und objektiv bewerten. Bamberg University Press.

SOBOTT, R. J.; SCHOLZ, G.; IBACH, W. H. (2019): AVT weiterentwickelt. Naturstein 02/2019, S. 45–47.

STADLBAUER, E.; BRANDES, CH. (2003): Results of a 10 year exposure study with painted natural stone. Comparison of the durability of various historic and modern paint systems.

STEIGER, M.; NEUMANN, H. H.; WITTENBURG, C.; BEHLEN, A.; SCHMOLKE, S.; STOFFREGEN, J.; DANNECKER, W. (1992): Sandsteinverwitterung in schadstoffbelasteter Atmosphäre am

Beispiel des Erfurter Doms. In: Jahresbericht Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 215–239. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

STEIGER, M. (1997): Salze in Natursteinmauerwerk – Probenahme, Messung und Interpretation. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

STEIGER, M.; CHAROLA, A. E. (2011): Weathering and Deterioration. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture, 4th edition, pp. 227–316. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

STEINDLBERGER, E. (2010): Neue Steine für alte Bauwerke: Anforderungskriterien bei der Steinauswahl. Institut für Steinkonservierung IFS, Festschrift zum 20-jährigen Bestehen, S. 5–16, Mainz.

STERFLINGER K. (2011a): Processes of Biodeterioration and Biodegradation. In: Steiger, M.; Charola, A. E. (2011): Weathering and Deterioration, Chapter 4.5.2, pp. 298–304. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture, 4th edition. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

STERFLINGER, K. (2011b): Antimicrobial Treatments and Preventive Measures. In: Snethlage, R. (2011): Stone Conservation, Chapter 7.11, pp. 527–533. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture, 4th edition. Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

STIESCH, G. (1993): Gedanken zur Anwendung der Vorspanntechnik in historischem Mauerwerk. In: Erhaltungskonzepte, S. 119–124. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

TIANO, P. (Hrsg.) (2000): DRILLMORE – Drilling Methodology for Monuments Restoration. Proceedings of the Workshop March 16–17, 2000. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.

THUNIG, W.; WILCKE, H. (1979): Gewinnen, Bearbeiten und Versetzen von Werkstein, 3. Auflage. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

IUAV (University of Venice – Faculty of Architecture) (2006): Assessment of desalination mortars and poultrices for historic masonry. F. Zezza (coordinator), EU contract 022714, 17 p., Newsletter 1/2006, IUAV Venice.

IUAV (University of Venice – Faculty of Architecture) (2007): Assessment of desalination mortars and poultrices for historic masonry. F. Zezza (coordinator), EU contract 022714, Newsletter 3/2007, tudelft.nl.

ULLRICH, M. (1998): Instandsetzung von Mauerwerk durch Anker, Vernadelung und Injektionen. In: WTA-Schriftenreihe Heft 17, Verfahren zur Bauwerksinstandsetzung, Gestern – Heute – Morgen, S. 37–54. Aedificatio Verlag, Freiburg/Brsgr.

VDI RICHTLINIE 3798 Blatt 1 (1989): Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen, insbesondere bei kulturhistorischen Objekten. VDI Kommission Reinhaltung der Luft, 55 S., Ausschuss Wirkung von Luftverunreinigungen auf Werkstoffe, Düsseldorf.

VDI RICHTLINIE 3798 Blatt 3 (1998): Die grafische Dokumentation. VDI Kommission Reinhaltung der Luft, Ausschuss Wirkung von Luftverunreinigungen auf Werkstoffe, Düsseldorf. (Hinweis: für Mai 2019 wurde eine überarbeitete Fassung der Richtlinie angekündigt)

- VDI RICHTLINIE 3955 Blatt 1 (1994): Bestimmung der korrosiven Wirkung komplexer Umgebungsbedingungen. Exposition von Stahlblechen (Mank'sches Karussell).
- VDI RICHTLINIE 3955 Blatt 2 (1993): Bestimmung der korrosiven Wirkung komplexer Umgebungsbedingungen. Exposition von Glassensoren.
- VDI RICHTLINIE 3955 Blatt 3 (2000): Bestimmung der korrosiven Wirkung komplexer Umgebungsbedingungen auf Werkstoffe – Exposition von Naturstein-Plättchen (Manksches Karussell)
- VOB (2016): Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen. Ausgabe 2016. Beuth Verlag, Berlin.
- VOB/A (2019): Bekanntmachung der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A (VOB/A). Veröffentlicht am Dienstag, 19. Februar 2019, BAnz AT 1, Berlin.
- VÖKLE (2016): Werkplanung und Steinbearbeitung im Mittelalter. Grundlagen der handwerklichen Arbeitstechniken im mittleren Europa von 1000 bis 1500. Ebner Verlag, Ulm.
- VOGEL, H.; BRAUNS, J. (1994): Zisterzienserinnenkloster Kirchheim/Ries. 1. Zwischenbericht der geotechnischen Untersuchungen von 11/92 bis 02/93. Universität Karlsruhe, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abt. Erddamm- und Deponiebau.
- VORONINA, V. (2011): Salt extraction by poulticing: an NMR study. Dissertation Eindhoven University of Technology.
- WALLASCH, S. (1999): Instandsetzung von Ziegelmauerwerk. In: Gerner, M. (Hrsg.): Altbau-modernisierung Band 1. Deutsche Verlags-Anstalt DVA, Stuttgart.
- WARNECKE, P. (1995): Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Mauerwerk. Dissertation Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig.
- WARNECKE, P.; ROST & ACUTESY, F. S.; BUDELMANN, H. (1995): Tragverhalten und Konsolidierung von Wänden und Stützen aus historischem Natursteinmauerwerk. Mauerwerk Kalender. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- WARSCHEID, T.; BECKER, T.; BRAAMS, J.; BRÜGGERHOFF, S.; GEHRMANN, C.; KRUMBEIN, W. E.; PETERSEN, K. (1992): Studies on the Temporal Development on Microbial Infection of Different Types of Sedimentary Rocks and its Effect on the Alteration of the Physico-Chemical Properties in Building Materials. Congrès International UNESCO-RILEM sur la Conservation de la Pierre et autres matériaux, Paris, June 29 – July 1, 1993
- WATT, J.; JARRETT, D.; HAMILTON, R. (2008): Dose-response functions for the soiling of heritage materials due to air pollution exposure. *Science of the Total Environment*, Vol. 400 (1–3), pp. 415–424.
- WATT, J.; TIDBLAD, J.; KUCERA, V.; HAMILTON, R. (2009): The Effect of Air Pollution on Cultural Heritage. Springer Science + Business Media, New York.
- WEEBER, H. (Hrsg.) (1994): Bauleitung und Projektmanagement für Architekten und Ingenieure. WEKA Baufachverlag, Augsburg.
- WEISS, G. (1996): Das Zisterzienserinnenkloster Kirchheim am Ries. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

- WEISS, N. R.; SLAVID, I.; WHEELER, G. (2000): Development and Assessment of a Conversion Treatment for Calcareous Stone. Fassina, V. (ed.): Proceedings 9th Intern. Congress Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 19–24, 2000, pp. 533–540. Elsevier, Amsterdam.
- WENDLER, E.; SNETHLAGE, R. (1988): Durability of Hydrophobing Treatments of Natural Stone Buildings. Proc. Intern. Symp. Geol. Soc., pp. 945–952, Sept. 19–23, 1988, Athens.
- WENDLER, E.; SNETHLAGE, R. (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte, S. 110–115, Bautenschutz & Bausanierung, 12-1989, H. 6. Verlag R. Müller, Köln.
- WENDLER, E.; SATTLER, L. (1990): Anlage einer Musterfläche zur Steinkonservierung am Schloss Schillingsfürst. Teil 1: Vorbereitende Maßnahmen. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinerfall – Steinkonservierung, Band 2-1990, S. 187–192. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- WENDLER, E.; SATTLER, L. (1991): Anlage einer Musterfläche zur Steinkonservierung am Schloss Schillingsfürst. Teil 2: Applikation und Erfolgskontrolle. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinerfall – Steinkonservierung, Band 3-1991, S. 133–139. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- WENDLER, E.; RÜCKERT-THÜMLING, R.; KLEMM, D. D., SNETHLAGE, R. (1992): Zur Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungsmaßnahmen auf Naturstein. Vergleichende Fallbeispiele am Kölner Dom und am Ulmer Münster. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht Steinerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 197–204. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- WENDLER, E. (1997): Maxtormauer Nürnberg. Zustandserfassung, Erstellung eines Konservierungskonzepts. Bericht für die Stadt Nürnberg, 119 S., Berichtszeitraum 11/1996–12/1997, München.
- WENZEL, F. (1987): Verpressen, Vernadeln und Vorspannen von Mauerwerk historischer Bauten. Stand der Forschung, Regeln für die Praxis. In: Sonderforschungsbereich 315, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahresbericht 1987, S. 53–72. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- WENZEL, F., et al. (2000): Historisches Mauerwerk – Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe.
- WEFERLING, U.; HEINE, K.; WULF, U. (Hrsg.) (2001): Von Handaufmaß bis High Tech: Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Verlag Philipp von Zabern, Mainz am Rhein.
- WEFERLING, U.; HEINE, K.; HENZE, F. (Hrsg.) (2007): Von Handaufmaß bis High Tech II mit CD: Informationssysteme in der historischen Bauforschung. Verlag Philipp von Zabern, Mainz am Rhein.
- WINDSHEIMER, B.; SNETHLAGE, R.; WIHR, R. (1991): Die Entsalzung von Steindenkmälern im Freien. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Forschungsbericht Nr. 4/1991, München.
- WINKLER, E. M. (1975): Stone, properties, durability in man's environment. Springer Verlag, Heidelberg, New York, Wien.
- WINNEFELD, F.; KNÖFEL, D. (1996): Modifizierung von Kalkmörteln zur Fugenreparatur von Ziegelmauerwerk. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinerfall – Steinkonservierung, Band 6-1994. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

- WINNEFELD, F.; KNÖFEL, D. (1997): Entwicklung eines Kalkputzmörtels für Ziegelmauerwerk am Beispiel der Orangeriesäle im Schloss Schwerin. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 7-1995. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- WISSER, S.; KNÖFEL, D. (1987, 1988): Untersuchungen an historischen Putz- und Mauer-mörteln. Teil 1: Analysengang. Bautenschutz & Bausanierung, 10 (1987), S. 124–126. Teil 2: Untersuchungen und Ergebnisse, S. 163–171, Bautenschutz & Bausanierung, 11 (1988). Verlag R. Müller, Köln.
- WITTENBURG, C.; DANNECKER, W. (1992): Dry Deposition and Deposition Velocity of Air Borne Acidic Species upon Different Sandstones, pp. 869–872, J. Aerosol Sci., 23, Suppl. 1.
- WITTENBURG, CH.; BEHLEN, A.; STEIGER, M.; DANNECKER, W. (1996): Die Messung von Luftschadstoffen und deren Deposition auf verschiedene Sandsteine an historischen Bauwerken. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- WOLFF, A.; POHLE, E. (1991): Qualitätssicherung in der Denkmalpflege. Kunstchronik, H. 6, S. 306–313.
- WTA-Merkblatt 3-13-01 (2001): Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen
- WTA-Merkblatt 3-18-14/D (2014): Monitoring von Bauten und Denkmalen aus Naturstein.
- WTA-Merkblatt 3-17 (2010): Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. WTA-Merkblatt 3.17.
- www.salzwiki.de/index.php/Entsalzung_durch_Kompressen
- YOUNG, M.; BALL, J.; LAING, R.; CORDINER, P.; HULLS, J. (2003a): The Consequences of Past Stone Cleaning Intervention on Future Policy and Resources. Research Report, 223 p. Historic Scotland, Edinburgh.
- YOUNG, M. E.; BALL, J. R. A.; URQUHART, D. C. M. (2003b): Maintenance and Repair of Cleaned Stone Buildings. Historic Scotland Technical Advice Note 25. Historic Scotland, Edinburgh.
- ZENTRALVERBAND SANITÄR HEIZUNG KLIMA (2018): Richtlinien für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade. Klempnerfachregeln. Juni 2018. St. Augustin.

Ausgewählte DIN-Normen

DIN 482:2002-04	Straßenbordsteine aus Naturstein.
DIN 1164-10:2013-03	Zement mit besonderen Eigenschaften-Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt
DIN 1356-1:1995-05	Bauzeichnungen – Teil I: Arten, Inhalte und Grundregeln der Darstellung.
DIN 1356-1:2018-03	Entwurf Bauzeichnungen – Teil I: Grundregeln der Darstellung.
DIN 1960:2016-09	VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen
DIN 1961:2016-09	VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen
DIN 4095:1990-06	Dränung zum Schutz baulicher Anlagen.
DIN 4760:1982-06	Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem.
DIN 5033-1:2017-10	Farbmessung –Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung (auch DIN EN ISO 11664-1, Ausgabe 2013-08).
DIN 5033-7:2014-10	Farbmessung Teil 7: Messbedingungen für Körperfarben.
DIN 6164:1980-02	DIN-Farbenkarte; System der DIN-Farbenkarte für den 2°-Normalbeobachter
DIN 18130-1:1998-05	Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche.
DIN 18130-2:2015-08	Teil 2: Baugrund – Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts: Feldversuche
DIN 18157	Ausführung von Bekleidungen und Belägen im Dünnbettverfahren
DIN 18157-1:2017-01	Teil1: Zementhaltige Mörtel
DIN 18157-2:2017-04	Teil2: Dispersionsklebstoffe
DIN 18157-3:2017-04	Teil 3: Reaktionsharzklebstoffe
DIN 18195:2017-07	Abdichtungen von Bauwerken - Begriffe (nur Begriffsnorm. Abdichtung für erdberührte Bauteile unter DIN 18533)
DIN 18299 – DIN 18459	VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen. – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV).
DIN 18299:2016-09	VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen. – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV). Allgemeine Regelungen für Bauarbeiten jeder Art.
DIN 18330:2016-09	Mauerarbeiten
DIN 18332:2016-09	Naturwerksteinarbeiten.
DIN 18333:2016-09	Betonwerksteinarbeiten.

DIN 18339:2016-09	Klempnerarbeiten.
DIN 18350:2016-09	Putz- und Stuckarbeiten.
DIN 18515-1:2017-08	Außenwandbekleidungen – Grundsätze für Planung und Ausführung – Teil 1: Angemörtelte Fliesen oder Platten
DIN 18516-1:2010-06	Außenwandverkleidungen hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfungsgrundsätze.
DIN 18516-3:2018-03	Außenwandverkleidungen hinterlüftet – Teil 3: Naturwerkstein, Anforderungen, Bemessung.
DIN 18533	Abdichtung von erdberührten Bauteilen
DIN 18533-1:2017-07	Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze
DIN 18533-2:2017-07	Teil 2: Abdichtung mit bahnenförmigen Abdichtungsstoffen
DIN 18533-3:2017-07	Teil 3: Abdichtung mit flüssig zu verarbeitenden Abdichtungsstoffen
DIN 18540:2014-09	Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtstoffen.
DIN 18550-1:2018-01	Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1, Ausgabe: 2016-09 für Außenputze.
DIN 18550-2:2018-01	Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1, Ausgabe: 2016-09 für Innenputze
DIN 18555	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln.
DIN 18555-4:1986-03	Teil 4: Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch.
DIN 18555-4:2018-05	Entwurf. Teil 4: Festmörtel; Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch.
DIN 18555-6:1987-11	Teil 6: Festmörtel; Bestimmung der Haftzugfestigkeit.
DIN 52008:2006-03	Prüfverfahren für Naturstein. Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit.
DIN 52009:2013-10	Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Bestimmung der Wasseraufnahme unter Druck.
DIN 52100-2:2007-06	Naturstein – Gesteinskundliche Untersuchungen – Teil 2; Allgemeines und Übersicht.
DIN 52101:2013-10	Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Probe-nahme.
DIN 52102:2013-10	Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Dichte, Trockenrohdichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität.
DIN 52106:2013-12	Prüfung von Gesteinskörnungen. Beurteilungsgrundlagen für die Verwitterungsbeständigkeit.
DIN 52108:2010-05	Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe; Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Boehme. Schleifscheiben-Verfahren.

DIN 52115-2:2014-02	Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Teil 2. Schlagversuch an gebrochenen Gesteinskörnungen größer 32 mm.
DIN 53236:2018-02	Farbmittel – Mess- und Auswertebedingungen zur Bestimmung von Farbunterschieden bei Beschichtungsstoffen, ähnlichen Beschichtungen und Kunststoffen

Bereits als DIN EN-Normen vorliegende Normen

DIN EN 197-1:2011-11	Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
DIN EN 197-2:2019-03	Entwurf. Zement – Teil 2: Konformitätsbewertung
DIN EN 459-1:2015-07	Baukalk – Teil 1: Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien.
DIN EN 771-6:2015-11	Festlegung für Mauersteine – Teil 6: Natursteine
DIN EN 772	Prüfverfahren für Mauersteine
DIN EN 772-1:2016-05	Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit
DIN EN 772-4:1998-10	Teil 4: Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein
DIN EN 772-6:2002-02	Teil 6: Bestimmung der Biegezugfestigkeit von Mauersteinen aus Beton
DIN EN 772-11:2011-07	Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln
DIN EN 772-13:2000-09	Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenroh-dichte von Mauersteinen (außer Natursteinen)
DIN EN 772-15:2000-09	Teil 15: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Porenbetonsteinen
DIN EN 772-20:2005-05	Teil 20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen
DIN EN 772-21:2011-07	Teil 21: Bestimmung der Kaltwasseraufnahme von Mauerziegeln und Kalksandsteinen
DIN EN 933-4:2015-01	Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl
DIN EN 998-1:2017-02	Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel
DIN EN 998-2:2017-02	Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauermörtel
DIN EN 1015	Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk
DIN EN 1015-1:2007-05	Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung (durch Siebanalyse)
DIN EN 1015-2:2007-05	Teil 2: Probenahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln
DIN EN 1015-6:2007-05	Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel

DIN EN 1062	Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich
DIN EN 1062-1:2004-08	Teil 1: Einteilung.
DIN EN 1062-3: 2008-04	Teil 3: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.
DIN EN 1097	Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen
DIN EN 1097-2:2018-02	Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung.
DIN EN 1097-3:1998-06	Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt
DIN EN 1097-6:2005-12	Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme.
DIN EN 1172:2012-02	Kupfer und Kupferlegierungen – Bleche und Bänder für das Bauwesen.
DIN EN 1324:2007-11	Mörtel und Klebstoffe für Fliesen und Platten – Bestimmung der Haftfestigkeit von Dispersionsklebstoffen
DIN EN 1341:2013-03	Platten aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren.
DIN EN 1342:2013-03	Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren.
DIN EN 1343:2013-03	Bordsteine aus Naturstein für Außenbereiche – Anforderungen und Prüfverfahren.
DIN EN 1467:2012-06	Naturstein – Rohblöcke – Anforderungen.
DIN EN 1468:2012-06	Naturwerkstein – Rohplatten – Anforderungen.
DIN EN 1469:2015-05	Natursteinprodukte – Bekleidungsplatten – Anforderungen.
DIN EN 1925:1999-05	Prüfverfahren von Naturstein – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung.
DIN EN 1926:2007-03	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit.
DIN EN 1936:2007-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität.
DIN EN 1996-1-1:2013-02	Mauerwerk - Berechnung und Ausführung (DIN EN 1996-1-1/NA/A2, Ausgabe: 2015-01 DIN EN 1996-3, Ausgabe: 2010-12, DIN EN 1996-3/NA/A2, Ausgabe: 2015-01, s. a. als Eurocode 6 zusammengefasst vorliegende Normen)
DIN EN 12004-1:2017-05	Mörtel und Klebstoffe für keramische Fliesen und Platten – Teil 1: Anforderungen, Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit, Einstufung und Kennzeichnung
DIN EN 12004-2:2017-05	Mörtel und Klebstoffe für keramische Fliesen und Platten – Teil 2: Prüfverfahren
DIN EN 12058:2015-05	Natursteinprodukte – Bodenplatten und Stufenbeläge – Anforderungen.

DIN EN 12059:2012-03	Natursteinprodukte – Steine für Massivarbeiten – Anforderungen.
DIN EN 12326-1:2014-11	Schiefer- und andere Natursteinprodukte für Dachdeckungen und Außenwandbekleidungen Teil 1: Spezifikationen für Schiefer und carbonathaltige Schiefer
DIN EN 12326-2:2011-10	Schiefer und Naturstein für überlappende Dachdeckungen und Außenwandbekleidungen – Teil 2: Prüfverfahren für Schiefer und carbonathaltige Schiefer.
DIN EN 12370:2007-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen.
DIN EN 12371:2010-07	Prüfung von Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes.
DIN EN 12372:2007-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegefestigkeit unter Mittellinienlast Entwurf 2006-05
DIN EN 12407:2007-06	Prüfverfahren von Naturstein – Petrographische Prüfung.
DIN EN 12407:2016-09	Entwurf. Prüfverfahren von Naturstein – Petrographische Prüfung.
DIN EN 12440:2018-01	Naturstein – Kriterien für die Bezeichnung.
DIN EN 12588:2007-03	Blei und Bleilegierungen – Gewalzte Bleche aus Blei für das Bauwesen.
DIN EN 12620:2008-07	Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung
DIN EN 12670:2016-09	Terminologie von Naturstein.
DIN EN 13139:2002-08	Gesteinskörnungen für Mörtel
DIN EN 13161:2008-08	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Biegefestigkeit unter Drittelinienlast.
DIN EN 13279-1:2008-11	Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel – Teil 1: Begriffe und Anforderungen.
DIN EN 13279-2:2014-03	Gipsbinder und Gips-Trockenmörtel – Teil 2: Prüfverfahren.
DIN EN 13364:2002-03	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch.
DIN EN 13373:2003-08	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Maße und anderer geometrischer Merkmale von Naturwerkstein.
DIN EN 13755:2008-08	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck.
DIN EN 13914-1:2016-09	Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 1: Außenputze
DIN EN 14066:2013-08	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Alterung durch Wärmeschock.
DIN EN 14146:2004-06	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls (Messung der Resonanzfrequenz der Grundschiwingung).
DIN EN 14147:2004-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Beständigkeit gegen Alterung durch Salzsprühnebel.
DIN EN 14157:2017-12	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß.

DIN EN 14158:2004-06	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Bruchenergie.
DIN EN 14231:2003-07	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Gleitwiderstandes mit Hilfe des Pendelprüfgerätes.
DIN EN 14579:2005-01	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung.
DIN EN 14580:2005-07	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls.
DIN EN 14581:2005-03	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten.
DIN EN 15801:2010-04	Erhaltung des kulturellen Erbes - Bestimmung der Wasserabsorption durch Kapillarität (CEN/TC 346: EN 15801).
DIN EN 15803:2010-04	Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Bestimmung des Wasserdampfleitkoeffizienten (CEN/TC 346: EN 15803)
DIN EN 15898:2011-12	Erhaltung des kulturellen Erbes – Allgemeine Begriffe
DIN EN 16236:2018-11	Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (AVCP) von Gesteinskörnungen – Typprüfung und werkeigene Produktionskontrolle

Als Eurocode 6 zusammengefasste vorliegende Normen (Auswahl mit jeweiligem nationalem Anhang)

DIN EN 1996-1-1:2010-12	Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk.
DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – 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.
DIN EN 1996-2/NA:2012-01	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 2: Planung, Auswahl der Baustoffe und Ausführung von Mauerwerk.
DIN EN 1996-3:2010-12	Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten.
DIN EN 1996-3/NA:2012-01	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten.

Internationale Normen

DIN EN ISO 3274:1998-04	Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten.
DIN ISO 3310-1:2017-011	Analysensiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 1: Analysensiebe mit Metalledrahtgewebe.
DIN EN ISO 4287:2010-07	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit.
DIN EN ISO 4288:1998-04	Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit.
DIN EN ISO 11664-1:2013-08	Farbmetrik – Teil 1: CIE farbmetrische Normalbeobachter
DIN EN ISO 11664-3:2013-08	Farbmetrik – Teil 3: CIE-Farbwerte
DIN EN ISO 11664-4:2012-06	Farbmetrik – Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum.
DIN EN ISO 12572:2017-05	Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.
DIN EN ISO 13565-1:1998-04	Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 1: Filterung und allgemeine Messbedingungen.
DIN EN ISO 13565-2:1998-04	Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve.
DIN EN ISO 14688-1:2018-05	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung.
DIN EN ISO 14688-2:2018-05	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.
DIN EN ISO 14689:2018-05	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels
DIN EN ISO 15148:2018-12	Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.
DIN EN ISO 22475-1:2007-01	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung.

DIN EN ISO 22475-1:2018-12	Entwurf. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung.
DIN ISO 3310-1:2017-11	Analysensiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe

Inzwischen zurückgezogene Normen

DIN 1053	Mauerwerk. Berechnung und Ausführung (weitgehend ersetzt durch EN 1996)
DIN 1060-1	Baukalke- Teil1: Definitionen, Anforderungen, Überwachung (ersetzt durch DIN EN 459-1, Ausgabe 2015-07)
DIN 1164	Portland-, Eisenportland-, Hochofen und Trasszement (weitgehend ersetzt durch EN 197)
DIN 1168:1986-01	Bl. 1: Baugipse. Begriffe und Kennzeichnung. Bl. 2: Baugipse. Stuck- und Putzgips. Anforderungen, Prüfverfahren, Geräte (jetzt aufgeteilt nach Anwendungsbereichen in DIN EN 13279-1, Ausgabe: 2008-11 und DIN EN 13279-1, Ausgabe: 2017-08 Entwurf).
DIN 4022-1:1987-09	Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels – Teil 1: Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels (teilweise ersetzt durch DIN EN ISO 22475)
DIN 4022-2:1981-03	Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels – Teil 2: Schichtenverzeichnis für Untersuchungen und Bohrungen im Fels (ersetzt durch DIN EN ISO 22475)
DIN 4022-3:1982-05	Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels – Teil 3: Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von Proben im Boden (ersetzt durch DIN EN ISO 22475)
DIN 4188-1:1977-10	Siebböden; Drahtsiebböden für Analysensiebe – Teil1: Maße (ersetzt durch DIN ISO 3310-1, Ausgabe 2017-11).
DIN 4188-2:1977-10	Siebböden; Drahtsiebböden für Analysensiebe – Teil 2: Anforderungen und Prüfungen (ersetzt durch DIN ISO 3310-1, Ausgabe 2017-11).
DIN 4226-3:1983-04	Zuschlag für Beton – Teil 3: Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge (ersetzt durch DIN EN 13139, Ausgabe: 2002-08).
DIN 4762:1989-01	Oberflächenrauheit. Begriffe. Oberfläche und ihre Kenngrößen (ersetzt durch DIN EN ISO 4287, Ausgabe: 2010-07).
DIN 4768:1990-05	Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz und Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten. Grundlagen.
DIN 4771:1977-04	Messung der Profiltiefe Pt von Oberflächen.

DIN 4772:1979-11	Elektrische Tastschnittgeräte zur Messung der Oberflächenrauheit nach dem Tastschnittverfahren (ersetzt durch DIN EN ISO 3274, Ausgabe: 1998-04).
DIN 4775:1982-06	Prüfen der Rauheit von Werkstoffoberflächen. Sicht- und Tastvergleich. Tastschnittverfahren (ersetzt durch DIN EN ISO 4288, Ausgabe 1998-04).
DIN 4776:1990-05	Messung der Kenngrößen RK, RPK, RVK, MR1 und MR2 zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil. Messbedingungen und Auswerteverfahren (ersetzt durch DIN EN ISO 13565)
DIN 5033-3:1992-07	Farbmessung – Teil 3: Farb-Messzahlen (ersetzt durch DIN EN ISO 11664-3, Ausgabe 2013-08).
DIN 5033-6:1976-08	Farbmessung – Teil 6: Dreibereichsverfahren
DIN 6174:2007-10	Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIE-LAB Formel (ersetzt durch DIN EN ISO 11664-4, Ausgabe: 2012-06).
DIN 18195-2:2009-02	Bauwerksabdichtungen – Teil 2: Stoffe (weitgehend ersetzt durch DIN 18533, Ausgabe 2017-07)
DIN 18195-3:2011-12	Bauwerksabdichtungen – Teil 3: Bauwerksabdichtungen; Anforderungen an den Untergrund und Verarbeitung der Stoffe (weitgehend ersetzt durch DIN 18533, Ausgabe 2017-07)
DIN 18195-4:2011-12	Bauwerksabdichtungen – Teil 4: Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nicht stauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung (weitgehend ersetzt durch DIN 18533, Ausgabe 2017-07)
DIN 18195-10:2011-12	Bauwerksabdichtungen – Teil 10: Schutzschichten und Schutzmaßnahmen (weitgehend ersetzt durch DIN 18533, Ausgabe 2017-07)
DIN 18550	Teil 4: Putz; Leichtputze; Ausführung (ersetzt durch DIN EN 998-1:2017-02)
DIN 18555-1:1982-09	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln Teil 1: Allgemeines, Prüfmörtel (Der Regelsetzer empfiehlt die Anwendung von DIN EN 1015-2:2007-05)
DIN 18555-2:1982-09	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 2: Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts (Der Regelsetzer empfiehlt die Anwendung von DIN E 1015-3:2007-05, DIN EN 1015-4:1998-12, DIN EN 1015-6:2007-05, DIN EN 1015-7:1998-12)
DIN 18555-3:1982-09	Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Teil 3: Festmörtel; Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte
DIN 18557:1997-11	Werkmörtel – Herstellung, Überwachung, Lieferung.

DIN 50008-1:1981	Klimate und ihre technische Anwendung; Konstantklimate über wässrigen Lösungen – Teil 1: Gesättigte Salzlösungen, Glycerinlösungen
DIN 52103:1988-10	Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert (ersetzt durch DIN 52009, Ausgabe 2013-10)
DIN 52104-1:1982-11	Prüfung von Naturstein – Teil 1: Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Verfahren A bis Q.
DIN 52104-2:1982-11	Prüfung von Naturstein – Teil 2: Frost-Tau-Wechsel-Versuch; Verfahren Z.
DIN 52105:1988-08	Prüfung von Naturstein; Druckversuch (ersetzt durch DIN EN 1926, Ausgabe: 2007-03)
DIN 52107:1947-10	Prüfung von Naturstein; Schlagfestigkeit an Würfeln ermittelt
DIN 52109:1939-10	Prüfung von Naturstein; Widerstandsfähigkeit von Schotter gegen Schlag und Druck (ersetzt durch DIN EN 1097-2, Ausgabe 2010-07).
DIN 52110:1985-08	Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Schüttdichte von Gesteinskörnungen(ersetzt durch DIN EN 1097-2, Ausgabe 1998-06)
DIN 52111:1990-03	Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (ersetzt durch DIN EN 12370, Ausgabe 2007-02)
DIN 52112:1988-08	Prüfung von Naturstein; Biegeversuch (ersetzt durch DIN EN 12370, Ausgabe 2007-02)
DIN 52113:1988-10	Prüfung von Naturstein; Bestimmung des Sättigungswertes (ersetzt durch DIN EN 13755, Ausgabe 2008-08)
DIN 52114:1988-08	Prüfung von Gesteinskörnungen; Bestimmung der Kornform mit dem Kornform-Messschieber (ersetzt durch DIN EN 933-4, Ausgabe 2015-01)
DIN 52115-1:1988-08	Teil 1. Prüfung von Gesteinskörnungen; Schlagversuch; Schlagprüfgerät (ersetzt durch DIN EN 1097-2:2010-07)
DIN 52115-3:1988-03	Prüfung von Gesteinskörnungen – Teil 3. Prüfung von Gesteinskörnungen; Schlagversuch; Schlagversuch an Splitt und Kies; Kornklasse 8/12,5 mm (ersetzt durch DIN EN 1097-2, Ausgabe 2010-07)
DIN 52201:1985-05	Dachschiefer; Begriff; Prüfung (ersetzt durch DIN EN 12326-2, Ausgabe 2011-09).
DIN 52450:1985-08	Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstoffe: Bestimmung des Quellens und Schwindens an kleinen Probekörpern (ersatzlos zurückgezogen)
DIN 52615:1985-08	Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, bemalten und unbehandelten Natursteinen (ersetzt durch DIN EN ISO 12572, Ausgabe: 2017-05)

DIN 52617:1987-05	Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen (ersetzt durch DIN EN ISO 15148, Ausgabe: 2018-12)
DIN EN 998-1:2017-02	Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 1: Putzmörtel
DIN EN 1062-2:1996-05	Entwurf. Lacke und Anstrichstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe im Außenbereich und Beton – Teil 2: Wasserdampf-Diffusionsstromdichte; Bestimmung und Einteilung
DIN EN 1324:2007-11	Mörtel und Klebstoffe für Fliesen und Platten – Bestimmung der Haftfestigkeit von Dispersionsklebstoffen (ersetzt durch DIN EN 12004-2, Ausgabe 2017-05)
DIN EN 12004:2007-11	Mörtel und Klebstoffe für Fliesen und Platten – Anforderungen, Konformitätsbewertung, Klassifizierung und Bezeichnung
DIN EN 12004/A1:2012-01	Mörtel und Klebstoffe für Fliesen und Platten – Anforderungen, Konformitätsbewertung, Klassifizierung und Bezeichnung
DIN EN 13139:2013-07	Gesteinskörnungen für Mörtel
DIN EN 13919:2002-03	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Beständigkeit gegen Alterung durch SO ₂ - und Feuchteinwirkung (ersatzlos zurückgezogen)
DIN EN 14205:2004-02	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Härte nach Knoop (ersatzlos zurückgezogen)

Ausgewählte Arbeitsblätter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege

Anorganische Bindemittel. Zement, Kalk, Gips

Außenputze

Befundbericht

Befunduntersuchung in profanen Baudenkmalern

Bibliographie: Alte Merkblätter des Landesamtes. Arbeitshefte des Landesamtes.

Bohrwiderstandsmessung

Buntmetalle

Charta von Florenz

Charta von Lausanne

Charta von Venedig

Charta von Vigoni

Charta von Washington

Dehnmessstreifen

Dendrochronologie: Einführung (1); Beschaffung von Proben (2).

Denkmäler aus Metall

Endoskopie

Ensembles

Entsalzung

Ersatzstoffe in der Denkmalpflege
 Fachwerkfreilegung
 Friedhöfe: Einführung (1); Grab und Grabmal (2); Denkmalschutz (3); Erfassung (4).
 Grabdenkmäler
 Grundsätze der Denkmalpflege: Instandhaltung, Instandsetzung, Sanierung (1); Konservierung, Restaurierung, Renovierung (2); Ergänzung, Rekonstruktion, Wiederaufbau (3); Archäologische Denkmalpflege (4).
 Grundsätze der Inventarisierung
 Hydrophobierung
 Kalkfarben
 Kupfergalvanoplastik
 Lüftung in Altbauten
 Mineralfarben
 Mineralische Außenputze: Einführung (1); Denkmalpflegerische Anforderungen (2)
 Natursteinfassaden
 Natursteinreinigung 1;2
 Naturwerksteine
 Orientierungssysteme: Allgemeines (1); Historische Wohngebäude und vergleichbare Bauten (2)
 Paläo-Ethnobotanik: Einführung (1); Durchführung paläoethnobot. Untersuchungen (2); Probenentnahme und Datierung (3).
 Fotoarchivierung
 Fotodokumentation: Anforderungen und Grundsätze (1); Dokumentationsauftrag (2); Dokumentations- und Speichermedien Foto CD (3).
 Fotografie in der Denkmalpflege: Aufgaben und Kriterien (1); Hinweise für die Aufnahmepraxis (2); Ausrüstung und Materialien (3).
 Probenahme bei Trockenlegungsmaßnahmen
 Putzergänzung
 Raumbuch
 Reinigung und Pflege von Bronzedenkmälern.
 Reparatur von Treppen
 Salzanalysen mit dem Röntgen-Diffraktometer.
 Standsicherheitsnachweis: Einführung (1); Vorgehen (2).
 Statisch-konstruktive Fragen, Diverse Gutachten zu diesem Thema
 Steinfestigung mit Kieselsäureester
 Tragwerksgutachten
 Ultraschall Untersuchungen
 Verpressen von Mauerwerk

Ausgewählte WTA-Merkblätter

(<http://wta-international.org/schriften/wta-merkblaetter/kurzfassungen-und-inhaltsverzeichnis/>)

Referat 2 – Oberflächentechnologie

WTA-Merkblatt 2-4-14/D	Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden (überarbeitete Fassung vom August 2014)
WTA-Merkblatt 2-7-01/D	WTA-Merkblatt 2-5-97/D Anti-Graffiti-Systeme
WTA-Merkblatt 2-8-04/D	Kalkputze in der Denkmalpflege
WTA-Merkblatt 2-9-04/D	Bewertung der Wirksamkeit von Anti-Graffiti-Systemen
WTA-Merkblatt E-2-9-18/D	Sanierputzsysteme
	Sanierputzsysteme (überarbeitete Fassung vom Juni 2018)
WTA-Merkblatt 2-10-06/D	Opferputze
WTA-Merkblatt 2-11-18/D	Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden (überarbeitete Fassung vom August 2018)
WTA-Merkblatt 2-12-13/D	Fassadenanstriche für mineralische Untergründe in der Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege
WTA-Merkblatt 2-13-15/D	Wärmedämm-Verbundsysteme – Wartung, Instandsetzung, Verbesserung
WTA-Merkblatt E-2-14-18/D	Funktionsputze

Referat 3 – Naturstein und Kunststein

WTA-Merkblatt 3-5-98/D	Natursteinrestauration nach WTA I: Reinigung
WTA-Merkblatt 3-7-95/D	Natursteinrestauration nach WTA V: Herstellen von Kopien durch Abformen.
WTA-Merkblatt 3-8-98/D	Natursteinrestauration nach WTA II: Handwerklicher Steinaustausch.
WTA-Merkblatt 3-9-95/D	Natursteinrestauration nach WTA XI: Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen
WTA-Merkblatt 3-10-97/D	Natursteinrestauration nach WTA XII: Zustands- und Materialkataster für Natursteinbauwerke
WTA-Merkblatt 3-11-97/D	Natursteinrestauration nach WTA III: Steiner Ergänzung mit Restauriermörteln/Steinersatzstoffen (ersetzt Merkblatt 3-6-93/D)
WTA-Merkblatt 3-12-16/D	Natursteinrestauration: Fugensanierung
WTA-Merkblatt E 3-13-01/D	Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen
WTA-Merkblatt E-3-13-18	Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen
WTA-Merkblatt 3-15-14/D	Instandsetzen von Orterrazzo
WTA-Merkblatt 3-16-09/D	Kunststeinrestauration
WTA Merkblatt 3-17-10	Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen

WTA-Merkblatt 3-18-14/D
WTA-Merkblatt 3-19-16/D

Monitoring von Bauten und Denkmalen aus Naturstein
Instandsetzung von Natursteinbelägen im Innenbereich

Referat 4 – Bauwerksabdichtung

WTA-Merkblatt 4-3-98/D

Instandsetzen von Mauerwerk – Standsicherheit/Tragfähigkeit (Merkblatt zurückgezogen, ersetzt durch 7-1-18)

WTA-Merkblatt 4-5-99/D

Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik

WTA-Merkblatt 4-6-14/D

Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile

WTA-Merkblatt 4-7-15/D

Nachträgliche Mechanische Horizontalsperren

WTA-Merkblatt E-4-9-18/D

Instandsetzen von Gebäude- und Bauteilsockeln

WTA-Merkblatt 4-10-15/D

Injektionsverfahren mit zertifizierten Injektionsstoffen gegen kapillaren Feuchtetransport (ersetzt 4-4-04/D)

WTA-Merkblatt 4-11-16/D

Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte von mineralischen Baustoffen

WTA-Merkblatt 4-12-16/D

Ziele und Kontrolle von Schimmelpilzschadensanierungen in Innenräumen

Referat 5 – Beton

WTA-Merkblatt 5-1-99/D

Wartung von Betonbauwerken: Musterwartungsvertrag

WTA-Merkblatt 5-6-99/D

Bauwerksdiagnose

WTA-Merkblatt 5-7-99/D

Prüfen und Warten von Betonbauwerken

WTA-Merkblatt 5-15-03/D

Schutz und Instandsetzung von Beton: Leistungsbeschreibung

WTA-Merkblatt 5-20-09/D

Gelinjektionen

WTA-Merkblatt 5-21-09/D

Gebundene Bauweise – Historisches Pflaster

WTA-Merkblatt 5-24-15/CH

Überwachung der Qualität von Frischbeton in der Schweiz

Referat 6 – Bauphysik

WTA-Merkblatt 6-1-01/D

Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen

WTA-Merkblatt 6-2-14/D

Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse (Überarbeitung)

WTA-Merkblatt 6-3-05/D

Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos

WTA-Merkblatt 6-4-16/D

Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden (überarb. Fassung vom Oktober 2016)

WTA-Merkblatt 6-5-14/D

Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämm-systemen mittels numerischer Berechnungsverfahren

WTA-Merkblatt 6-8-16/D

Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation

WTA-Merkblatt 6-9-15/D

Luftdichtheit im Bestand, Teil 1: Grundlagen und Planung

WTA-Merkblatt 6-10-15/D

Luftdichtheit im Bestand, Teil 2: Detailplanung und Ausführung

WTA-Merkblatt 6-11-15/D

Luftdichtheit im Bestand, Teil 3: Messung der Luftdichte

WTA-Merkblatt 6-12-11/D

Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken I: Einführung

WTA-Merkblatt 6-15-13/D	Technische Trocknung an durchfeuchteten Bauteilen, Teil 1: Grundlagen
WTA-Merkblatt E-6-16-17/D	Technische Trocknung an durchfeuchteten Bauteilen, Teil 2: Planung, Ausführung und Kontrolle

Referat 7 – Tragverhalten und Schadensdiagnostik

WTA-Merkblatt 7-1-18/D	Erhaltung und Instandsetzung von Mauerwerk – Konstruktion und Tragfähigkeit (ersetzt das Merkblattes 4-3-98/D)
------------------------	--

Referat 8 – Fachwerk und Holzkonstruktionen

WTA-Merkblatt 8-4-15/D	Fachwerkinstandsetzung nach WTA IV – Außenbekleidungen (überarbeitete Fassung vom April 2015)
WTA-Merkblatt 8-6-09/D	Fachwerkinstandsetzung nach WTA VI – Beschichtungen auf Fachwerkwänden – Ausfachungen/Putze

Sachregister

3-D

3-D-Laserscan 147
3-D-Techniken 141

A

Ablagerung 190
Abnahme 381, 407
Abrechnungseinheit 357, 358
Abreißfestigkeit 234
Absanden 185, 390
Abzugfestigkeit 171, 211
Acrylharz 206, 223, 232
Acrylharzvolltränkung 401
Albumin 223, 242, 244, 250
Alge 277
Ammoniumcarbonat 256
Ammoniumsulfat 257
Analyse, chemische 131, 198, 249
Anionen 169, 191
Ansichtsfläche, zweidimensionale 361
Anstrich, diffusionsdichter 259
Applikationsgerät 305
Applikationsmethode 306
Applikationszeit 269
Arbeitsbericht 373
Archiv 101, 105, 407
Archivarbeit 105
Archivforschung 105
Armierung 316, 371
Aufmaß 139
– verformungsgerechtes 121, 139
Auftragsmenge 269
Ausgleichsfeuchte 170, 307
Ausschreibung 352, 362, 368
Austausch 120, 272, 297

B

Balkenplan 88, 369
Bariumsulfat 257
Barytwasser 257
Bauforschung 138
Baugrund 121, 129
Behandlung, biozide 278
Beschichtung, permanente 328

Besiedlung, biologische 174, 255
Bestandskartierung 391
Biegezugfestigkeit, biaxiale 171, 211, 215, 392
Bindemittel 222, 243
Biofilm 174
Bleiwolle 326
Bohrhärte 392
Bohrhärteprofil 172, 211, 334, 392
Bohrwiderstand 172, 208, 211, 392
Bohrwiderstandsmessung 172, 211
Bruchverformung 238
Brushit 256
B-Wert 209, 274

D

DBU-Projekt Monitoring 387
Dehnung
– hygrische 271
– thermische und hygrische 228, 239
Denkmalpflege 92, 197, 259, 272, 401
Deposition 189
Diamantbohrer 172, 392
Digitales Dombauarchiv 100
Dilatation, hygrische 210
Dokumentation 91, 167, 294, 297, 308, 311, 318, 320, 322, 323, 373, 386
Dokumentationssystem 165
Dolomitmalkmörtel 224
Dosis-Wirkungs-Beziehung 192
Drainage 124, 132
Druck 115
Druckbelastung 116
Druckfestigkeit 222, 226, 233, 242, 244, 274
Druckumlagerung 120
Dübel 116, 298, 325

E

Eindringkoeffizient 270
Eindringtiefe 209, 268, 334
Einfärbung 233
E-Modul 212, 228, 238, 244, 274
– dynamischer 226, 228, 233
Entsalzung 300
Epoxidharz 223, 232

Ergänzung 230, 317, 356, 359
 Erhärtungsschwinden 227

F

Fachbeirat 86
 Farbanstrich 252, 320, 337, 372
 Farbfassung 248
 Farblasur 318
 Farbmessung 255, 330
 Farbschicht, ölgebundene 258
 Farbsystem
 – filmbildendes 247
 – nicht filmbildendes 247
 Feinstaub 190
 Festigkeitsmessung 171, 245
 Festigung 205, 305, 333, 358, 370, 391
 Festigungsmittel 205
 Feuchte, aufsteigende 129, 168
 Feuchtedehnkoeffizient 226, 233
 Feuchtettransport 167
 Feuchtkruste 173
 Finanzplan 182, 352
 Flankenabriss 220, 227
 Flechte 277, 322
 Fuge 163, 220, 309, 359
 Fugendeckmörtel 222, 310, 335
 Fugeninstandsetzung 311, 371
 Fugenmörtel 220, 225, 309, 335
 Fugenschaden 163

G

Gefüge 273
 Geschwindigkeitsplan 88
 Gewährleistung 354
 Gips 223, 256
 Graffiti 328
 Grenzwert für Spannung und
 Verformung 215, 217
 Größtkorn 226, 243
 Grundierung 252, 258
 Grundwasser 130

H

Haftzugfestigkeit 208, 226, 228, 233,
 234, 246, 336, 390
 Handaufmaß 140
 HERICARE 377, 408

Hook'sches Gesetz 238
 Hydrogeologie 129
 Hydrophobierung 261, 322, 323, 338, 372,
 393
 Hydrophobierungsmittel 261

I

Inlay 317
 Ionenaustauscher 199

K

Kalk 231, 243
 – hochhydraulischer 223
 – hydraulischer 223
 Kalkfarbe 247, 256, 260
 Kalksteinkonservierung 266
 Karsten-Messung 394
 Kartierung 137, 156, 163, 176, 341
 Kationen 169, 191, 265
 Kieselgel 223
 kieselgel-gebunden 231
 Kieselsäureester 206, 370
 Kieselzol 206
 Klimamessung 185
 Kompreße 262, 300
 Konservierungsmittel 205
 Kostenplan 89, 288, 352, 382
 Kunststoffdispersion 225, 234, 265
 Künzel-Zahl 210, 254

L

Längenänderung, hygrische 208, 267, 271
 Langzeitmonitoring 387
 Laserreinigung 201, 296
 Lastumlagerung 120, 123
 Leistung, besondere 356
 Leistungsbeschreibung 353, 356
 Leistungsverzeichnis 352, 356
 Löschte 252
 Luftkalk 223
 Luftporenbildner 225, 228
 Luftporengehalt 242
 Luftschadstoff 190

M

Mangel 381
 Maßnahmenplan 289, 341

Materialliste 341
 Mauerfuß 122, 124
 Mauerkrone 122, 123, 124
 Mauersockel 124
 Mauerwerksfeuchte 168
 Mengeneinheit 357
 Mikroemulsion 262
 Mikroorganismus 174, 276, 277
 Mikro-Partikelstrahl 200
 »MonArch«-Archivsystem 100
 Monitoring 385, 387, 397
 Moos 277
 Mörtelkartierung 163
 Musterfläche 287, 293, 329, 351

N

Nachbesserung 381
 Nachkontrolle 346, 373, 381, 385, 407
 Nanokalk 206
 Natursteinaustausch 272, 297
 Natursteinfestigung 206, 308
 Natursteinreinigung 297, 330
 Natursteinschaden 156
 Nebenleistung 356
 Neuteil 297, 299, 359
 Nitrifikant 276

O

Oberfläche, dreidimensionale 360
 Oberflächenbearbeitung 152, 298
 Oberflächenrauheit 330, 331
 Oberflächentemperatur 186
 Objektarchiv 407
 Objektidentifikation 97
 Opferputz 241, 302
 Orientierungssystem 99
 Originalmörtel 221

P

Partikelstrahl 200
 Photogrammetrie 98, 140
 Pigment 202, 225, 233
 Polychromie 256
 Polyurethan 206
 Porenradienverteilungsklasse 274
 Porositätsklasse 274
 Positionsnummer 100

Pressfuge 229, 310
 Probefläche 351
 Probenanzahl 279
 Probendokumentation 165
 Probendokumentationssystem 165
 Probenpräparation 227, 234, 242, 252, 268
 Projektant 92, 351, 368
 Projektarchiv 100
 Projektleitung 83
 Projektstrukturierung 93
 Projektverfolgung 88
 Prüfpflicht 357
 Putz 239, 320, 337, 360, 372

R

Regenschutz, konstruktiver 324
 Reinigung 197, 294, 330, 358, 369
 Relief 159
 Restauriermörtel 230, 317, 371
 Riss 115, 359
 Rissempfindlichkeit 238
 Romanzement 224
 Rucksacklaser 201
 Rückwitterung 159

S

Salzbestimmung 169
 Salzprofil 301, 305, 330
 Sand 225
 Sandstein 264, 273, 332
 Sanierputz 240
 Saugfähigkeit 123, 244, 253, 269
 – kapillare 123, 198
 Schadensdiagnose 167
 Schadensform 157
 Schadenskartierung 155, 156, 162, 164
 Schadstoffimmission 188
 Schadstoffmessung 188, 191
 Schälwiderstand 390
 Schlämme 239, 320, 337, 360, 372
 Schmutzkruste 173, 197
 Schnittzeichnung 147
 Schutzbeschichtung, nicht perma-
 nente 328
 s_d-Wert 252
 Siebabstufung 232
 Sieblinie 226, 232

Silikatfarbe 247
 – reine 260
 Silikatkreide 248
 Silikonharzemulsionsfarbe 247, 265
 Sorptionsfeuchte 168, 170
 Sorptionsisotherme 170, 171
 Spannung und Verformung 215, 235
 Spreizdübel 325
 Stauchung 120
 Steinerergänzung 371
 Steinersatzmasse 230, 336
 Steinersatzstoff 223, 230, 316, 336, 371
 Steinfestiger 209, 308
 Steinschutzstoff 306
 s-Wert 274

T

Taupunkttemperatur 186, 187
 Taupunktunterschreitung 185
 Teilhydrophobierung 263
 Tempera 250
 Trockenkruste 173
 Trocknung 254
 Trocknungsgeschwindigkeit 244, 323

U

Ultraschallgeschwindigkeit 208, 392
 Ultraschallmessung 172, 211, 389
 Untersuchung, mikrobiologische 277, 340

V

Vakuumtrocknung 309
 Verbunddübel 327
 Verdingungsordnungen für Bauleistungen (VOB) 354
 Verdübelung 298, 359
 Verfärbung 332
 Verformung, spezifische 217, 238
 Vergabe 362, 367
 Vergabeprüfstelle 409
 Versalzung 302
 Versetzmörtel 222
 Vertikalisolierung 124, 133
 Verträglichkeit 244, 273
 Vierung 297, 299, 359

VOB

– Teil A 352, 362
 – Teil B 354, 381, 407
 Volltränkung 308
 Vorfestigung 198, 304, 371
 Vorspannung 117, 119, 298
 Vortext 356

W

Wärmedämmputz 240, 241
 Wärmedehnkoeffizient 226, 233
 Wartungsvertrag 382
 Wasseraufnahme 330
 Wasseraufnahmekoeffizient 208, 226, 233, 242, 245, 254, 267, 270
 Wasserdampfdiffusion 198, 330
 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 208, 210, 226, 233, 242, 254, 267, 271, 274
 Wasserdampfsorption 168
 Wassereindringkoeffizient 208, 254, 267
 Wiederbehandlung 385, 390, 394
 w-Wert 123, 209, 227, 253, 330, 339
 w-Wert-Bestimmung 394
 w-Wert-Klasse 274

Z

Zeitplan 369, 397
 Zement 223, 231, 243
 Zusatzmittel 245
 Zusatz, organischer 225, 244
 Zuschlagstoff 232
 Zwängung 121

Inhaltsübersicht

Erläuterungen zu den fachlichen Grundlagen der Natursteinkonservierung 13

E1	Genese und Eigenschaften von Gesteinen	15
E2	Marmor – Eigenschaften und Verwitterung	31
E3	Konservierungsmittel und Konservierungsmethoden – kleine Einführung in die chemischen Grundlagen	41
E4	Risikoziffer – Umweltschäden an Skulpturen aus Marmor und Sandstein erfassen und objektiv bewerten	71

Leitfaden Steinkonservierung 79

Detaillierte Inhaltsverzeichnisse finden Sie am Anfang eines jeden Kapitels mit einer Zuordnung der Maßnahmen und Untersuchungen in die Kategorien

*** unverzichtbare ** meist erforderliche * optionale Untersuchung oder Maßnahme.

1	Erste Sitzung der Projektleitung	81
2	Objektidentifikation.....	95
3	Archivarbeiten	103
4	Mauerwerk und Statik	113
5	Hydrogeologie.....	127
6	Bestandsaufnahme	135
7	Zweite Sitzung der Projektleitung	179
8	Klima- und Schadstoffmessungen	183
9	Methoden und Laboruntersuchungen zur Konservierung	193
10	Dritte Sitzung der Projektleitung	285
11	Bearbeitung der Musterfläche (Probefläche)	291
12	Vierte Sitzung der Projektleitung	349
13	Begleitung und Ausführung der Maßnahmen	365
14	Fünfte Sitzung der Projektleitung	379
15	Nachkontrolle, Monitoring und Wiederbehandlung	383
16	Sonderverfahren Acrylharzvolltränkung (AVT).....	399
17	Sechste Sitzung (Abschlusssitzung) der Projektleitung	405
	Anhang.....	411



Rolf Snethlage, studierte Geologie und Mineralogie an der Universität München, promovierte 1974 zum Dr. rer. nat. und habilitierte sich dort 1983 mit einer Arbeit über Sandsteinkonservierung. 1990 erfolgte die Ernennung zum apl. Professor für angewandte Mineralogie. Ab 1977 war er Mitarbeiter des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege in München und leitete das physikalisch-chemische Zentrallabor bis zu seiner Pensionierung im Jahr 2009. Im universitären Bereich lehrte er an der LMU und der TUM München sowie an der Universität Bamberg und betreute zahlreiche Diplom- und Doktorarbeiten im Bereich Steinkonservierung. Er hat zahlreiche Publikationen verfasst und nationale sowie internationale Forschungsprojekte geleitet. Nach wie vor ist er als fachlicher Berater in Forschungsprojekten und in der Steinkonservierung aktiv.



Michael Pfanner, geb. 1955, studierte Klassische Archäologie an den Universitäten München, Bern und Bonn. Er schloss 1980 mit der Promotion zum Titusbogen als Dr. phil. ab. Es folgten Studium der Architektur mit Abschluss als Dipl.-Ing., Ausbildung zum Steinbildhauer und wissenschaftliche Assistenz an der LMU München. Seit 1990 führt er in Scheffau/Allgäu und in München eine Restaurierungsfirma. 2005 wurde er zum Honorarprofessor der Universität Leipzig ernannt. Er ist Mitglied im Verband der Restauratoren, leitete Ausgrabungen im In- und Ausland und veröffentlichte viele Studien zu antiken und aktuellen Architektur-, Bildhauer- und Restaurierungsfragen.

Rolf Snethlage | Michael Pfanner

Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen
zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein

5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Bauwerke aus Naturstein zu erhalten ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Objekteigentümer, Architekten, Denkmalpfleger, Restauratoren und Naturwissenschaftler müssen sie interdisziplinär lösen. Der Leitfaden führt durch die praktische Abwicklung eines Projekts der Steinkonservierung mit den erforderlichen Qualitätsprüfungen.

An einem Musterablauf, der alle denkbaren Fragestellungen umfasst, beschreiben die Autoren die Entscheidungsfindung, Maßnahmenplanung, Ausführung und Nachkontrolle. Der Praktiker kann daraus ein »Idealprogramm« zusammenstellen, das auf die individuellen Bedürfnisse seines Objekts ausgerichtet ist.

Jedem Kapitel des Buchs ist eine Auswahlhilfe vorangestellt. Anhand festgelegter Kategorien (**unverzichtbare, **meist erforderliche oder *optionale Untersuchung/Maßnahme) sind Prioritäten eindeutig ablesbar.

Für Quereinsteiger und Nicht-Fachleute enthält die neue Auflage dieses Standardwerks eine Einführung in die Grundlagen der Natursteinkonservierung. Der Leser kann sich wie in einem Kurzlehrbuch informieren über die

- Genese und Eigenschaften von Gesteinen,
- Eigenschaften und Verwitterung von Marmor,
- chemischen Grundlagen von Konservierungsmitteln und Konservierungsmethoden.

Neu ist auch das Kapitel zur Risikoziffer, die eine objektive Bewertung von Analyseergebnissen an Natursteinen ermöglicht.

Der Leitfaden richtet sich an alle, die beruflich mit Steinrestaurierung und Konservierung zu tun haben, und nicht zuletzt an Eigentümer von Natursteinbauwerken, Ämter und Denkmalbehörden.

ISBN 978-3-7388-0307-5

