

naturstein saniierung stuttgart 2015

Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen

13. März 2015

Fraunhofer IRB Verlag

Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert (Hrsg.)

Natursteinsanierung Stuttgart 2015

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen
sowie Sanierungsbeispiele**

Tagung am 13. März 2015 in Stuttgart

Herausgeber

Dr.-Ing. Gabriele Patitz

Ingenieurbüro IGP für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe
Telefon: (0721) 3 84 41 98
Telefax: (0721) 3 84 41 99
Email: mail@gabrielepatitz.de
www.gabrielepatitz.de

Prof. Dr. Gabriele Grassegger

Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart
Fak. Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft
Labor für Bauchemie „Denkmalerhaltung,
Altbauerhaltung (Conservation Sciences)“
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

mit Unterstützung des

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

Satz und Layout

Manuela Gantner – punkt, STRICH – Karlsruhe

Druck und Bindung

AZ Druck und Datentechnik GmbH – Kempten

Einband

Foto: Maulbronn, Dreischalenbrunnen – Dirk Altenkirch, Karlsruhe

Bauaufnahme: Maulbronn, Innere Klausur, Ausschnitt – strebewerk. Schöbel Riegler Läpple, Stuttgart

1. Auflage

2015 Fraunhofer IRB Verlag,
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

ISBN (Print): 978-3-8167-9404-2

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9405-9

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 von Frau Prof. Dr. Grassegger und Frau Dr. Patitz unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Warenbezeichnungen, Handels- oder Gebrauchsnamen sind nicht als frei im Sinne der Markenschutz- und Warenzeichengesetze zu betrachten. Dies gilt auch dann, wenn sie nicht eigens als geschützte Bezeichnungen gekennzeichnet sind.

Für den Inhalt der Beiträge und die Rechte an den verwendeten Abbildungen sind die Autoren verantwortlich.

Liebe Teilnehmerinnen und Teilnehmer, liebe Leserinnen und Leser,

in langjähriger Tradition begrüßen wir Sie ganz herzlich zur Fachtagung Natursteinsanierung und wünschen Ihnen einen erfolgreichen interdisziplinären Austausch und viele neue Anregungen für Ihre Arbeit in der Forschung und Praxis.

Auch bei der 21. Tagung gehören zum Kreis der Teilnehmer neben Denkmalpflegern, Restauratoren, Architekten und Ingenieuren ausführende Firmen sowie Kollegen aus der Forschung und Lehre. Die Vorträge und weiterführenden Informationen finden Sie in dem vorliegenden Tagungsband. In Ergänzung dazu haben Sie an der HFT Stuttgart die Möglichkeit, sich an Firmenständen über neue und altbewährte Produkte und Arbeitsmaterialien zu informieren, Kontakte zu knüpfen und Erfahrungen auszutauschen. Fachliteratur bieten Ihnen die Informationsstände des Fraunhofer IRB Verlages und der Stand des Landesdenkmalamtes Esslingen.

Die diesjährige Exkursion führt uns zum UNESCO Weltkulturerbe Kloster Maulbronn und wurde vom Projektleiter Herrn Probst, Vermögen und Bau Baden-Württemberg Amt Pforzheim, vorbereitet. Die am Kloster tätigen Büros und Fachfirmen stellen ihre Arbeiten zu aktuellen Methoden der Natursteinkonservierung und Restaurierung vor.

Zur Tagung in Stuttgart werden neben Möglichkeiten und Grenzen zerstörungsfreier Voruntersuchungen die Sanierungsarbeiten von Nordturm und Mittelbau der Basilika in Weingarten präsentiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf den heimischen Natursteinen am Bauwerk. Diese werden nicht nur vorgestellt, sondern Sie können auch aktuelle Bezugsmöglichkeiten im Tagungsband finden.

Sonstige Themen sind z.B. die Restaurierung eines Baldachingrabmals aus Alabaster und die anspruchsvolle Notsicherung eines Portals aus Natursteinen unter laufendem Bahnverkehr. Praxisrelevant sind die Anwendung von Feuchtekennwerten zur Beurteilung von Natursteinoberflächen sowie eine vergleichende Bewertung von Hydrophobie an Natursteinoberflächen.

Mit den ausgewählten Themenschwerpunkten und Informationsständen wollen wir Ihnen zwei spannende und anregende Tage bieten.

Wir wünschen Ihnen einen interessanten fachlichen Austausch und viele neue Anregungen und Ideen für Ihren Alltag!

Gabriele Patitz

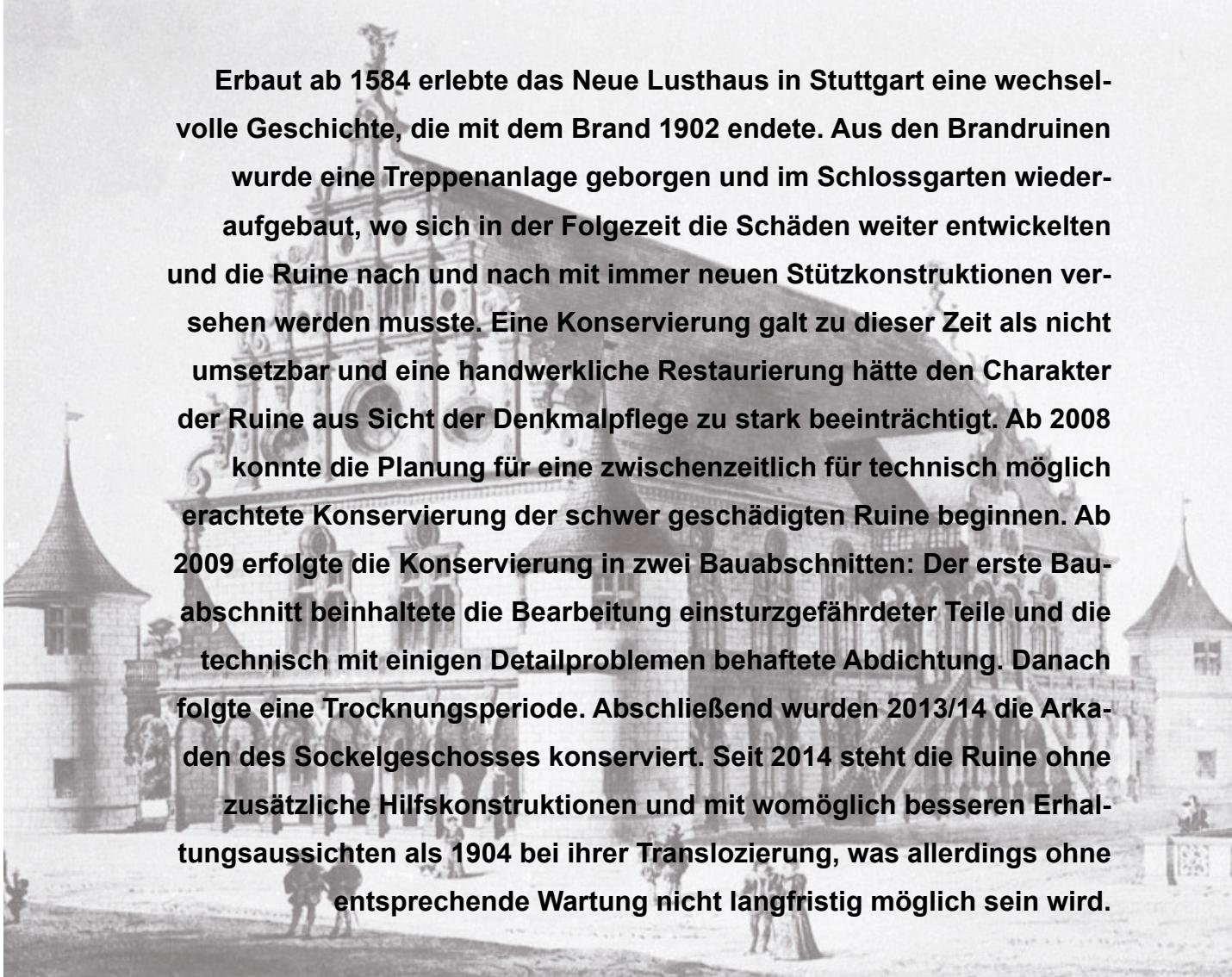
Gabriele Grassegger

Otto Wölbert

Albert Kieferle	Lusthausrune Stuttgart:	7
Thomas Kreißl	Grenzen der Konservierung von Ruinen	
Holger Probst	Aktuelle Naturstein- und Steinkonservierungsarbeiten	19
	im Kloster Maulbronn	
Stefan Schädel	Die Sanierung von Nordturm und Mittelbau	33
Hermann Zettler	der Basilika Weingarten	
Walter Kreisl		
Daniele Coiro		
Gabriele Grassegger		
Till Läpple		
Friedrich Grüner	Das Baldachingrab des Grafen Ludwig III von Löwenstein	43
Frank Eger	aus Alabaster in Wertheim –	
	Problemlösungen zur Restaurierung der Grabanlage	
Wolfgang Werner	Heimischer Naturwerkstein für heimische Bauwerke	67
Andreas Hasenstab	Zerstörungsfreie Prüfung von Naturstein –	79
	Möglichkeiten und Grenzen	
Sarah Hutt	Tragvermögen von Sandstein –	89
Gerhard Eisele	Messung mittels Ultraschalltransmission?	
Martin Krause		
Christoph Herm	Anwendung der Feuchtekennwerte zur Beurteilung	99
	von Natursteinoberflächen	
Georg Hilbert	Hydrophobie an Natursteinoberflächen – Fluch oder Segen?	109
Axel Dominik	Notsicherung des nördlichen Natursteinportals des Kaiser-	117
Sabine Koch	Wilhelm-Tunnels in Cochem unter laufendem Bahnverkehr	
Martin Ehlers	Ein Bilderbuch der Geschichte und Geographie:	125
	Steinabbau in Maulbronn	
	Autorenverzeichnis	134

Lusthausruine Stuttgart: Grenzen der Konservierung von Ruinen

von Albert Kieferle, Thomas Kreißl



Erbaut ab 1584 erlebte das Neue Lusthaus in Stuttgart eine wechselvolle Geschichte, die mit dem Brand 1902 endete. Aus den Brandruinen wurde eine Treppenanlage geborgen und im Schlossgarten wieder aufgebaut, wo sich in der Folgezeit die Schäden weiter entwickelten und die Ruine nach und nach mit immer neuen Stützkonstruktionen versehen werden musste. Eine Konservierung galt zu dieser Zeit als nicht umsetzbar und eine handwerkliche Restaurierung hätte den Charakter der Ruine aus Sicht der Denkmalpflege zu stark beeinträchtigt. Ab 2008 konnte die Planung für eine zwischenzeitlich für technisch möglich erachtete Konservierung der schwer geschädigten Ruine beginnen. Ab 2009 erfolgte die Konservierung in zwei Bauabschnitten: Der erste Bauabschnitt beinhaltete die Bearbeitung einsturzgefährdeter Teile und die technisch mit einigen Detailproblemen behaftete Abdichtung. Danach folgte eine Trocknungsperiode. Abschließend wurden 2013/14 die Arkaden des Sockelgeschosses konserviert. Seit 2014 steht die Ruine ohne zusätzliche Hilfskonstruktionen und mit womöglich besseren Erhaltungsaussichten als 1904 bei ihrer Translozierung, was allerdings ohne entsprechende Wartung nicht langfristig möglich sein wird.

1 Baugeschichte

Das sog. Neue Lusthaus wurde zwischen 1584 und 1593 von Georg Beer im Auftrag des Herzogs Ludwig an der Stelle errichtet, an der heute das Kunstgebäude steht. Erhalten ist nur noch ein Treppenaufgang an anderer Stelle.

Der Hallenbau war aus einem gewölbeüberspannten Erdgeschoss mit drei Wasserbassins gebildet, die von Balustraden umgeben waren, worüber sich ein Saalbau mit hölzernem Tonnengewölbe erhob. Dem Saalbau war außen ein Umgang mit Balustrade vorgelagert, zu dem an den Langseiten zweiläufige Treppeanlagen hinaufführten. Die Gebäudecken wurden durch niedrige Türmchen markiert. Das Bauwerk war mit einer sehr großen Zahl an figürlichen Darstellungen und Ornamenten verziert. Das neue Lusthaus war Teil der sehr ambitionierten Schlossgartenanlage, zu der auch das erste Pommeranzenhaus nördlich der Alpen gehörte. Natürlich war die im ausgehenden 16. Jahrhundert moderne Formensprache gewählt worden, was das Neue Lusthaus zu einem der bemerkenswertesten und seinerzeit auch berühmtesten Renaissancebauwerke des deutschsprachigen Raums machte. Der Anspruch drückte sich auch in den Abmessungen von 200 Fuß Länge, 70 Fuß Breite und 50 Fuß Scheitelhöhe des Gewölbes aus, die es wohl zum größten Gebäude dieses Bautyps machten. Damit maß die Spannweite des Gewölbes stattliche 30 Meter.

Die Ausstattung hielt diesem Anspruch stand. Das Gewölbe des Obergeschoss-Saals war mit biblischen Darstellungen beginnend mit der Erschaffung der Welt bis zum Jüngsten Gericht bemalt. Über der Kämpferlinie waren Jagdszenen dargestellt. Die Säulen zwischen den Fensteröffnungen zierten kartographische Darstellungen Württembergischer Besitzungen.

Das fürstliche Lusthaus diente als Veranstaltungsgebäude für die unterschiedlichsten Anlässe. Im

Vordergrund standen offizielle Anlässe des Fürstenhauses – Taufen, Hochzeiten usw. Schon zu Anfang wurde es auch für informelle Veranstaltungen, Feste und Theaterspiele genutzt.

2 Umbaugeschichte

Die Nutzung als Theater und für die im 18. Jahrhundert beliebt werdenden Opern scheint in den Vordergrund gerückt zu sein. Die folgende Baugeschichte zitieren wir aus der Sicht des frühen 20. Jahrhunderts (LAMBERT):

„Unter der Regierung Herzog Karl Eugens, in den Jahren 1752 bis 1759, verwandelte es der französische Baumeister Philippe de la Guépiere in ein Opernhaus. Es wird de la Guépiere zur Last gelegt, dass bei dieser Gelegenheit die kostbaren Alabaster-Säulen zerstört wurden. Aber auch die Gemälde von Wendel Dietterlein, sowie die imposante Raumwirkung des eigentlichen Festsaales im oberen Stockwerke werden damals geopfert worden sein, und dies ist trotz aller Bedeutung des Philippe de la Guépiere als Künstler, bedauerlich, denn damit war bereits der erste Schritt zur Zerstörung getan. Die äußere Erscheinung blieb so ziemlich unverändert und das Lusthaus konnte weiter ein ganzes Jahrhundert lang durch seine malerische Silhouette, die Macht seines Hauptdaches und die reiche Formensprache seiner Dekoration das Auge der Zeitgenossen entzücken. – Im Jahre 1846 jedoch, unter der Regierung König Wilhelms I scheint man diese lebendige Geschichtslehre satt bekommen oder sie wenigstens nicht hoch genug geschätzt zu haben, um zu ihrer Erhaltung ein kleines Geldopfer bringen zu wollen. Da ferner auch der alte, von de la Guépiere erbaute Saal den Anforderungen nicht mehr genügte, so opferte man auch das



Abb. 1 Matthäus Merian: Fürstlicher Lustgarten zu Stuttgart, 1616

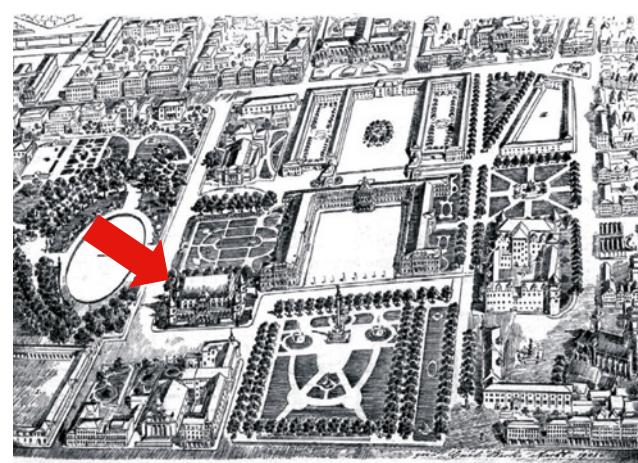


Abb. 2 Lage des Neuen Lusthauses (entnommen K. Beck)

Aeussere des Lusthauses und zwar in der Weise, dass alles was im Weg stand weggeräumt und das übrige mit einer formlosen Umfassungswand verdeckt wurde. Bei dieser Gelegenheit kam es, dass zahlreiche historisch und künstlerisch wertvolle Fragmente, wie Portraitbüsten und Wappen, Kapitale und Kartuschen in Privathände fielen. Solche Bruchstücke trifft man noch im Schlosse Lichtenstein, im Garten der kgl. Villa in Berg, am Gartenhaus des verstorbenen Schriftstellers Hackländer, dem sogen. Heidehof, auch eingemauert in alte Weinbergmauern u. s. w. Einige Stücke wurden schliesslich bei diesem Umbau, wie bei späteren Reparaturen dem Museum für vaterländische Altertümer übergeben.“

LAMBERT beklagt wortreich die allmähliche Entwertung des architektonischen Bestands des Neuen Lusthauses durch die Umbauten. Den Todesstoß erfährt das es durch den Brand im Winter 1902. Allerdings erscheinen in der Brandruine dann seit 1845 erstmals wieder sichtbare Reste des Neuen Lusthauses:

„Trotzdem steht heute noch ein bedeutendes Bruchstück auf der Theater-Brandstätte. Gleich nach dem Brand des 19. Januar 1902, nach dem Einsturz des Daches und eines Teiles der leicht gebauten Anbauten sah man das kolossale Mittelschiff des Lusthauses mit seinen 2m starken Mauern, seinen verzierten Gesimsen und einigen dekorierten Fensterbrüstungen hervorragen. Beim späteren Abräumen der modernen Bauten kamen weitere Architekturteile zu Tag, vor allem an der Westseite der ziemlich gut erhaltene Unterbau der Freitreppe mit Arkaden und den Postamenten der oberen Säulen.“

Dieses Motiv wird in der Zeit nach dem Brand häufig publiziert. In der Öffentlichkeit wird nach dem Brand

sofort eine Diskussion geführt zwischen Befürwortern eines neuen Opernhauses und den Kämpfern für eine Rekonstruktion des Neuen Lusthauses zu der der Autor klare Stellung bezieht.

„Das Verschwinden dieses Monumentes mit seinen Portraitbüsten, seinen Wappen, seiner lebendigen Geschichte des Landes ist gerade in unserer Zeit, in der das Verständnis für den Organismus eines Baues und die Bedeutung seiner Dekoration nur wenig mehr vorhanden ist, besonders bedauerlich. Trotzdem ist der Vorschlag einer Wiederherstellung des Bauwerkes abzulehnen, denn wo würde man heutzutage die ungeheure Summe aufbringen, die nötig wäre, um ein so grosses und reiches aber unrentables Bauwerk wieder aufzuführen? Und wenn man auch eine praktische Verwendung für das Haus wüsste (man sprach von einem Altertumsmuseum, von einem Ausstellungssaal und dergleichen mehr), so müsste man sich doch die Errungenschaften der modernen Technik zu Nutze machen und dadurch unwillkürlich dem Gebäude einen andern Charakter geben. Man würde heute auch Skulptur und Malerei ganz anders behandeln, die Frische und die naive Individualität ginge auch dabei sicher verloren.“

Das Einzige, was unserer Ansicht nach praktisch durchführbar sein dürfte, wäre ein Bruchstück, aus welchem der Charakter des Ganzen erkannt werden könnte und zu welchem die Elemente in der Hauptsache noch vorhanden sind, in den königlichen Anlagen aufzustellen. Dazu würde sich gerade der westliche Treppenanbau, dessen unterer Teil noch erhalten ist, am besten eignen.“

So geschah es 1904 dann auch. Die Treppenanlage, die nun fest im öffentlichen Bewußtsein veran-

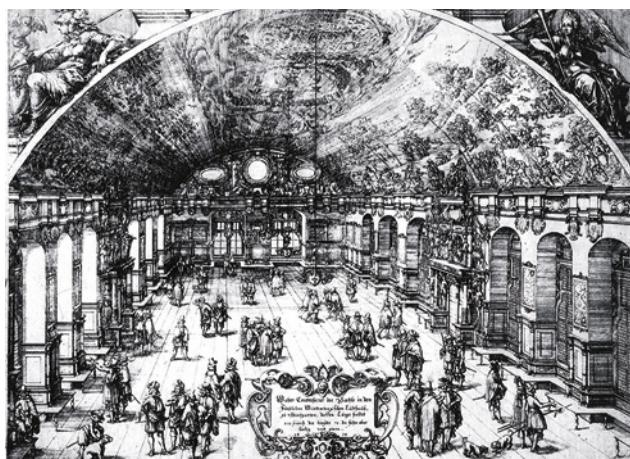


Abb. 3 Innenansicht des Saals (Friedrich Brentel 1619)



Abb. 4 Fotografie der Brandruine 1902
(Ludwig Schaller, veröffentlicht in Beck)



Abb. 5 Ansicht nach dem Wiederaufbau (NN, Postkarte von 1930)

kert ist wurde als Ruine im Schlossgarten wieder aufgestellt. Die Ruine wurde seitlich des Reitwegs, am Ufer des Nesenbachs wiederaufgebaut. Der Aufbau beschränkte sich auf die beiden Treppenläufe mit dahinterliegendem Arkadengang einschließlich dem historischen Bodenbelag, sowie den über dem Treppepodest gelegenen Arkaden, hier allerdings ohne Gewölbe. Die Ruine wurde auf ein neu hergestelltes Betonfundament aufgebaut. Die Gewölbe wurden zweilagig gemauert und über dem Arkadengang eine Betondecke quasi als Flachdach aufgesetzt. Zur Aufnahme des Gewölbeschubs – nun fehlten ja die als Widerlager fungierenden Ecktürmchen – wurde ein System aus Zugankern in der Kämpfer- und über der Scheitelhöhe der Gewölbe eingefügt.

Aufnahmen der Lusthausruine zwischen 1906 und den 1930er Jahren zeigen die Lusthausruine mit üppigem Bewuchs und einem an ihr entlangführenden Weg und Blumenrondell.

Verschwiegen hat der Autor der Schweizerischen Bauzeitung LAMBERT noch einen Umbau unter Leopoldo Retti, der nur wenige Jahre vor dem Umbau de La Guêpières, sowie einem Eingriff Thourets 1811, bei dem noch der weithin das alte Lusthaus signalisierende Giebel erneuert wurde.

Der 2008 angetroffene Zustand der Lusthausruine zeigte allerdings einige neue Zementmörtelfugen und Ergänzungen, Holzsprieße unter den Gewölben und ein die oberen Arkaden stabilisierendes Gerüst mit eingefügten Lehrgerüsten und mit Latten um die oberen Säulen herum, die verhindern sollten, dass Säulen herunterfallen.

Nachdem in den 1970er und 1980er Jahren Anläufe zu einer Restaurierung gescheitert waren, da nach damaliger Arbeitsweise sehr umfangreiche Steinerneuerungen erforderlich gewesen wären, was aber dem Charakter der Ruine aus Sicht der Denkmalpflege zuwidergegangen wäre, waren wieder und wieder neue Hilfskonstruktionen eingefügt worden. Zur Jahrtausendwende hatte dies nur noch schwer zu ertragende Formen angenommen. 2004 erfolgten Untersuchungen zur Standsicherheit, im Zuge derer auch ein mineralogisches Gutachten erstellt wurde (BfB Karlsruhe, Universität Karlsruhe). Sie kamen zum Ergebnis, dass ein Erhalt der Ruine in einem Zustand ohne das Stützgerüst nicht möglich sei.

Fast gleichzeitig hatte Professor Roland Ostertag die Lusthausruine ab 2005 wieder in die Wahrnehmung der Öffentlichkeit gebracht und war dort auf eine starke Resonanz gestoßen. Periodische War-



Abb. 6 Hilfskonstruktionen Zustand 2008



Abb. 7 Schäden an Balustradenabdeckung 2008



Abb. 8 Schäden an Postamentsadeckung 2008

tungen waren zwischenzeitlich wegen Ängsten im Hinblick auf die Sicherheit der Arbeiter nur noch sehr zögerlich durchgeführt worden, wodurch sich der visuelle Eindruck der Ruine nochmals dramatisch verschlechterte.

3 Schadensfortschritt

Im Spätjahr 2008 wurde AeDis vom Hochbauamt nach Rücksprache mit der Denkmalpflege mit der Bestandserfassung und der Ausarbeitung eines Maßnahmenkonzepts beauftragt. Die Schäden zu diesem Zeitpunkt waren dramatisch. Absanden bis hin zu Rückwitterungen waren die am wenigsten schwerwiegenden Schäden. Dramatischer waren der Umfang der Schalenbildung, Rissbildung bis hin zu Bröckelrissen und schiefernden Werkstücken.

Unklar blieb zunächst die Schadensdynamik. Klar war lediglich, dass die bröckelnden oder schiefernden Werkstücke in ihrem angetroffenen Zustand nicht hätten transportiert und versetzt werden können, sie mussten sich seit dem Aufbau der Ruine an ihrem jetzigen Standort 1903/4 gebildet haben. Die Dynamik bei der Schalenbildung und bei Schäden, die mit der Kornbindung des Steinmaterials im Zusammenhang

standen, konnten so einfach nicht eingeschätzt werden. Glücklicherweise wurde 1978 eine Photogrammetrie der Hauptansicht durch das Landesdenkmalamt aufgenommen und ausgewertet. Sie konnte als Grundlage verwendet werden, von der aus die Schadensentwicklung von Rückwitterungen, Rissen und Schalenausbrüchen verfolgt werden konnte. Risse waren in der Photogrammetrie nur in geringem Umfang eingezeichnet. Die große Dichte von Ornamenten machte es leicht, Rückwitterungen durch Konturveränderungen zu beurteilen. Diese Differenzen wurden abschließend in Plänen dargestellt. Dabei trat eine zwar hohe, aber dem Schrecken des angetroffenen Zustands zumindest im Bereich des unteren Geschosses nicht entsprechende Schadensdynamik zu Tage. Die Schäden hatten sich nicht in den gut einhundert Jahren am jetzigen Standort entwickelt, sondern waren bereits am vorangegangenen Standort entstanden und bildeten eine Schadensentwicklung von gut vierhundert Jahren ab.

Das Bauwerk hatte sich insgesamt allerdings stark verformt. Die Rückwand wies eine Neigung von 13 bis 15 cm auf, was aber nicht zu Rissen im Gebäude selbst geführt hatte. Die Gründung bestand aus einem mindestens 100 cm tiefen Betonfundament. Die Nei-

gung wurde zu diesem Zeitpunkt nicht als bedrohlich empfunden, sollte aber in Zukunft beobachtet werden. Die selbständige fundamentierte Unterfangung des Altans über den Treppenläufen hatte allerdings dazu geführt, dass sich die Bogenkonstruktion von den Säulen abgehoben hatte, d.h. das Bauwerk sich stärker gesetzt hatte als die Hilfskonstruktion.

Die Lusthausruine zeigte eine sehr starke Durchfeuchtung. Die Teerpappenabdichtung auf der oberen Ebene war schadhaft, teilweise durch Bewuchs an den Anschlüssen zerstört. Niederschläge auf die Treppen wurden in das Bauwerk hineingeführt. Die so entstandene recht konstante und starke Durchfeuchtung hatte nicht nur Algen und Flechten eine Lebensgrundlage geboten, sondern auch höheren Pflanzen, bis hin zu Baumsprösslingen.

4 Maßnahmenkonzept

Das Ziel der Denkmalpflege war es den Ruinencharakter zu erhalten, was zur Folge hatte, dass Steinerneuerungen vermieden werden sollten und eine Beschränkung auf ein reines Konservierungskonzept vorzusehen war. Der Bauherr hatte sich

diese Sicht ebenfalls zu eigen gemacht. Die starke Durchfeuchtung der Ruine ließ jedoch zunächst keine Festigung zu. Somit ergab sich eine Einteilung in zwei Bauabschnitte:

- Abdichtung des Bauwerks, d.h. Abdichtung der Betondecke über dem Gewölbe und Abdichtung der Treppen, Einbau einer Ringdrainage und anschließender Trocknung. Für die Trocknung wurde ein Zeitraum von ca. 2 Jahren vorgesehen.
- Konservierung der Ruine.

Die Abdichtung der oberen Ebene wurde entsprechend dem Bestand mit einer hochwertigen Abdichtungsbahn ausgeführt. An kritischen Stellen wurde sie durch Konstruktionen aus Bleiblech ergänzt. An der Rückseite wurde eine Dachrinne angebracht, um ein Abtropfen und die Durchfeuchtung der darunterliegenden Wand zu verhindern. Die Abdichtung der Treppe erforderte den Einbau einer Abdichtungsebene unter den Stufen. Die sich daraus ergebenden Randbedingungen für den Wiedereinbau der Treppenstufen konnte erst festgelegt werden, nachdem die Unterkonstruktion unter der bestehenden Treppe

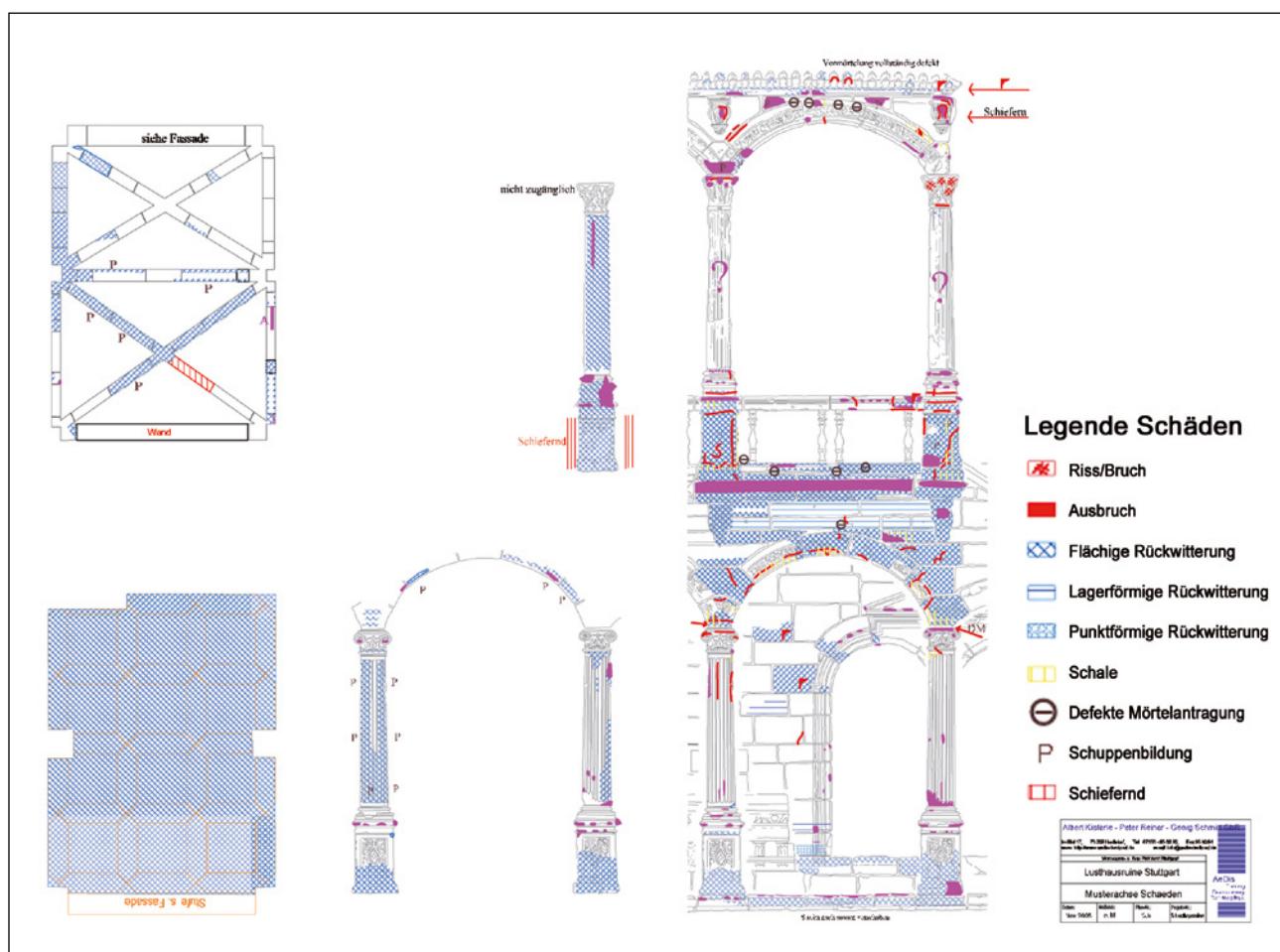


Abb. 9 Schadenskartierung 2008

freigelegt war, d. h. erst während der Ausführung der Arbeiten selbst.

Ein Abbau des Stützgerüsts wurde für möglich erachtet und zusammen mit Prof. Berthold Burkhardt vom Institut für Tragwerksplanung, Braunschweig, wurde ein statisches Konzept und zusammen mit der MPA-Stuttgart ein Konzept zur Prüfung der Tragfähigkeit der Säulen erarbeitet.

Die von seinen Säulen abgelösten Bögen und Zwickelmauern des Altans sollten abgebaut, konserviert und wiederaufgebaut werden. Der Abbau sollte auch bessere Möglichkeiten zur Konservierung dieser doch sehr stark geschädigten Stücke bieten.

Die Konservierung selbst sollte nicht reprofiliert, aber die visuelle Beeinträchtigung durch Anböschungen und Schlämmlungen reduziert werden. Risse und Schalen sollten mit Kieselsol gebundenen Materialien verfüllt werden. Dieses Materialsystem sollte auch bei Kittungen und Schlämmlungen zum Einsatz kommen. Abschließend sollte eine Festigung mit Kieselsäureester die Kornbindung wieder verbessern. Mörtelergänzungen waren nur vorgesehen, wo sie für die Wasserführung bzw. für den Anschluss der Abdichtung erforderlich waren.

5 Durchführung

Nach einer Bestandserfassungs-, Konzeptfindungs- und Planungsphase konnten im Sommer 2009 die Ausschreibungen für die anstehenden Konservierungsarbeiten und Natursteinarbeiten durchgeführt werden. Die Ausschreibung für die Natursteinarbeiten wurde von der Fa. Johannes Abel, Augen gewonnen, die Konservierungsarbeiten durch Dipl. Restaurator Luizius Kürten, Stegen. Die Bauleitung wurde von Herrn Kreissl vom Büro AeDis durchgeführt. Noch im Herbst wurde der Abbau des Altans und der Treppe vorgenommen, so dass die Konservierungsarbeiten über den Winter hinweg erfolgen konnten.

Der Abbau der Treppenstufen und des Altans erfolgten noch im Herbst/Winter 2009. Beim Abbau stellte sich heraus, dass sogar schiefernde Postamente im schadhaften Zustand – lediglich durch Klammern gesichert – beim Aufbau der Ruine verwendet wurden. Die Schadensdynamik konnte somit nochmals geringer eingeschätzt werden.

Die Konservierungsarbeiten stellten sich nach Abbau der Säulen deutlich aufwendiger heraus, da eine Vielzahl tiefgehender Risse vorhanden war. Die Eisenenteile hatten durch Korrosion in den Säulen, Bogensteinen und in den Werkstücken der Zwickelmauern umfangreiche Risse entstehen lassen. In vielen Teilen war die Schalenbildung extrem umfangreich. Die Kornbindung war an den Säulen sehr stark geschädigt. Die Risse boten allerdings auch die Möglichkeit, eine sehr tiefgehende Festigung mit Kieselsäureester vorzunehmen. Die Riss- und Schalenverfüllung war entsprechend aufwendig. Kittungen und Schlämmlungen erfolgten nur sehr zurückhaltend, ohne dass Kanten reprofiliert oder Ausbrüche gefüllt worden wären, um den Ruinencharakter zu erhalten. Entsprechend wurden auch kaum größere Mörtelergänzungen vorgenommen. Die Konservierung der abgebauten Teile erfolgte im Winter in der Werkstatt, so dass optimale Klimabedingungen für die Konservierung hergestellt werden konnten. Die am Objekt verbliebenen Postamente unter den Säulen wurden im Sommer 2010 *in situ* konserviert.

Die Treppe wurde lediglich an den Außenmauern aufgelegt angetroffen, wobei einzelne, gebrochene Stufen einen zusätzlichen, mit Backsteinen gemauerten Auflagepunkt unter dem Bruch beim Aufbau der Ruine erhalten hatten. Die vorgefundene Unterkonstruktion eignete sich nicht, die zahlreichen gebrochenen Stufen aufzunehmen und gleichzeitig als Abdichtungsebene zu dienen. Als Trag- und Dichtungsebene wurde eine neue Stahlkonstruktion eingebaut, die ausgemauert und mit Bitumenbahnen abgedichtet

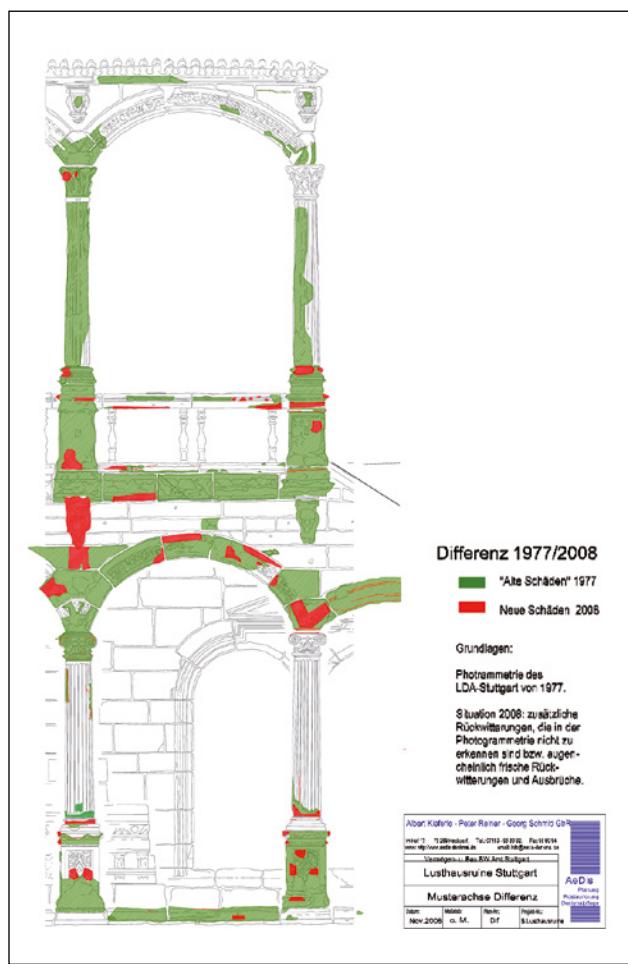


Abb. 10 Kartierung der Schadensdifferenz 1977/2008



Abb. 11 Situation nach Abbau der Treppe mit Lockermaterial und Wurzelwerk 2009



Abb. 12 Situation nach Abbau der Treppe, stark geschädigte gemauerte Wangen 2009

wurde. Für die Auflage der Stufen wurden dann nochmals quer unter den Stufenkanten verlaufende Stahlschienen eingebaut, die Brüche überbrückten. Die Stufen wurden ohne Mörtelbett auf die Metallkonstruktion aufgesetzt. An den beiden unteren Enden war allerdings die Abdichtungsebene sichtbar, was ästhetisch unbefriedigend war und einen Angriffs-

punkt für Vandalismus gebildet hätte, weswegen hier die beiden einzigen neu hergestellten Werkstücke als unterste Stufe der Treppe eingebaut wurden. Diese beiden neuen Stufen wurden als Blockstufen gestaltet, um sie als neuere Zutat kenntlich zu machen.

Der Altan wurde unter Wahrung des statischen Konzepts von 1903/1904 wieder aufgebaut. Weiter-



Abb. 13 Restaurierung der Säulen in der Werkstatt Kürten 2010



Abb. 14 Begutachtung der restaurierten Säulen durch Statiker und Restauratoren 2010



Abb. 15 Treppe während der Versetzarbeiten mit quer verlaufenden Auflagern 2010

gehende Ertüchtigungen waren nicht erforderlich. Die Eisenteile waren zuvor entrostet und mit einem PVC-freien Dickschichtanstrich versehen worden. Abschließend wurde die Abdeckung aus Mönch- und Nonnenziegeln aus einer Mischung aus alten Ziegeln und von der Märkischen Keramikmanufaktur den alten Ziegeln nachgeformte, neuen Ziegeln aufgemauert.

Im Jahr 2011 erfolgte eine Durchsicht und Wartung des Altans durch Dipl. Rest. Kürten, bei der eine umfangreichere Nachfestigung notwendig wurde.

Im Sommer 2013 bis Sommer 2014 wurde nach ausreichender Trocknungszeit das untere Geschoss der Lusthausruine konserviert. Die Ausschreibungen wurden von Frank Schlotterbeck, Sachsenheim, für die Konservierungsarbeiten und Fa. Herzig, Rot am See, für die Natursteinarbeiten gewonnen. Die Arbeitsweisen entsprachen jenen des vorangegangenen Bauabschnitts, diesmal wurden jedoch alle Stücke *in situ* bearbeitet. Eine Bearbeitung der Gewölbebekappen war im ersten Bauabschnitt nicht durchge-



Abb. 16 Treppe nach dem Wiedereinbau der historischen Teile 2010

führt worden. Eine Erneuerung von 2 oder 3 Rippen, die für möglich erachtet wurde, konnte unterbleiben. Die ausgebrochenen Putzflächen in den Gewölbēn wurden geschlossen. Die Traufgesimsteile an der Rückwand der Ruine wurden neu befestigt, vereinzelt neu versetzt, die Stufen der Vorderkante gerichtet. Geschädigte Fugen wurden kleinteilig geschlossen.



Abb. 17 Bleibladung zum Anschluss an Bitumenabdichtung 2010



Abb. 18 Pressetermin nach dem Wiederaufbau 2010



Abb. 19 Kittungsarbeiten Bauabschnitt 2, 2013



Abb. 20 Reinigungsarbeiten Bauabschnitt 2, 2013



Abb. 21 Nachzustand 2014

6 Fazit

Die Arbeiten blieben auf die eigentliche Lusthausruine beschränkt. Als Desiderat bleibt eine Neuordnung der Einzelstücke des Lusthauses, wofür diese Maßnahme nicht der geeignete Rahmen war. Teile des Neuen Lusthauses finden sich verstreut an der Ruine, auf Schloss Lichtenstein, in den Magazinen des Landesmuseums und im städtischen Lapidarium und womöglich noch an anderen Stellen.

Die Einschätzung des Schadensfortschritts an der Ruine stellte sich als sehr schwierig dar. Die zahlreichen Umbauten des Neuen Lusthauses/Opernhauses/Hoftheaters im Zeitraum zwischen 1750 und 1850 und der kaum dokumentierte Aufbau der Ruine verunklarten den Schadensverlauf. Die Kartierung der Schadendifferenz zwischen der 30 Jahre alten Photogrammetrie und dem angetroffenen Zustand führte zu einer besseren Einschätzung der Schadendynamik. Diese Vorgehensweise dürfte für hochrangige Objekte hilfreich sein, von denen eine Photogrammetrie oder qualitätsvolle Fotografien existieren, aber keine Schadenskartierung vorliegt, wie dies für Restaurierungen bis in die 1980er Jahre hinein typisch ist. Die Photographien des frühen 20. Jahrhunderts waren dafür leider nicht geeignet, da sie regelmäßig umfangreiche Retuschen aufwiesen.

Der Wiederaufbau der Ruine 1903/1904 muss als denkmalpflegerisch sehr hochwertig angesehen werden: Ergänzungen unterblieben mit Ausnahme der Baluster, die aber durch Verwendung von Beton kenntlich gemacht wurden völlig, Reprofilierungen und Überarbeitungen fanden nicht statt. In der Konsequenz bestanden allerdings auch alle Schäden unbearbeitet und ungeschützt weiter. In der Folgezeit unterblieben – aus jetziger Sicht zum Glück – alle Versuche der Instandsetzung, so dass die Ruine sehr weitgehend authentisch überliefert ist. Eine Restaurierung der Ruine hätte noch in den 1980er Jahren einen umfangreichen Steinaustausch nach sich gezogen.

Die Lusthausruine kann aber nicht langfristig sich selbst, d.h. in irgendeiner Form dem Verfall überlassen bleiben. Die zahlreichen Hilfskonstruktionen, die im Zeitraum zwischen 1970 und 2005 Zug um Zug eingebaut wurden, die ein Einstürzen der Ruine verhindern sollten, waren letztlich an Grenzen gestoßen und hatten zu einer schwerwiegenden, in der Öffentlichkeit nicht mehr akzeptierten ästhetischen Beeinträchtigung geführt. Nicht nur die Schäden hatten sich weiterentwickelt, auch die Anforderungen an die Verkehrssicherheit haben sich in den vergangenen Dekaden erhöht. Der jetzige Zaun um die Anlage kann aus Gründen der Verkehrssicherheit nicht entfernt

werden, da keine Absturzsicherungen vorhanden sind und diese auch nicht ohne gravierende Eingriffe nachgerüstet werden können. Ein gutmütiger Verfall von Ruinen, insbesondere bei komplexen Konstruktionen, die Gewölbe oder Bögen beinhalten, kann nicht erwartet werden.

Die Konservierung konnte entgegen den im Vorfeld geäußerten Bedenken durchgeführt werden, stellt aber sicherlich einen Grenzfall dar. Sie wird jedoch nicht ohne weitere Beobachtung und Wartung bestehen können. Für die Wartung wird die Problematik mehrmaliger Festigungen mit Kielsäureester und damit einhergehendem Risiko von Überfestigung ausschlaggebend sein. Hier wird man sich vorsichtig und mit naturwissenschaftlicher Begleitung herantasten müssen. Die instandgesetzten und die neu eingebauten Abdichtungsebenen werden ebenfalls gewissenhaft gewartet werden müssen, da von ihnen die Dauerhaftigkeit der Konservierungsarbeiten ganz wesentlich abhängt.

Das nur wenig veränderte Erscheinungsbild nach der Konservierung läuft Erwartungen von Teilen der Öffentlichkeit zuwider, die verschwommen vom Glanz des ehemaligen Neuen Lusthauses träumen. Dieser wurde bereits 1755 und nachdrücklich um 1845 getrübt und ging im Brand 1902 unter. Die Lusthausruine ist die authentisch mögliche, ungeschönte, translozierte Brandruine. Die Lusthausruine bietet sich dem Betrachter nach der Restaurierung aber wieder ohne Stützerüste und sonstige Hilfskonstruktionen dar. Die Entwässerung wurde instandgesetzt und verbessert, die Schäden, die teilweise bereits 1903/1904 vorhanden waren wurden konserviert, so dass sich die Zukunftsaussichten der Ruine deutlich verbessert haben. Der Bestand der Ruine wird soweit es mit den heutigen Mitteln möglich ist authentisch weitertradiert.

Literatur

Zur Geschichte des Neuen Lusthauses, Stuttgart:

http://de.wikipedia.org/wiki/Neues_Lusthaus_Stuttgart.

Lambert, A.: Das ehemalige Lusthaus in Stuttgart.

In: Schweizerische Bauzeitung vom 24. Januar 1903, S. 41ff.

Mayer, E.: Brand des Hoftheaters in Stuttgart. In: Zentralblatt der Bauverwaltung vom 8. Februar 1902, S. 70ff.

Beck, K.: Das ehemalige Lusthaus in Stuttgart. In:

Zentralblatt der Bauverwaltung vom 14. März 1903, S. 129ff.

Aktuelle Naturstein- und Steinkonservierungsarbeiten im Kloster Maulbronn

von Holger Probst



In der Klosteranlage Maulbronn führt das Land Baden-Württemberg zurzeit umfangreiche Baumaßnahmen aus. Ein Schwerpunkt der Arbeiten ist dabei neben der inneren Neuorganisation die Instandsetzung in Dach und Fach. Der Umgang mit dem UNESCO-Weltkulturerbe im großen Rahmen und im Detail kann für andere Projekte Anregung und Beispiel sein. Der folgende Beitrag versucht, aus Sicht des Bauherrn und Architekten einen Überblick zu verschaffen.

1 Ausprobieren und Scheitern als Teil der Klostergeschichte

Nicht immer läuft bei Bauvorhaben alles so glatt und reibungslos wie Bauherren und Planer es sich vorstellen. Oft muss untersucht, ausprobiert und manchmal auch neu angefangen werden, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Diese Prozesse sind bereits aus der Gründungszeit des Klosters Maulbronn überliefert und ziehen sich durch seine gesamte Baugeschichte.

Die erste Gründung des Klosters 1138 in Eckenweiher war ein Fehlversuch [1]. Durch die Lage oberhalb der Enz, schlechte Bodenverhältnisse und die weit abgelegenen Steinbrüche war dieser Standort so ungünstig, dass 1147 ein zweiter Versuch in Maulbronn unternommen werden musste (Abb. 1).

Dem üblichen Bauprogramm der Zisterzienser folgend liegt das Kloster nun in einem wasserführenden Tal mit nahegelegenen Steinbrüchen und Holzvorkommen. Doch auch am neuen Standort musste gleich mit der Grundsteinlegung der Kirche auf Widrigkeiten reagiert werden. Im Gegensatz zum mittelalterlichen Idealplan eines Klosters, dem Sankt-Gallener Klosterplan, wurde die Kirche nicht auf der Nordseite sondern auf der Südseite des Kreuzgangs angeordnet. Dies ist dem wenig tragfähigen Baugrund im Nahbereich der Salzach geschuldet, der für einen schweren Kirchenbau als ungeeignet erachtet wurde. Im Laufe der 850jährigen Geschichte des Klosters führte diese Baugrundproblematik immer wieder zu Problemen und ist Ursache für einige der gravierendsten Bauschäden [2].

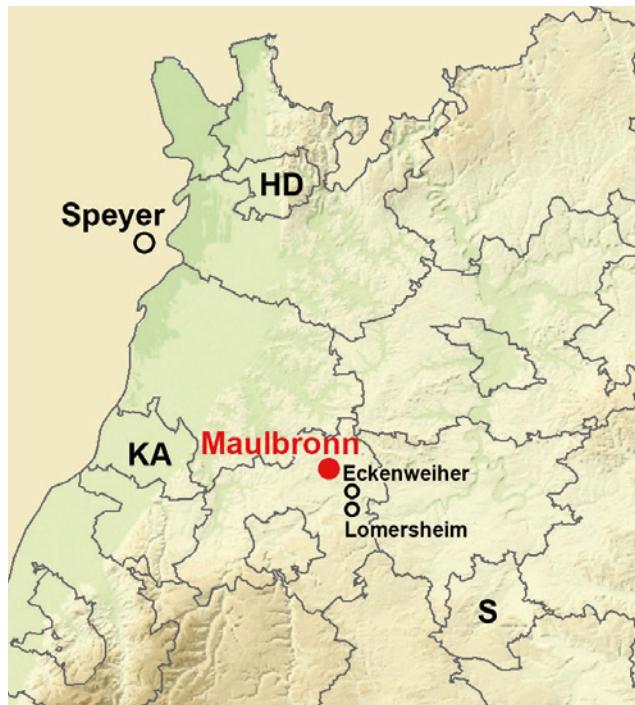


Abb. 1 Kartenausschnitt Baden-Württemberg

2 Die Zisterzienser als frühe Ingenieure einer europäischen Organisation

In knapp zweihundert Jahren breiteten sich die Zisterzienser vom burgundischen Citeaux über ganz Europa aus [3]. Die Mönche des 1098 gegründeten Reformordens fühlten sich dem benediktinischen Ideal des „ora et labora“ (bete und arbeite) verpflichtet. Sie strebten ein einfaches und zurückgezogenes Leben an. Bei den weltlichen Herrschern waren sie überaus beliebt und wurden oft mit großzügigen Landschenkungen und Sonderprivilegien unterstützt [4]. Durch Ihre ausgeprägten Kenntnisse in den Bereichen der Landwirtschaft, der Fischzucht und des Weinbaus sorgten sie für einen willkommenen Technologietransfer auch in weniger entwickelte Landstriche (Abb. 2).

Insbesondere die Laienbrüder können als frühe Ingenieure betrachtet werden. Sie waren für viele der wirtschaftlichen Belange des Klosters verantwortlich. In ihrer Obhut lagen beispielsweise die sogenannten Grangien, die landwirtschaftlichen Güter des Klosters. Im Austausch mit den adeligen und lesekundigen Herrenmönchen konnten Kulturtechniken, die aus römischer Zeit überliefert waren, verfeinert und weiterentwickelt werden [5]. Die Organisation des Ordens mit seinen jährlichen Zusammenkünften in der Generalabtei sorgte zudem für einen regen Erfahrungsaustausch zwischen den weit verstreuten Zisterzen [6].



Abb. 2 Luftbild Maulbronn und Kulturlandschaft

3 Maulbronn – ein Kloster im Eigentum des Staates

Heute befindet sich die Klosteranlage nahezu komplett im Eigentum des Landes Baden-Württemberg. Diese Wandlung von einem katholischen Männerkloster zu einer Klosteranlage in staatlichem Eigentum erfolgte nicht auf einen Schlag sondern sukzessive im Laufe der letzten fünf Jahrhunderte.

1504 wurde das Kloster durch Herzog Ulrich von Württemberg eingenommen und verlor damit seinen Status der Reichsunmittelbarkeit (Abb. 3). Ab der Einführung der Reformation in Württemberg 1534 erlebte das Kloster einen mehrfachen Wechsel aus Flucht und Wiedereinzug der Mönche.

Herzog Christoph erließ 1556 die „Große Kirchenordnung“, mit der das Kloster in eine evangelische Klosterschule umgewandelt wurde. Diese Schule sollte der Heranbildung des geistlichen Nachwuchses der evangelischen Kirche in Württemberg dienen und besteht als Evangelisches Seminar Kloster Maulbronn bis heute.

Nach dem Reichsdeputationshauptschluss wurde Friedrich I. 1806 zum ersten württembergischen König. Spätestens ab diesem Zeitpunkt war das Kloster endgültig verstaatlicht und verblieb dann 1918 mit Einführung der Republik im Landeseigentum [7].

4 Die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung

Seit den Gründungsjahren des Landes Baden-Württemberg betreut die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung die Immobilien des Landes und nimmt die Bauaufgaben der Bundesrepublik Deutschland in Baden-Württemberg wahr.

Das Land ist Eigentümer eines großen Immobilienbestandes. Die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung übernimmt für das Land die Vertretung als Eigentümer und Bauherr. Sie sichert und betreut das Liegenschaftsvermögen, steuert das Baugeschehen und plant einen Teil der Projekte selbst. Die staatlichen Schlösser, Klöster und Gärten werden als wichtige Kulturgüter des Landes erhalten und besuchergerecht präsentiert [8].

5 Projektablauf

Die einzelnen Verfahrensschritte bei staatlichen Baumaßnahmen sind in der Dienstanweisung der Staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltung (DAW) geregelt [9].

Sie folgen im Wesentlichen einem einheitlichen Schema von der Feststellung und Abstimmung des



Abb. 3 Herzog Ulrich von Württemberg (1487–1550) mit Kloster Maulbronn im Hintergrund

Bedarfs über die Finanzierungsplanung und Mittelfreigabe bis zur Baudurchführung und abschließenden Dokumentation.

In einschlägigen Richtlinien sind auch die Verfahren zur Beteiligung freiberuflich Tätiger (Rift) sowie zur Beauftragung und Abwicklung von Bauleistungen (Vergabe- und Vertragshandbuch/VHB) festgelegt.

6 Vermögen und Bau Baden-Württemberg vor Ort

Die Eigentümer- und Bauherrenfunktion in der Klosteranlage wird durch das Amt Pforzheim des Landesbetriebs Vermögen und Bau Baden-Württemberg ausgeübt.

Für die Bauarbeiten im Kloster wird vor Ort ein Baubüro unterhalten, in dem Architekten und Ingenieure der Hochbauverwaltung alle Baumaßnahmen im Kloster planen und durchführen. Je nach Aufgabenstellung werden von außen Spezialisten aller Fach-

richtungen, insbesondere Restauratoren, zur Beratung hinzugezogen.

Auf diese Weise werden ein der Nutzung angemessener Standard in Verbindung mit hoher baulicher Qualität erreicht, ökonomische und ökologische Belange berücksichtigt und ein wertvoller Beitrag zur Pflege der Baukultur geleistet.

Die Kontinuität bei der Übernahme der komplexen Bauaufgaben in stetiger Zusammenarbeit mit den Fachberatern der Denkmalpflege sichert eine hohe Fachkompetenz [10].

7 Status als UNESCO-Weltkulturerbe

Maulbronn ist die besterhaltene mittelalterliche Klosteranlage der Zisterzienser. Durch die Reformation des Klosters kam es zu einer Stagnation der Bauarbeiten und es fand keine barocke Überformung statt. Das Zentrum des Klosters, die sogenannte Klausur, ist dadurch in großen Teilen noch in ihrem romanischen und gotischen Urzustand vorhanden. Einzigartig ist auch die Einbettung in die Kulturlandschaft der Zisterzienser mit den angrenzenden Weinbergen und der Seenlandschaft. Zusammen mit der kontinuierlichen geistlichen Nutzung des Klosters führte dies

1993 zur Aufnahme in die UNESCO-Liste des Weltkulturerbes.

Dieser Titel ist zunächst eine Selbstverpflichtung der Verantwortlichen, für die Bewahrung und Pflege des Objektes zu sorgen. Durch die UNESCO werden keine Fördermittel oder sonstige finanzielle Unterstützungen zur Verfügung gestellt. Mittelbar führte der Status als Weltkulturerbe jedoch zur Aufnahme in ein Investitionsprogramm des Bundes, durch welches das Land in den Jahren 2009 bis 2014 bei seinen Erhaltungsmaßnahmen erheblich unterstützt wurde.

8 Aktuelle Baumaßnahmen

In den Jahren 2009 bis 2013 wurde für 1,0 Millionen Euro eine Substanzsicherung des Kreuzgangs samt Brunnen und Brunnenhaus durchgeführt. Hierbei handelte es sich um eine rein konservierende Maßnahme an den Putzen, Fassungen und Natursteinfassaden.

Zwischen 2000 und 2004 wurden die Ostteile der Klosterkirche bestehend aus Chor mit Chorgestühl, Querhaus und Großem Dachreiter für 3,4 Millionen Euro instand gesetzt. Darauf folgte von 2010 bis 2013 die Sanierung der westlichen Teile der Klosterkirche. Hierbei wurden an Langhaus, Seitenkapellen und Pa-

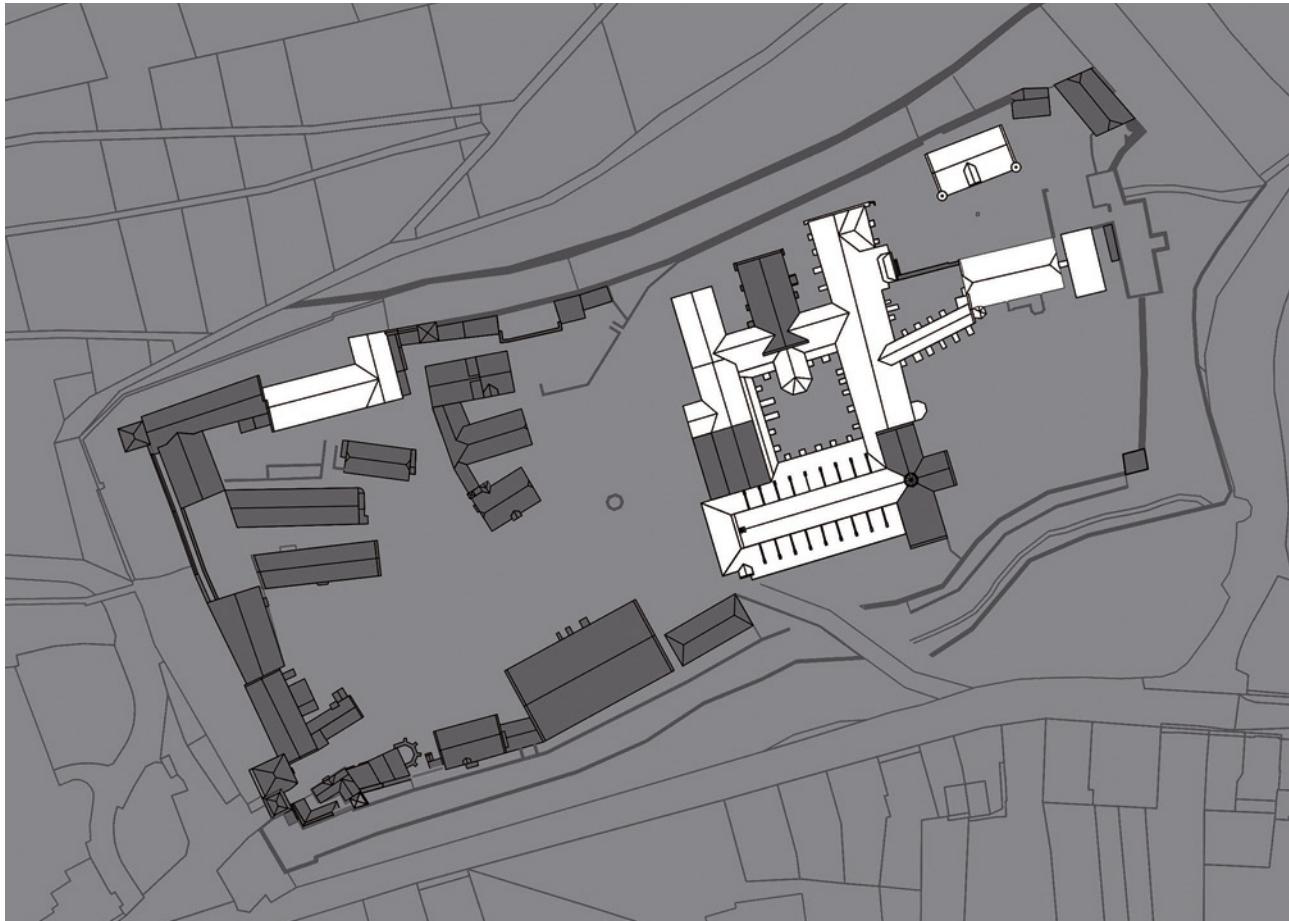


Abb. 4 Große Baumaßnahmen im Kloster Maulbronn

rades die Putze, Fassungen und Natursteinfassaden konserviert. Hinzu kamen die Reparatur sämtlicher Dächer, die Konservierung der Ausstattung und der Einbau einer neuen Orgel. Die Kosten beliefen sich auf 6,6 Millionen Euro [11].

Seit 2007 bis voraussichtlich Ende 2016 werden in Maulbronn Umbaumaßnahmen für das evangelische Seminar mit einem Gesamtvolumen von 15,4 Millionen Euro ausgeführt. Die Internatsbereiche mit Schlaf- und Wohnräumen in Mühle, Jagdschloss und Laiendorfment wurden bereits instandgesetzt. Parallel wurde ein Küchenneubau errichtet, der den neuen Speisesaal in der Abt-Entenfuß-Halle versorgt. Aktuell werden die Unterrichtsbereiche im Obergeschoss der Klausur umgebaut. Die Maßnahme besteht neben den inneren Anpassungen der Gebäude an die geänderten Nutzungsanforderungen aus einer Instandsetzung in Dach und Fach (Abb. 4).

9 Substanzsicherung Kreuzgang

Die Maßnahme im Maulbronner Kreuzgang fußt direkt auf den Erkenntnissen des Sonderforschungsbereichs 315 der Universität Karlsruhe. Bei den Arbeiten in der Frateria/Geißelkammer wurden Standards

für die Bauaufnahme, interdisziplinäre Zusammenarbeit, wissenschaftliche Untersuchungen, Dokumentation etc. entwickelt.

Am Beispiel der Kreuzgangfassaden lässt sich das grundsätzliche Vorgehen gut darstellen:

Grundlage für alle Maßnahmen ist eine detaillierte Bauaufnahme. Im vorliegenden Fall erfolgte diese durch die Auswertung von Orthofotos, die Erstellung von Fotogrammetrien sowie durch ein detailliertes digitales und manuelles Aufmaß.

Die Bauforschung lieferte grundlegende Erkenntnisse über die Bauphasen und Befunde, die bei der Planung der Instandsetzung berücksichtigt werden. Untersucht wurden beispielsweise weiße Spuren an der Fassade, die eine frühere Fensterabfolge verdeutlichen und deren genauer Ursprung bisher nicht geklärt ist (Abb. 5).

Eine maßnahmenorientierte Schadenskartierung bildete die Grundlage für die Planung, Abstimmung und Ausschreibung der Bauausführung (Abb. 6). Im detaillierten Austausch mit den Vertretern der Denkmalpflege wurde der Rahmen festgelegt, wobei das Hauptziel aller Maßnahmen der Erhalt des originalen Bestandes ist [12].



Abb. 5 Ansicht Kreuzgang Ost

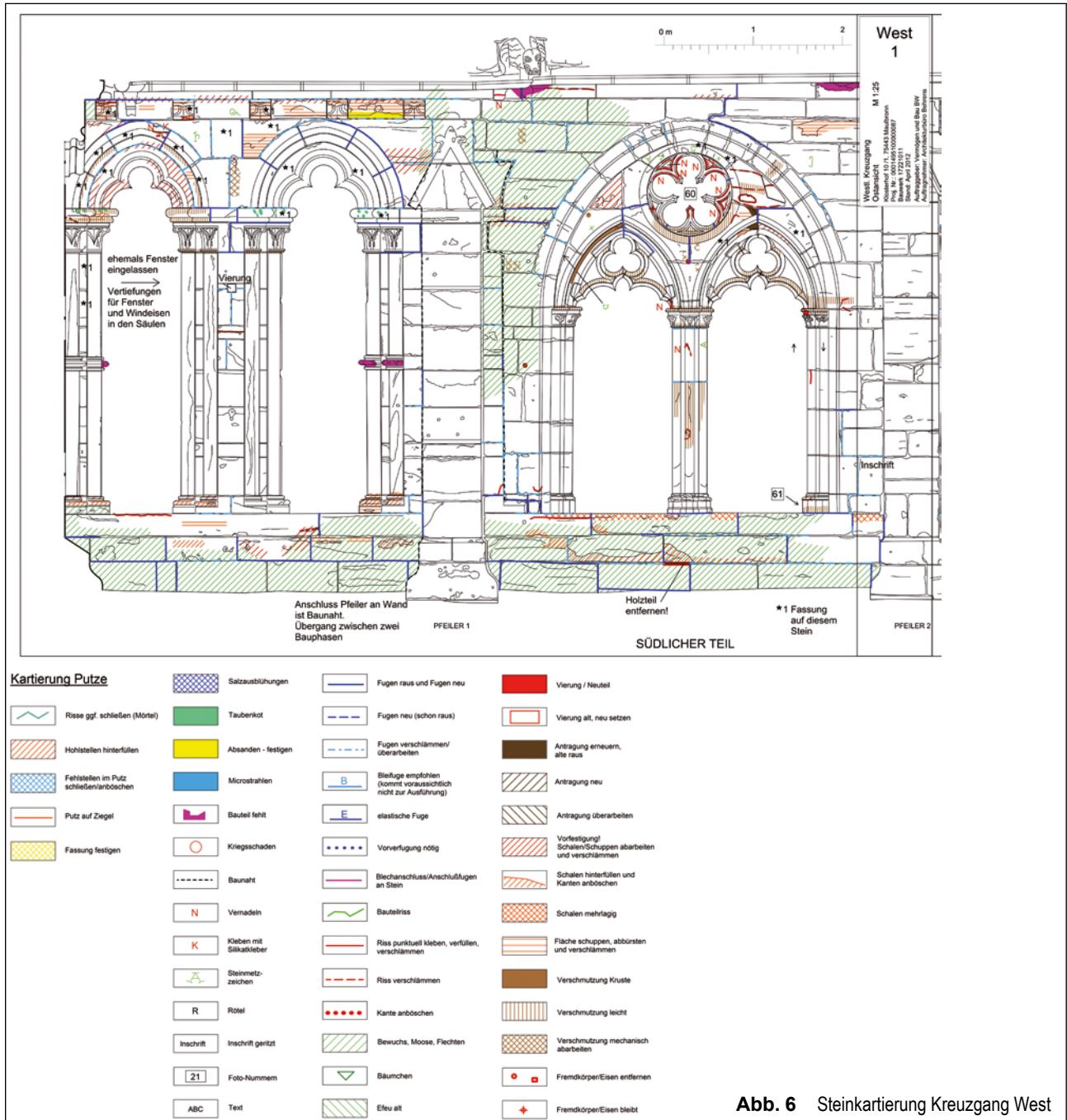


Abb. 6 Steinkartierung Kreuzgang West

Vor der Oberflächenreinigung wurden die zu schützenden Bereiche mit Cyclododecan überdeckt und dadurch erhalten. Im Anschluss erfolgte die Konserverung bzw. Erneuerung der Fugen sowie die Sicherung labiler Steinoberflächen durch Festigung, Schlämmung und Antragungen (Abb. 7, 8). In Einzelfällen wurden konstruktiv notwendige Steine ersetzt bzw. ergänzt [13, 14].

Eine Dokumentation der ausgeführten Arbeiten mit Aufnahme der Vor-, Zwischen- und Endzustände, Kartierung der ausgeführten Arbeiten und Protokollierung der eingesetzten Materialien schloss die Leistung der beteiligten Firmen ab.

Außer den Fassaden wurde auch die innere Raumschale im Kreuzgang instandgesetzt [15]. Hauptau-

genmerk lag dort allerdings auf den hohlliegenden Putzen und labilen Fassungen. Das Vorgehen an den Natursteinoberflächen entsprach dem der Kreuzgangfassaden. Steinmetztechnischer Höhepunkt war hier die Ergänzung einer Fehlstelle durch eine passgenaue Vierung (Abb. 9, 10).

Einiger Wermutstropfen der Maßnahme war das Auftauchen von einzelnen Schwarzverfärbungen im südlichen Kreuzgang. Hierbei handelt es sich vermutlich um Oxidationserscheinungen tieferliegender Eisen- und Manganbestandteile [16]. Diese sind im gelben Maulbronner Sandstein enthalten und wurden wohl durch die Konservierung mobilisiert. Bei späteren Maßnahmen wurde daher vorsichtshalber auf Bindemittel mit geringerer Alkalität umgestellt,

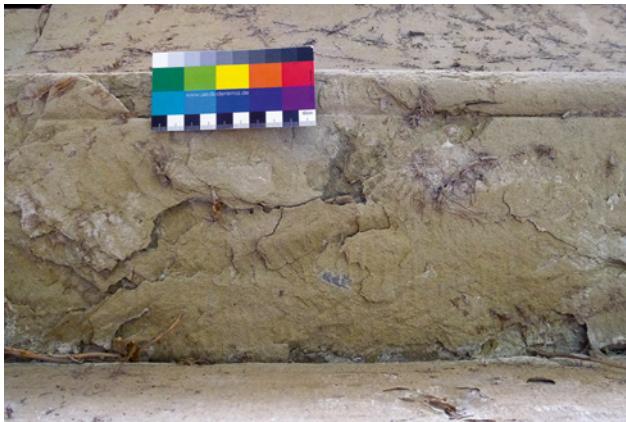


Abb. 7 Vorzustand Steinkonservierung Kreuzgang Süd



Abb. 8 Endzustand Steinkonservierung Kreuzgang Süd



Abb. 9 Fehlstelle Kreuzgang West



Abb. 10 Passgenaue Vierung Kreuzgang West

obwohl die Ursache noch nicht zweifelsfrei eruiert werden konnte (Abb. 11).

10 Konservierung Dreischalenbrunnen

Der Dreischalenbrunnen als Wahrzeichen des Klosters wurde im Zuge der Arbeiten am Kreuzgang ebenfalls konserviert und wieder in Betrieb genommen. Der Brunnen befindet sich in der Brunnenkapelle, die als Anbau des Kreuzgangs in den Kreuzganggarten hineinragt. Er besteht aus einer oberen Bronzeschale sowie einer mittleren und unteren Steinschale. Die Wasserversorgung des Brunnens erfolgt aus einer natürlichen Quelle in der Klosteranlage nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren (Abb. 12).

Der Brunnen in seiner heutigen Form ist ein Produkt der schöpferischen Denkmalpflege des 19. Jahrhunderts [17]. Eduard Paulus als württembergischer Konservator war ein Verfechter der Rückrestaurierung im Sinne von Eugène Viollet-le-Duc. Er beschloss, die in der Brunnenkapelle vorgefundene große Brunenschale mit dem zweischaligen Abtsbrunnen zusammenzuführen, um einen vermeintlichen früheren



Abb. 11 Schwarzverfärbungen Kreuzgang Süd

Zustand wiederherzustellen. Da die kleinere Steinschale jedoch ungeeignet war, wurde sie kurzerhand durch eine neue ersetzt. So kommt es, dass der heutige Brunnen ein Potpourri verschiedener Elemente und Zeitschichten ist. Die untere Steinschale und die obere Bronzeschale stammen aus dem 15. Jahrhundert, jedoch von verschiedenen Brunnens. Die mittlere



Abb. 12 Dreischalenbrunnen



Abb. 13 Reinigung Dreischalenbrunnen

Schale mit den Löwenköpfen ist eine Neukreation des 19. Jahrhunderts [18].

Zentimeterdicke Sinter- und Kalkablagerungen auf allen Oberflächen sowie Korrosionserscheinungen an den Metallen machten eine Maßnahme erforderlich. Beide Steinschalen waren zudem mit mehreren Innenbeschichtungen versehen, die sich ablösten und von Wasser unterlaufen wurden. Das letztgenannte Schadensbild führte dazu, dass der Brunnen nicht mehr in Betrieb genommen werden konnte [19].

Einer der aufwändigsten Schritte bei der Konserverung des Brunnens war die Abnahme der Krusten und früheren Beschichtungen. Mit Hilfe des Kultursponsorings eines renommierten Reinigungsspezialisten konnte dies wirtschaftlich und kompetent ausgeführt werden (Abb. 13). Erst nach der Freilegung der originalen Oberflächen war der Sandstein als roter Sandstein identifizierbar. Zudem stellte sich heraus, dass die mittlere Steinschale horizontal mehrfach gerissen war (Abb. 14). Belassen wurde eine epoxidharzgebundene Ausgleichsmasse in der unteren Brunnenschale. Zum Einsatz kamen neben Partikelstrahl- und Feinsandstrahlgeräten auch mechanische Verfahren.

Eine Festigung der Steinschalen und -schläfte war nicht erforderlich, da der Brunnen bereits in den 1980er Jahren mit KSE „geflutet“ worden war. Die Risse der mittleren Schale wurden mit acrylatgebundenem Injektionsmörtel verfüllt. Einige lose Teile wurden mit Steinsilikatkleber neu befestigt.

Zunächst wurde eine Auskleidung der Brunnenschalen mit Blei favorisiert. Dies wäre eine leicht revisionierbare Lösung gewesen. Aufgrund der bereits vorhandenen neuzeitlichen Mörtelschicht wurde schließlich jedoch eine farbig pigmentierte, rein mineralische Dichtschlämme eingesetzt. Dadurch konnte der Steincharakter der Schalen erhalten bleiben (Abb. 15).

Probleme bereiten weiterhin das kalkhaltige Wasser und der Algenwachstum im Brunnen. Die natürliche und rein physikalische Quellwasserversorgung des Brunnens wurde jedoch als wichtige Denkmaleigenschaft erachtet. Daher wurde auf eine technische Wasseraufbereitung und Versorgung des Brunnens mittels Pumpe verzichtet.

11 Instandsetzung der Klosterkirche

Die Arbeiten an den westlichen Teilen der Klosterkirche folgten auf eine frühere Instandsetzung des Großen Dachreiters, des Chores und der Querhausdächer. Das komplett Langhaus aus Hauptschiff und Seitenschiffen, die südlichen Seitenkapellen und das Paradies wurden außen und innen bearbeitet.

Die Bauphasen der Kirche lassen sich leicht ablesen (Abb. 16). Die romanischen Bestandteile wurden aus gelbem Maulbronner Sandstein gebaut und umfassen Chor, Querhaus und Hauptschiff samt Seitenschiffen. Der Bau der Kirche wurde 1147 begonnen, 1178 fand die Kirchweihe statt. 1210 wurde das Paradies, die Vorhalle der Kirche, errichtet. Das Paradies gilt baugeschichtlich als erstes Bauwerk des Übergangsstils zwischen Romanik und Gotik in



Abb. 14 Zwischenzustand mittlere Brunnenschale



Abb. 15 Brunnenbeschichtung und Abläufe



Abb. 16 Südansicht Klosterkirche



Abb. 17 Gerüsterstellung Klosterkirche

Deutschland. In der zweiten Hälfte des 14. Jahrhunderts wurden die großen Maßwerksfenster im Chor eingebaut und der hölzerne Dachreiter errichtet, der typisch für viele Zisterzienserkirchen ist. Bis 1428 erfolgte die endgültige Abkehr vom ursprünglichen Schlichtheitsideal des Ordens. Die hölzerne Flachdecke des Hauptschiffs wurde durch ein reich verziertes

Netzgewölbe ersetzt. Zu dieser Bauphase gehören auch die nachträglich angebauten Seitenkapellen auf der Südseite und das Strebewerk.

Bei der aktuellen Instandsetzungsmaßnahme war bereits die Einrüstung der Kirche eine Herausforderung. Das Gerüst musste errichtet werden, ohne die Seitendächer zu durchdringen und die Seitenschiffe zu belasten. Es wurden daher Leimbinder auf die Mauerkrone des Hauptschiffes und auf frei vor dem Gebäude stehende Gerüstkonstruktionen aufgelegt, von denen die eigentlichen Arbeitsgerüste abgehängt werden konnten (Abb. 17). Erst danach waren die Reparatur des Daches und die Instandsetzung der Natursteinbauteile möglich.

Statisch waren die Strebebögen das größte Problem. Sie hatten sich soweit aus der Obergadenwand herausgelöst, dass man teilweise hindurchsehen konnte (Abb. 18). Erst eine detaillierte Bauaufnahme mit anschließender präziser statischer Berechnung brachte Entwarnung [20]. Zur Lastabtragung des Horizontalschubs des Netzgewölbes sind bereits die massiven romanischen Außenwände ausreichend, die Strebebögen sind statisch nicht erforderlich [21].



Abb. 18 Anschluss Strebebogen an Obergaden Süd



Abb. 19 Strebebogen nach Abschluss der Arbeiten

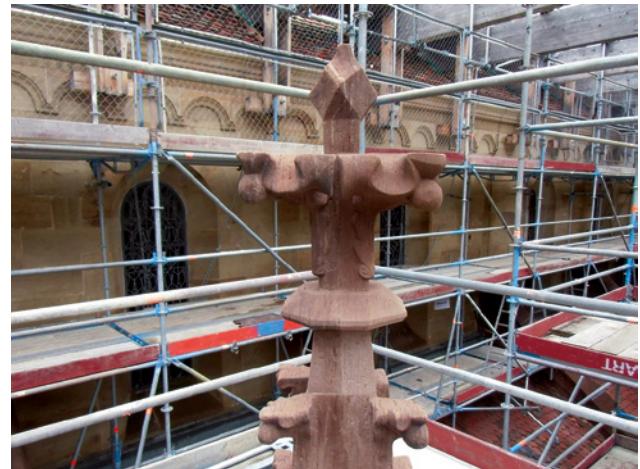


Abb. 20 Kreuzblume halb alt/halb neu

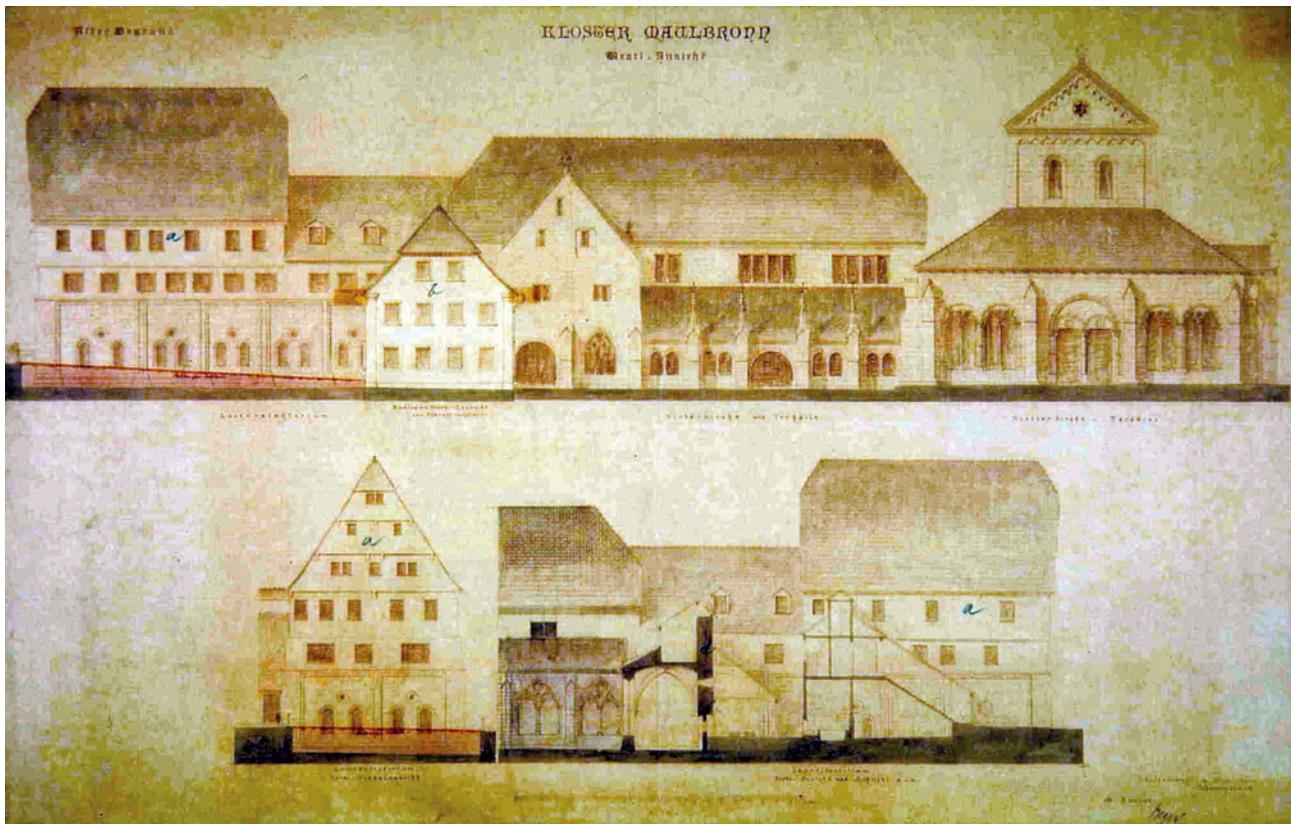


Abb. 21 Laiendorment im 19. Jahrhundert

Die Lücken zwischen Wand und Strebebogen mussten daher nur konstruktiv geschlossen und vor dem weiteren Eindringen von Wasser geschützt werden [22]. Zudem wurden die verrutschten Abdecksteine aller Strebebögen neu versetzt und mit Blei ausgefügt (Abb. 19). In Einzelfällen wurden Abdecksteine der Strebebögen, Verdachungen der Fialen und eine halbe Kreuzblume durch Neuteile ersetzt (Abb. 20).

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Steinkonservierung mit einer Festigung der Oberflächen und der Ergänzung von Fehlstellen sowie einer flankierenden Fugenkonservierung [23].

12 Umbau Laiendorment

Die Geschichte des Laiendorments ist eng mit der Geschichte des Dreischalenbrunnens verwoben. Im Erdgeschoss ist das mittelalterliche Laienrefektorium, der Speisesaal der Laienbrüder, erhalten geblieben. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts mussten die dort vorhandenen Doppelsäulen in einer Notmaßnahme gesichert und später komplett ausgetauscht werden. Ende des 19. Jahrhunderts wurde dann auch hier Eduard Paulus als Vertreter der schöpferischen Denkmalpflege tätig. Er ließ die Fachwerkaufbauten aus dem 16. Jahrhundert abtragen und durch ein romanisierendes Obergeschoss aus Naturstein ersetzen (Abb. 21, 22). Vorbild für die Fassaden-

gestaltung war ein romantisches Doppelfenster des Krankenbaus [24].

An diesem Bau zeigte sich zu Maßnahmenbeginn ein ausgeprägtes Schadensbild. Die Gesimssteine am Übergang zwischen romanischem Erdgeschoss und historistischem Obergeschoss hatten Abplatzungen an den Kanten und waren umlaufend gerissen oder herausgeschoben. Die Ursache konnte erst nach einer partiellen Herausnahme von geschädigten Steinen ermittelt werden (Abb. 24). Hinter dem Gesims war ein umlaufender L-Stahlwinkel als Ringanker eingebaut. Dieser Stahlwinkel war stark korrodiert und führte durch seine Volumenvergrößerung dazu, dass die vorgesetzten Steine aus der Fassade gedrückt wurden. Eine Radaruntersuchung ergab, dass der Ringanker Teil eines Rosts aus Stahlträgern war, der in die Decke über dem überwölbten Erdgeschoss eingebaut war [25].

Der Ausbau des Stahlwinkels stellte eine Herausforderung dar. Zunächst musste die statische Funktion des Ringankers durch Zugstäbe ersetzt werden (Abb. 23). Diese wurden am vorhandenen Tragrost befestigt und rückverankern als verpresste Gewindestäbe die Außenwände nach innen (Abb. 25, 26). Erst danach konnte der korrodierte Stahlwinkel Stückweise freigelegt und ausgebaut werden.

Teil der Maßnahme war dann wieder eine konservatorische Überarbeitung der Natursteinoberflächen.



Abb. 22 Westansicht Laiendorf heute

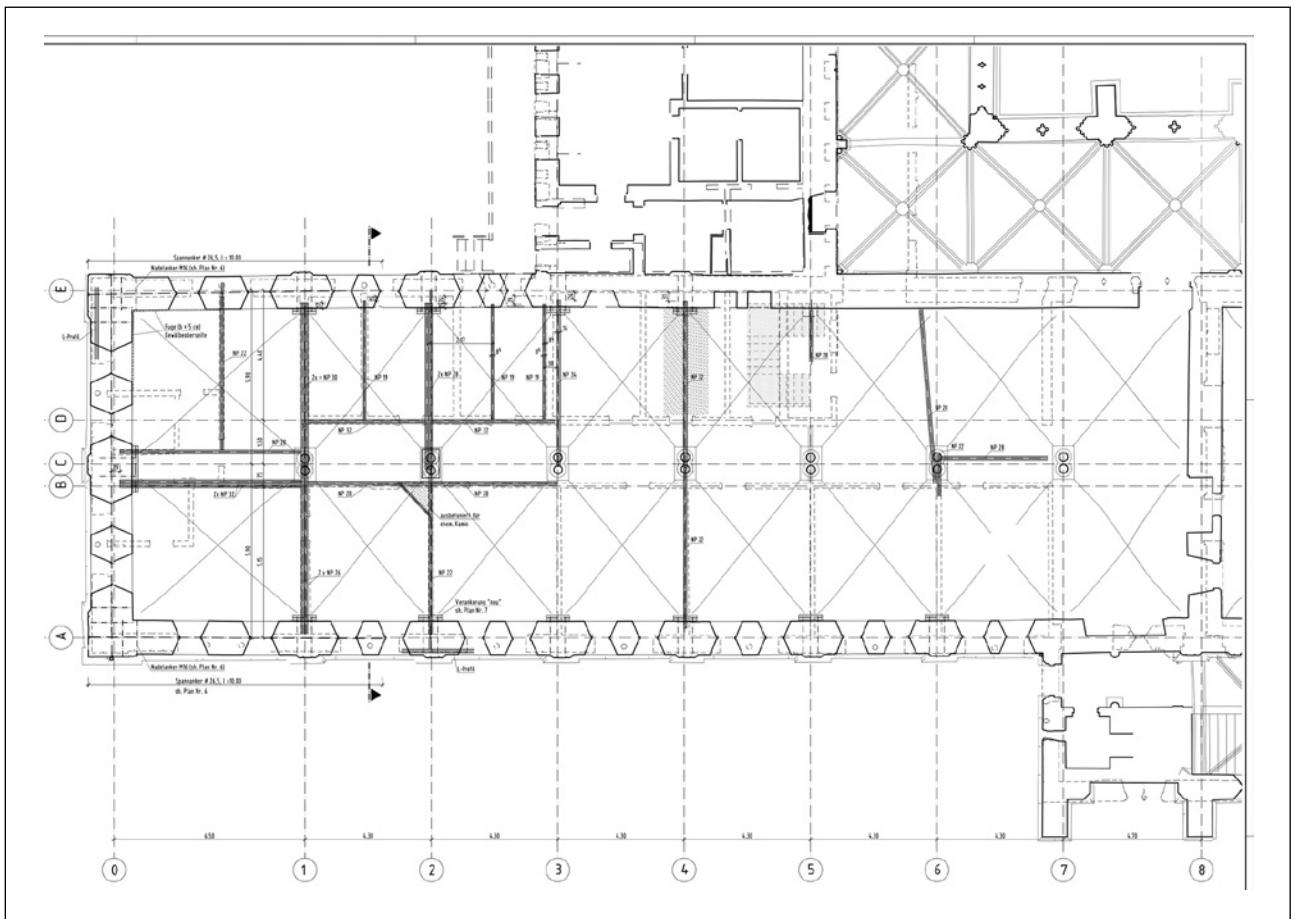


Abb. 23 Statikplan Decke über EG



Abb. 24 Ausbau Gesims zwischen EG / OG



Abb. 25 Rückverankerung innen

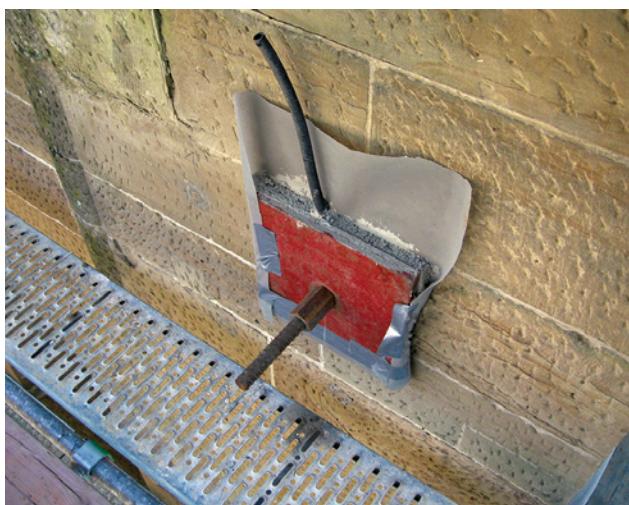


Abb. 26 Rückverankerung außen

13 Ausblick

Während die Arbeiten an Kirche und Kreuzgang abgeschlossen sind, ist der Umbau des Seminars noch voll im Gange. Zwei von vier Hörsälen wurden bereits in Betrieb genommen. Momentan erfolgt der Umbau des Herrendorments mit weiteren Unterrichts- und Arbeitsräumen.

Auch nach Abschluss dieser Maßnahme gehen die Aufgaben im Kloster Maulbronn nicht aus. Das Herrenrefektorium harrt seiner Instandsetzung ebenso wie der Eichelboden, die Klosterapotheke und Teile der Wehranlage.

Nur durch eine gute Zusammenarbeit und einen fruchtbaren Austausch zwischen den Projektbeteiligten kann der Erhalt unseres Kulturerbes für die Nachwelt sichergestellt werden. Wir hoffen, dass uns dies auch weiterhin gelingen wird, und danken allen, die bisher dazu beigetragen haben.

Literatur

- [1] Mueller, C.; Stober, K.: Kloster Maulbronn. Berlin, München 2011.
- [2] SFB 315 Universität Karlsruhe (Hrsg.): Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Jahrbuch 1993. Berlin 1996.
- [3] Leroux-Dhuys, J.; Gaud, H.: Die Zisterzienser. Geschichte und Architektur. Köln 1998.
- [4] Knapp, U.: Das Kloster Maulbronn. Geschichte und Baugeschichte. Stuttgart 1997.
- [5] Rückert, P.; Planck, D. (Hrsg.): Anfänge der Zisterzienser in Südwestdeutschland. Stuttgart 1999.
- [6] Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.): Maulbronn. Zur 850jährigen Geschichte des Zisterzienserklosters. Stuttgart 1997.
- [7] Seminarerphorat Maulbronn; Landesdenkmalamt Baden-Württemberg: Kloster Maulbronn 1178–1978. Maulbronn, Stuttgart 1978.
- [8] Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): Die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg. Abrufbar im Internet, URL: <http://www.vbv.baden-wuerttemberg.de>. Stand 16.12.2014.
- [9] Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): Dienstanweisung der Staatlichen Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg (DAW). Stuttgart 2012.
- [10] Vermögen und Bau Baden-Württemberg (Hrsg.): Der Landesbetrieb Vermögen und Bau Baden-Württemberg. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.vermoegenundbau-bw.de>. Stand 16.12.2014.
- [11] Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg (Hrsg.): Instandsetzung der Klosterkirche und Neubau der Orgel in Maulbronn. Stuttgart 2013.

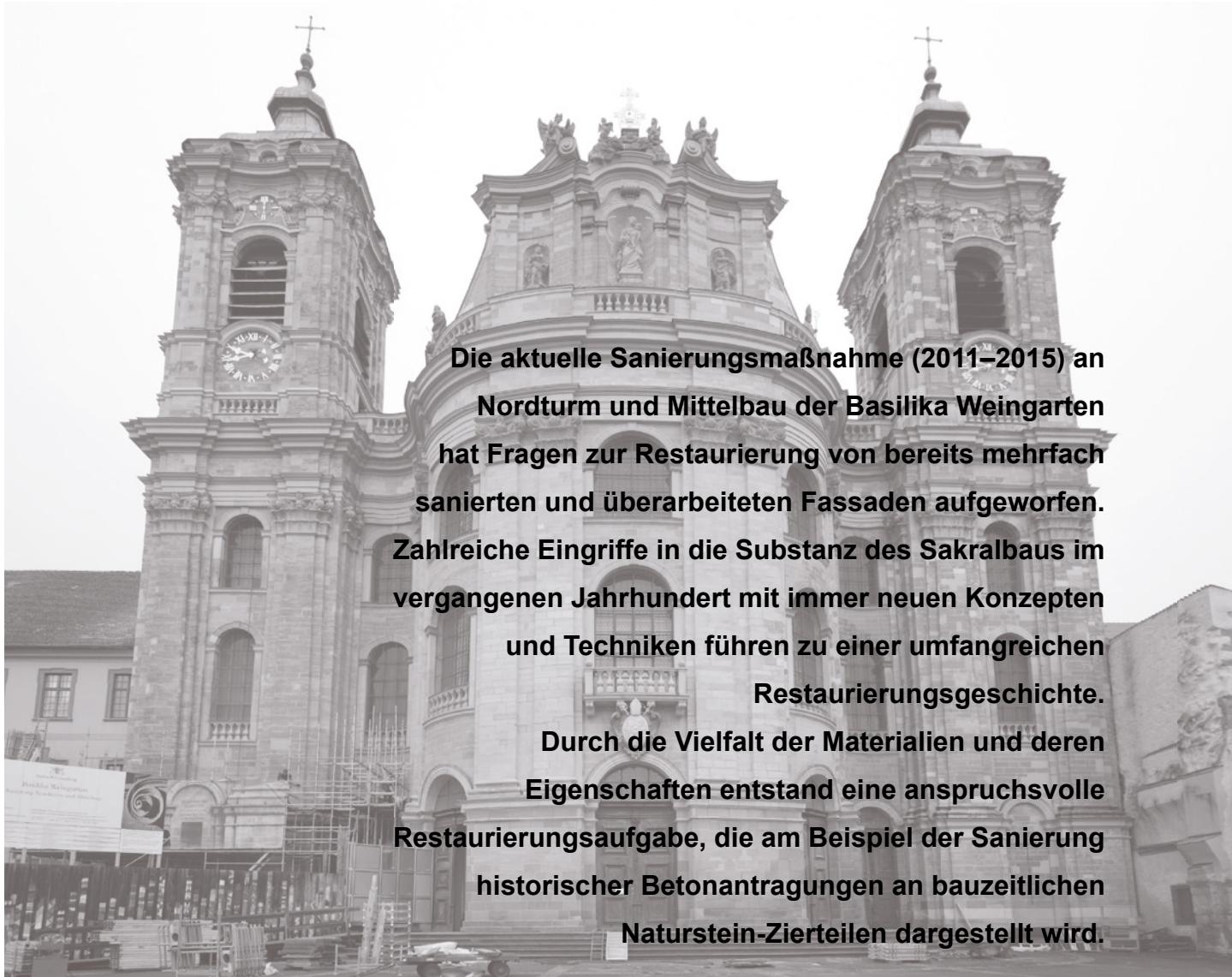
- [12] Architekturbüro Behrens: Schadenskartierung und Fotodokumentation des Klosters Maulbronn – Außenansichten Kreuzgang mit Maßnahmenempfehlungen. Unveröffentlicht. Birkenau 2012.
- [13] AeDis: Kloster Maulbronn. Konservierungsarbeiten am Kreuzgang außen. Unveröffentlicht. Hochdorf 2013.
- [14] Mühle+Friedrich: Klosteranlage Maulbronn. Kreuzgang und Brunnenhaus. Dokumentation Naturwerksteinarbeiten. Unveröffentlicht. Bietigheim-Bissingen 2013.
- [15] Volkmer Restauratoren: Kloster Maulbronn. Westlicher Kreuzgang. Bericht zur Konservierung und Restaurierung. Unveröffentlicht. Aichhalden-Rötenberg 2012.
- [16] Freiburger Münsterbauverein (Hrsg.): Arbeitsdokumentation 2009. Restaurierwerkstatt.
- [17] Stober, K.: Denkmalpflege zwischen künstlerschem Anspruch und Baupraxis. Stuttgart 2003.
- [18] Krebs, E.: Restaurierung des Metallbestandes. Dreischalenbrunnen. Klosteranlage Maulbronn. Unveröffentlicht. Wien 2011.
- [19] Günther, S.: Maulbronn. Dreischalenbrunnen. Bestands- und Zustandsaufnahme; Bericht zur Reinigung; Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen. Unveröffentlicht. Karlsruhe 2011–2013.
- [20] Knoch, P.: Klosterkirche Maulbronn. Bauaufnahme in Genauigkeitsstufe IV. Unveröffentlicht. Heidelberg 2010–2014.
- [21] Büro für Baukonstruktionen: Klosterkirche Maulbronn. Statische Beurteilungen und Berechnungen. Unveröffentlicht. Karlsruhe 2011–2013.
- [22] Strebewerk: Klosterkirche Maulbronn. Natursteinsanierung Langhaus und Paradies. Schadensanalyse und Maßnahmenkonzept. Unveröffentlicht. Stuttgart 2012.
- [23] Hollerung Restaurierung: Maßnahmendokumentation: Naturstein- und Konservierungsarbeiten Klosterkirche Maulbronn. Unveröffentlicht. Reichenbach 2013.
- [24] Paulus, E.: Die Cisterzienser-Abtei Maulbronn. Stuttgart 1890.
- [25] GGU: Messbericht zur Radaruntersuchung. Unveröffentlicht. Karlsruhe 2010.

Abbildungen

- Titelbild: Robert Mehl, Aachen
- Abb. 1: LUBW/LGL/VBBW
- Abb. 2, 3: LMZ
- Abb. 4, 5, 11, 17, 18, 23, 25, 26: VBBW
- Abb. 6: Wolfgang Fischer, Müllheim / Sonja Behrens, Landau
- Abb. 7, 8: AeDis, Hochdorf
- Abb. 9, 10: Peter Volkmer, Aichhalden / AeDis, Hochdorf
- Abb. 12, 16, 22: Dirk Altenkirch, Karlsruhe
- Abb. 13: Peter Oppenländer, Waiblingen
- Abb. 14, 15: Silke Günther, Karlsruhe
- Abb. 19, 20: Hollerung Restaurierung, Reichenbach
- Abb. 21: LAD
- Abb. 24: Büro für Baukonstruktionen, Karlsruhe

Die Sanierung von Nordturm und Mittelbau der Basilika Weingarten

von S. Schädel, H. Zettler, W. Kreisl, D. Coiro, G. Grassegger, T. Läpple



1 VORAB: Das Bauwerk und die Maßnahme

1.1 Baugeschichte

Die Basilika St. Martin und St. Oswald ist eine Wallfahrtskirche nach Vorarlberger Wandpfeilerschema und gilt als größte barocke Basilika nördlich der Alpen [1, 2]. Das Gebäude stellt das geistige und räumliche Zentrum des größtenteils ebenfalls im Barock entstandenen Klosterkomplexes dar. Markant sind die monumentale Tambourkuppel [3] sowie die Doppel-turmfrontfassade, an deren nördlichem Turm und Mittelbau die im Folgenden betrachtete Sanierungsmaßnahme durchgeführt wurde. Der im 10. Jahrhundert errichtete romanische Vorgängerbau wurde im frühen 18. Jahrhundert weitestgehend abgebrochen und 1715 bis 1724 ein neues Gotteshaus gebaut. Als Persönlichkeiten der barocken Baumaßnahme sind Abt Sebastian Hyller sowie die Baumeister Franz Beer und Donato Giuseppe Frisoni zu erwähnen.

1.2 Restaurierungsgeschichte

In der darauf folgenden, regen Restaurierungsgeschichte sind allein für den zu bearbeitenden Bereich der Basilika sieben relevante Maßnahmen dokumentiert. Noch im 19. Jahrhundert wurde zwischen 1888 und 1890 saniert, in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind die dicht aufeinanderliegenden Zeiträume von 1926–1928 und 1930–1932 überliefert. Nach dem 2. Weltkrieg beginnen die Restaurierungen 1954–1955, gefolgt von den Maßnahmen 1965–1967, 1974–1976 und 1985–1988. Zudem ist die 2002–2005 erfolgte Sanierung des Südturmes zu erwähnen [1, 5]. Die letztgenannte, von Büro AeDis konzipierte Restaurierungsmaßnahme am Südturm, diente als Grundlage, das Konzept des Mittelbaus sollte sich ebenso daran orientieren.

1.3 Die Maßnahme an Nordturm und Mittelbau

Nach der Gerüststellung im Jahr 2011 wurden die Schäden an den Natursteinfassaden kartiert, zudem wurde eine Bauphasen- und Materialkartierung angefertigt. Auf dieser Grundlage wurde eine Maßnahmenkartierung entwickelt. Dabei wurde bald der Bedarf zusätzlicher restauratorischer wie auch naturwissenschaftlicher Voruntersuchungen klar. Die Schäden am Nordturm waren größer und teils andersartig als am Südturm, zudem wiesen die Betonantragungen verschiedene Rissbilder und starke Materialalterungen auf. Dies veranlasste uns, neben der Identifikation der Materialien, eine umfassende Beurteilung der Stein- und Betonsubstanz vorzunehmen. Zudem musste die Materialwahl für Steinaustauschungen neu diskutiert werden und die Tragfähigkeit verschiedener Partien überprüft werden, so dass rasch ein

unvorhersehbares umfangreiches Untersuchungsprogramm nötig war. Parallel wurde mit der Bearbeitung der bereits geklärten Eingriffe begonnen, um die Bauzeit so kurz wie möglich zu halten.

Grundlegende Zielsetzungen für die Sanierung an der Basilika Weingarten waren die Wiederherstellung der Verkehrssicherheit und Bewahrung der historischen Bausubstanz, soweit dies nach heutigem Stand der Restaurierungstechnik möglich und wirtschaftlich vertretbar ist. Für die Ausführung brachten zahlreiche Firmen ihr handwerkliches Können mit ein: Neben sehr anspruchsvollen Konservierungsarbeiten an verschiedenen Sandstein- und Betonvarietäten standen umfangreiche Steinerneuerungsarbeiten an. Als weitere maßgeblich beteiligte Gewerke sind die restauratorischen Klempnerarbeiten, Metall-, Fenster- und Putzrestaurierungsarbeiten zu nennen. Zudem wurde der enge Kontakt zum Landesamt für Denkmalpflege gesucht: In regelmäßigen Besprechungen vor Ort wurden die Beobachtungen, Untersuchungsergebnisse und ungeklärten Problematiken diskutiert. Durch diese unabhängige Beratungsinstanz konnten Entscheidungen qualifizierter und reflektierter getroffen werden, wofür nicht zuletzt Querverweise zu vergleichbaren Projekten und Untersuchungen beigetragen haben.

Als Voruntersuchungen wurden an der Basilika neben den bereits erwähnten Kartierungen der Natursteinflächen auch die Schäden an der weitgehend bauzeitlichen Kupferabdeckung des Turmhelms sowie an den Fenstern erfasst. Ebenso wurde zum Abgleich und zur Ergänzung der Restaurierungsgeschichte Archivrecherche betrieben. Die Untersuchung der angetroffenen Bausubstanz umfasste unter anderem folgende Schritte: Bohrkernentnahmen und Sondageöffnungen, die Beurteilung des Langzeitrissmonitorings durch den Tragwerksplaner, Erfassen der Bewehrungstypen und -dichte, Ermitteln bauphysikalischer, materialtechnischer und bauchemischer Parameter an verschiedenen Steinmaterialien, den geschädigten Betonen und Georadaruntersuchungen.

Daraus wurde eine neue Strategie der materialspezifischen Sanierung entwickelt. Betonbauteile wurden mit hochwertigen Betonsanierungsmethoden saniert. Natursteinbereiche mit Natursteintechniken und großflächige Betonsanierungen auf Naturstein wurden mit Verfahren, die auf optimalen Oberflächenerhalt abgestimmt waren, saniert. Da zahlreiche geschädigte Bewehrungen vorlagen, mussten auch Antikorrosions- und Bewehrungssanierungen vorgenommen werden. Die Anwendung wurde für jeden Einzelfall festgelegt und die entwickelten Methoden ausführlich auf Machbarkeit und Verträglichkeit getestet.

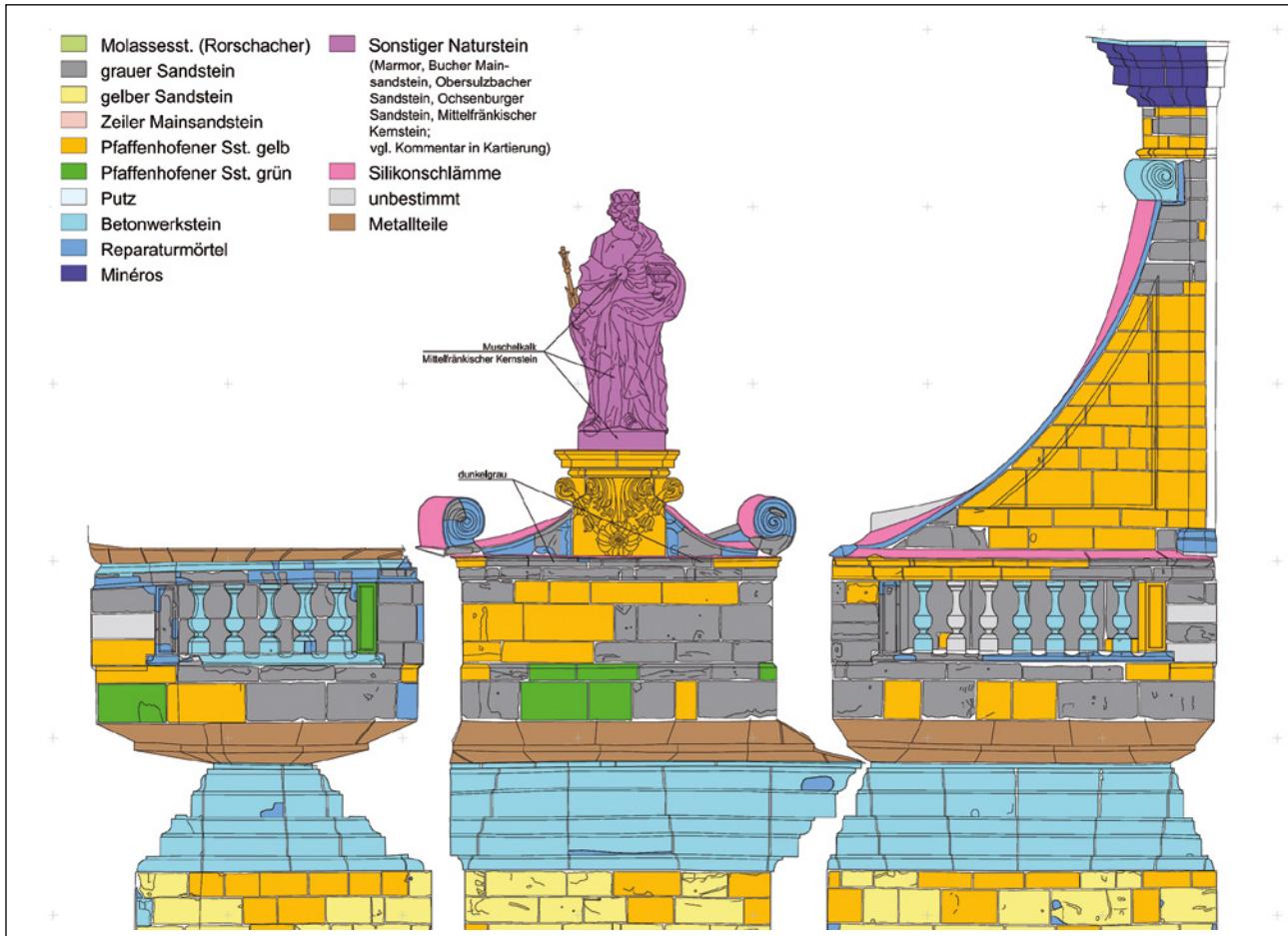


Abb. 1 Ausschnitt aus der Materialkartierung, nördlicher Mittelbau, Bereich St. Oswald (strebwerk., 03/2012)

2 ALLES: Der Umgang mit der Vielzahl an Bauphasen und Materialien

2.1 Der inhomogene Bestand

Die Restaurierungsmaßnahmen seit 1888 wurden allesamt jeweils mit unterschiedlichen Herangehensweisen, Materialien und Techniken durchgeführt. Die Materialkartierung (Abb. 1) zeigt die inhomogene Bausubstanz der Fassade sehr deutlich.

Durch die vielen Bauphasen und die jeweils unterschiedlichen Materialien wird die Fassadensanierung der Basilika Weingarten zu einem komplexen Problemfall (Abb. 2). Durch die Vielzahl an Steinmaterialien ergeben sich schnell über 100 Materialkombinationen, für die jeweils bei den unterschiedlichen auftretenden Schadensphänomenen eine in den Grundzügen vorhandene Herangehensweise überprüft, diskutiert, oft auch modifiziert werden musste. Problematisch ist nämlich selten die Restaurierung eines Materials allein, sondern vielmehr die Übergänge und Wechselwirkungen zwischen Materialien.

Exemplarisch sei auf großflächige, teils armierte Beton- und Kunststeinantragungen am Objekt hingewiesen, die auf stark saugendem und absandendem



Abb. 2 Vorzustand – der angetroffene Materialmix, auf diesem Bild mindestens drei Naturstein- und drei Kunststeinvarianten, zudem verschiedene Fugenmörtel. Materialien und Schäden überlagern sich vielfältig. Nordturm Nordwestecke, Gesims D (Höhe ca. 27 m)

Molassesandstein auf Null auslaufend vorliegen. In den Rand- und Übergangszonen zersetzte sich der Stein verstärkt, die Antragung bleibt im günstigen Fall als hohlliegende Schale erhalten. Das Problem des Materialübergangs lässt sich z.B. durch eine Vierung



Abb. 3 Nicht hinterfüllter Steinaustausch der 1980er Jahre, Sondageöffnung am Mittelbau



Abb. 4 Herausgefallener Fugenmörtel der 1980er Jahre von einem Gesimsprofil, aufgefangen von einem Taubenabwehrnetz am Mittelbau



Abb. 5 Nicht hinterfüllte Steinaustauschungen der 1980er Jahre, Sondageöffnung Kapitelle Mittelbau



Abb. 6 Vorzustand – Hydrophobierungsschäden der 1980er Jahre, Hauptkranzgesims Mittelbau, dünne Schalenbildungen bis in die Tiefe der Hydrophobierung

oder Antragung nur entschärfen, jedoch nicht beheben. So musste hier im Einzelfall lokal vom Bauteam entschieden werden, welches Sanierungskonzept zum Tragen kommt.

2.2 Sanierungsprobleme

Es lagen weitere Sanierungsprobleme vor, die angegangen werden mussten. Im Folgenden seien exemplarisch vier Punkte (A bis D) genannt. Die Fassadenfläche am Mittelbau der Basilika schien einen relativ geringen Restaurierungsaufwand zu bergen: Die augenscheinlichen Schäden vor der Gerüststellung waren klein, die letzte Sanierungsmaßnahme lag erst rund 25 Jahre zurück. Augenscheinlich wurde am Mittelbau in den 1980er Jahren sehr gründlich ausgetauscht und die noch verbliebenen bauzeitlichen Steine flächig abgearbeitet, so dass an der Fassade faktisch keine historischen Oberflächen mehr vorhanden waren. Doch mit jeder Sondage und Untersuchung wurde deutlicher, dass sich die Konzeption für die Sa-

nierung am Mittelbau der Basilika ebenso aufwendig und komplex darstellt wie am Nordturm.

A: Die großen Steinaustauschungen mit Einzelflächen von bis zu ca. 10 m² wurden damals eher im Sinn einer vorgeblendeten Fassade ausgeführt, allerdings ohne Verbund mit dem Kernmauerwerk (Abb. 3).

B: Die Hohlräume zwischen den Neuteilen und dem Bestandsmauerwerk wurden zudem nicht verfüllt.

C: Der Fugenmörtel war eine Einkornmischung, die bei den sägeglatten Fugenflanken der Neuteile kaum Anhaftung hatte (Abb. 4).

D: Auch exponierte Teile wie die Kapitelle, die damals vollkommen neu hergestellt wurden, hatten nur eine spärlich eingelegte Verklammerung mit Gewindestangen, die allerdings lediglich die einzelnen Steine untereinander koppelte – eine Rückverankerung war auch hier nicht vorhanden (Abb. 5). Für die aktuelle Maßnahme bedeutete dies einigen Mehraufwand. Die tatsächliche Ausdehnung der Hohlstellen wurde mittels Georadar überprüft und die Sicherungskon-

zeption daraufhin abgestimmt. Als wesentliche Maßnahme wurde eine Anbindung der Verblender an das Kernmauerwerk durch Vernadelungen durchgeführt. Im Bereich des Frontispiz wurden die Hohlräume zudem mit Verfüllmörtel geschlossen.

Als weitere problematische Altmaßnahme muss die flächige Hydrophobierung des Mittelbaus im Zuge der Sanierungsmaßnahme in den 1980er Jahren erwähnt werden. Die Hydrophobie hatte in Teilbereichen der Fassade typische Schäden verursacht (Abb. 6), was wiederum Ursache von Folgeschäden war. Auf den verschiedenen Steinmaterialien hat sich die hydrophobe Imprägnierung im Lauf der letzten ca. 25 Jahre sehr unterschiedlich abgebaut und ist in Teilbereichen noch stark wirksam. Da die Steinschäden insbesondere an den Steinquadern der letzten Sanierungsmaßnahme angetroffen wurden, fiel die Entscheidung hier viel geschädigte Substanz zu erneuern. Die hydrophoben Oberflächen erlaubten grundsätzlich für die aktuelle Sanierung kein Arbeiten mit wässrigen Konservierungsmaterialien bzw. -systemen. Im Zuge der aktuellen Maßnahme wurden zudem die neuen Oberflächen wie Vierungen, Neuteile und Deckmörtel (notgedrungen zur bauphysikalischen Angleichung) wieder hydrophob eingestellt, um eine vermehrte Wasseraufnahme der Fassade über die erneuerten Teilbereiche zu verhindern.

Hier sei noch am Rande auf die umfangreiche Konzeption zur Steinkonservierung sowie zu den Natursteinarbeiten hingewiesen, deren Vorbereitung, Abstimmung und Bemusterung einen wesentlichen Teil der konzeptionellen Arbeit an der Fassade der Basilika Weingarten darstellt. Die Kooperation im Team aus Bauherr, Planer, Ingenieuren, Ämtern und ausführenden Handwerkern wäre einen eigenen Beitrag wert.

3 NEU: Spezielle Probleme der Sanierungs-Sanierung am Beispiel des Umgangs mit historischen Betonantragungen

3.1 Konzeption

Die restauratorische Überarbeitung relativ neuer Materialien im historischen Bestand birgt häufig einige Probleme, wie bereits im Vorfeld dargestellt wurde. Im Folgenden soll, exemplarisch für die aufwendige Arbeit der Sanierungskonzeption bereits mehrfach sanierte Flächen, die Betonsanierungskonzeption dargestellt werden.

Gemeinsam mit Restauratorin Frau Larisch und der HFT-Bauchemie wurde ein umfangreiches Untersuchungskonzept zum Zustand des historischen Betons und Kunststeins erarbeitet. Dieses umfasste

1. die optische Bewertung des Betons „Betonenschäden“,
2. die Entnahme von Mikroproben für das chemische Labor und Untersuchung auf Zementphasen, Zuschläge, Ausblühungen, Salzbildungen, Zersetzung etc.,
3. Probeöffnungen mit Messung der Karbonatisierungstiefe mittels Phenolphthaleinfärbung (Abb. 7–10).

Am Naturstein: Nachweis der Hydrophobierung mit Abperleffekt und Wasseraufnahme, Nachweis der Hydrophobierung mit chemischen Methoden (Sommer 2012, HFT und Partnerlabor).

Nach erfolgter bauchemischer und restauratorischer Bewertung des historischen Betons mit und ohne geschädigte Natursteine (vier Untersuchungskampagnen der HFT-Stuttgart, Bauchemielabor), wurden diese Bauteile mit betontechnologischen Techniken „saniert“. Es liegen hier inzwischen Materialkombinationen und „Verbundwerkstoffe“ von dem gealterten hochporösen Natursteinen bis zu „Betoneteilen“ und bewehrten Betonvorsatzschalen vor, die es so weit wie möglich zu erhalten galt. Im Betonbereich wurde deshalb eine Betonsanierung mit der Zielsetzung hohe Dichtigkeit, CO₂-Sperre, Karbonatisierungsschutz und Korrosionsschutz für Bewehrungen gewählt, die nachfolgend umrissen wird.

Es kamen die Techniken zur Behebung der Schäden im Beton nach der DIN EN 1504, hier drei ausgewählte Verfahren, zum Einsatz:

1. Prinzip 3 (CR = Concrete Restoration), d. h.
 - a. Mörtelauftrag von Hand
 - b. Querschnittergänzung durch betonieren mit Reprofilierungssystemen
 - c. Wo absolut erforderlich, und sehr stark karbonatisiert und geschädigt: Auswechseln von Betonteilen.
2. Kombiniert mit Prinzip 2 (MC = Moisture Control – (frei übersetzt) Schutz vor eindringendem Wasser), bestehend aus:
 - a. einer Oberflächenbeschichtung
 - b. wo nötig Schutzdächer oder Verkleidung.
3. Vereinzelt Prinzip 4 (SS Structural Strengthening): Zufügen oder Auswechselung von Bewehrungsstahl

Die detaillierte Materialauswahl und Vorgehensweise wird unten dargelegt. Vorher werden einige „Betonenschäden“ im Detail vorgestellt (Abb. 7–10).



Abb. 7 Kapitell aus Beton stark geschädigt: geöffnete Schwindrisse, Oberflächenkorrosion, Karbonatisierung, z. T. abgelöst, Nordturm Südseite. Vorzustand



Abb. 8 Zeigt die Kontrolle des alkalischen pH-Werts an frisch freigelegten Antragsmassen: erst ab ca. 1 cm Tiefe, um einen Kunststoffanker, ist der Zement intakt, der erste Zentimeter ist karbonatisiert, Mittelbau Nordseite



Abb. 10 Der in Rissbereichen (Schwindrisse, Krakelee) stark ausblühende Beton und die klaffenden Risse in den Betonantragungen sind sehr gut zu erkennen. Vorläufige Messung/Suche von weiteren Metallbewehrungen in Antragsmassen mit Metalldetektor



Abb. 9 Sondagebefund: Unkonventionelle Bewehrung am zweischichtig aufgebauten Betongesims, das unvermittelt in Natursteinpartien übergeht. Nordturm Westseite

3.2 Bewehrungsnachweise in Kranzgesimsen aus Beton

Da sich das Betonsanierungsverfahren mit dem Zustand und Art der Bewehrung stark ändert, war die Suche nach den alten Bewehrungseisen (hier Betonstahlstäbe) mittels Detektor Ferroscan, Fa. Hilti, veranlasst worden. Sie wurde durch die ÖBP an der HFT durchgeführt (Bericht 238/2012 vom 14.8.2012). Es wurden in den Kranzgesimsen aus Beton in ca. 30–90 mm Tiefe zahlreiche Eisen gefunden, diese lagen ganz unregelmäßig: je nach untersuchtem Bereich in Abständen von ca. 10 cm. Bei einer Sondageöffnung verschiedener Bereiche wurde eine sehr variable Bewehrung gefunden: von Flacheisen unter Kragteilen bis zu Drahtbewehrungen von komplexen Gebilden wie Akanthusblättern. Die Stahleinlagen wurden jeweils einzeln bewertet und auf deren Zustand wurden



Abb. 11 Rückverankerungen von Betonteilen, die ausgebaut wurden.
Nordturm Nordseite



Abb. 12 Vortest zur Betonsanierung – Bemusterung einer Sika-Mörtelantragung (SikaQuick 506 FG) am Hauptkranzgesims, Nordturm Westseite

die Sanierungstechniken abgestimmt (Beispiel der Befunde: Bericht Schädel: Eisenteile in Kunststeinantragungen, 12.11.12; Abb. 11)

3.3 Detaillierte Darstellung der Betonsanierung

Aufbauend auf die komplexe Situation wurde eine hochwertige Produktserie ausgewählt, die alle Arbeiten an den geschädigten Betonen ermöglichte, von Bewehrungsschutz, umfangreichen Antragungen, Rissverschluss bis feinen Reprofilierungsmörteln. Zum Abschluss wurde ein Oberflächenschutzsystem ausgewählt, das den Beton und die Bewehrung für lange Zeit schützen sollte. Alle diese Produkte wurden am Bau im Realfall getestet und wie folgt ausgewählt.

Nach Bewertung verschiedener Produkte, wurde die Sika-Produktpalette ausgewählt, die allen Anforderungen genügte, ein bewehrtes zugelassenes System der ZTV-Ing darstellt und eine hohe Dauerhaftigkeit gewährleistet.

Variante A – Wiederaufbau auf abgetragenem Beton, auf freigelegter und vorbehandelter (entrosteter) Bewehrung:

1. Sika MonoTop 601 Neu: **Korrosionsschutzbehandlung** für die Bewehrung, ≥ 1 mm Schichtstärke, auf entrostetem Stahl.
2. Sika MonoTop 602: **Haftmörtel**, Grobmörtel, 1-komponentige Feinzement-Trockenmischung mit Kunststoffzusätzen (PCC), er erzeugt eine hochzugfeste Haftbrücke zum alten Beton, wird als Haftbrücke für den MonoTop 603 benötigt.
3. Sika MonoTop 603: Grobmörtel, auf Stellen mit MonoTop 602, mit Faserzusätzen, dies ist ein polymervergüteter Mörtel (PCC) mit dem größere

Schichtstärken aufgebaut werden können. Er ist auch für Überkopfarbeiten geeignet.

4. **Anstrichsystem**: hier waren für die sanierten Bereiche auf Beton die Oberflächenschutzsysteme OS-A bis OS-D denkbar. Zum Einsatz kam Sika-gard-550 Elastoflex W, eine rissüberbrückende, dicke Beschichtung, Acryl-Dispersion für Sichtbeton, auch bei Minusgraden stabil, sehr guter CO₂-Widerstand.
5. Abschließend wurde zur farblichen Abstimmung auf die verschiedenen Beton- und Betonrestaurierungsmassen teilweise auch auf Naturstein, auf der Oberfläche „Remmers Schlämmlasur“ in einem auf den Südturm abgestimmten Grauton aufgebracht.

Bei vielen kleinen Ausbesserungen wurde die **Variante B**, d.h. Wiederaufbau auf abgetragenem Beton, auf freigelegter und vorbehandelter (entrosteter) Bewehrung, als vereinfachtes Vorgehen genutzt. Arbeitsabfolge:

1. SikaQuick 506 FG, ein Mörtelsystem, das bereits die Korrosionsschutzbehandlung und die Haftbrücke enthält.
2. Hierauf erfolgte der Ausgleichsspachtel Sika MonoTop 622
3. sowie das oben genannte OS-Beschichtungssystem
4. und zum Abschluss die Schlämmlasur (wie oben genannt).

3.4 Statische Sicherungen

Die Lage, der Zustand und die Funktion der identifizierten Alt-Bewehrungen (vgl. 3.2) wurden vom Tragwerksplaner IGB/Stuttgart bewertet. Die IGB kam zu

der Auffassung, dass nur Bereiche mit zu geringer Mindestdeckung mit Beton überarbeitet werden müssen (Abb. 10–14). Die Schädigungen der Betonsubstanz konnten damit weitestgehend konservatorisch angegangen werden.

Problematisch waren bei genauer Analyse weniger die Betonantragungen an sich, sondern vielmehr die Verbindung zum Untergrund. Kleinteilige Ergänzungen ohne ausreichenden Verbund (Abb. 13) mussten abgenommen werden, größere Betonantragungen und Gussformen konnten jedoch durch ergänzende Vernadelungen und ein entsprechendes Oberflächenschutzsystem (vgl. 3.3) erhalten werden (Abb. 15).

3.5 Der sanierte Zustand

Die gesamte Sanierungsmaßnahme erstreckte sich über einen Zeitraum von rund vier Jahren, in denen ca. 2.500 m² Fassade saniert wurden. Hauptsächliche Maßnahmen waren nach der Reinigung der Fassade die Natursteinarbeiten (ca. 1.000 Vierungen und Neuteile) sowie die klassische Natursteinkonservierung. Die Beschreibung dieser ebenso interessanten Maßnahmen würde allerdings den Rahmen des Beitrags sprengen. Die Abbildungen 15, 16 und 17 geben den sanierten Zustand wieder und zeigen die enorme, teils verborgene Materialvielfalt der Fassade auf.

4 BEDENKEN: Kritische Reflexion der Maßnahme und Fragen für die Zukunft

4.1 Rückblick

Bedenkt man die zahlreichen Arbeitsschritte und Maßnahmen der vergangenen Jahre an der Basilika Weingarten, wird vor allem eines klar: Der fachgerechte Umgang mit der wechselhaften Restaurierungsgeschichte der Natursteinfassaden war und wird aufgrund der vielen verschiedenen Baumaterialien des Bestandes für zukünftige Sanierungen eine große Herausforderung bleiben. Es wurde versucht, in den vergangenen drei Jahren einen Umgang mit der Substanz zu finden, der sowohl denkmalpflegerischen Belangen als auch den Anforderungen von Seiten der Tragwerksplanung, der Nachhaltigkeit und dem vorhandenen Zeit- und Kostenrahmen gerecht wird. Dass dabei Kompromisse eingegangen werden mussten, liegt bei Betrachtung der Aufgabenstellung auf der Hand. Kostenmanagement, Bauzeiten und Ausführungsqualität stehen in unmittelbarer Abhängigkeit voneinander. Daher muss das Ergebnis der Sanierungsmaßnahme wohl an der Balance zwischen diesen Faktoren gemessen werden.

Es bleiben auf jeden Fall aus technischer Sicht nicht optimal gelöste Punkte. Es sind zwei Probleme, die am Mittelbau nicht nachhaltig geklärt werden konnten: Die vorgeblendeten Steinerneuerungen aus den 1980er Jahren sind zwar jetzt vernadelt und damit ausreichend statisch gesichert worden, ein monolithischer Verband wäre allerdings die bessere, weil dauerhaftere Lösung gewesen. Diese konnte am exponiertesten Bereich, nämlich am Frontispiz, durch eine umfangreiche Hohlraumverfüllung ausgeführt werden. An der Fläche darunter war auf dieses Verfahren, teils aus Kostengründen, teils aus Sorge um eine Beschädigung der im Innenraum befindlichen Gabler-Orgel verzichtet worden. Eine Erneuerung der dünnen Steinplatten durch massive Quader mit einer konsequenten Verzahnung wäre die hochwertigste, jedoch auch aufwendigste Lösung dieser Situation gewesen – in Anbetracht der großen Materialmenge allerdings finanziell nicht vertretbar. Das zweite Problem, die Hydrophobie auf der Fassade des Mittelbaus, ist nach den anerkannten Regeln der Technik und nach dem aktuellen Merkblatt WTA „Hydrophobierung“ bearbeitet worden: Die bestehende, in Teilen noch sehr wirksame Hydrophobie wurde nicht überarbeitet, neu eingebrachte Neuteile und Vierungen wurden allerdings wieder hydrophobiert und der Fugenmörtel porenydrophob eingestellt. Versuche die Hydrophobie mit einem sogenannten Hydrophobierungscracker zu lösen, blieben leider erfolglos. Ein umfangreiches Forschungsprojekt im Rahmen der Maßnahme konnte leider aus finanziellen und terminlichen Gründen nicht verfolgt werden. Hier bleibt die Hoffnung, dass mit der aktuell stattfindenden, durch die DBU geförderten wissenschaftlichen Erforschung, unter Leitung der HFT-Bauchemie (Grassegger) bei zukünftigen Restaurierungskampagnen Produkte eingesetzt werden können, mit denen die bestehende Hydrophobierung aufgelöst oder zumindest reduziert werden kann.

Eine weitere kritische, zu bedenkende Frage stellt sich nach dem Abschluss der Sanierungsarbeiten: Was kann eine Schadens- und Maßnahmenkartierung bei einer solchen Baustelle leisten und welche Funktion wird der Kartierung zugeschrieben? Beträgtet man die Kartierung und die ausgeführten Maßnahmen, scheinen wir uns hier im Grenzbereich der Sinnhaftigkeit einer Schadens- und Maßnahmenkartierung zu bewegen. Unbestritten ist es gerade bei komplexen Schadensüberlagerungen wichtig, die Phänomene zu erfassen und sich vor Ort intensiv mit der Fassade auseinanderzusetzen. Für Ausschreibung und Massenermittlung kann die



Abb. 13 Befund: Offensichtlich ungenügende Bewehrung einer früheren Kunststeinantragung, der Bruch weitgehend im historischen Steinkern



Abb. 14 Korrodierte Bewehrung einer Kunststeinantragung, Einbund in den Stein: i. d. R. ca. 2 cm

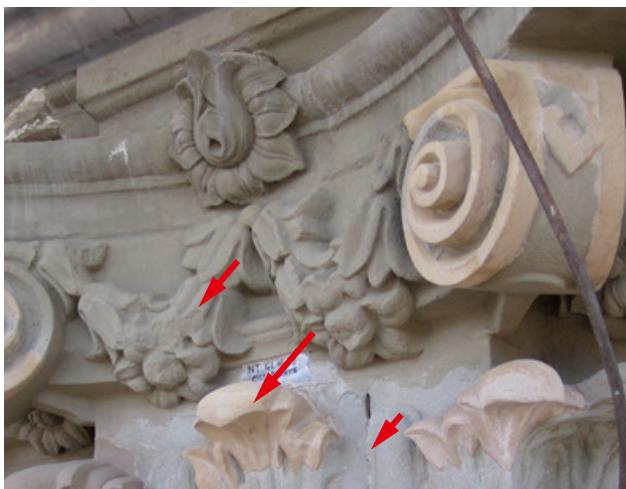


Abb. 15 Konservierung des nördlichen Kapitells auf der Ostseite am Nordturm – Molassesandstein (kurzer Pfeil), Beton (mittlerer Pfeil), Restauriermörtel Sika MonoTop 603 (langer Pfeil), um die Kleinteiligkeit und den schnellen Materialwechsel zu zeigen. Zwischenzustand



Abb. 16 Konservierung des nördlichen Kapitells (Material: Naturstein, Restauriermörtel, Beton) auf der Ostseite am Nordturm – mit Remmers Schlämmglasur überzogen. Endzustand

Kartierung in diesem Fall allerdings nur ein bedingt hilfreiches Instrument sein. Auch als Informationsmedium zwischen Planer und ausführendem Handwerker kann die Maßnahmenkartierung nicht alleinige Maßgabe sein. Alle beteiligten Firmen müssen bei einer solchen Maßnahme denkmalerfahren sein. Sie erkennen selbstständig erforderliche Abweichungen von der Kartierung und bringen diese Modifikationen in die Baubesprechungen ein. Damit wird ein konsequentes Fortschreiben der Kartierungen und eine umfassende Dokumentation der ausgeführten Maßnahmen umso wichtiger.

Als letzten Aspekt kritischer Reflexion ist festzustellen, dass das, was früher richtig schien, heute falsch sein kann – man denke allein an Stichworte wie Asbest und Amalgam.



Abb. 17 Endzustand, Nordturm Nordwestecke

Die Arbeiten an der Basilika Weingarten sind dadurch, dass viele Maßnahmen eine Rückbesinnung auf althergebrachte handwerkliche Traditionen darstellen, haltbarer und besser zu konservieren als experimentelle moderne Methoden. Dazu zählen die konstruktiven Ertüchtigungen des Mauerwerks durch qualitätvolle Naturwerkstein-Erneuerungen ebenso wie z.B. dem Schutz der Fassade durch das kontrollierte Ableiten des Wassers über Verblechungen. Allerdings mussten wir neben diesen tradierten Techniken zwangsläufig auch auf moderne Materialien wie acrylatvergütete Produkte, Epoxidharze und Beton-sanierungsmassen zurückgreifen. Damit ist die Sanierung der Basilika Weingarten eine zukunftsträchtige und nachhaltige Maßnahme zur Erhaltung des Bauwerks. Durch regelmäßige Wartungen wird der Erfolg der Maßnahme erhalten und damit der Zyklus umfangreicher Restaurierungsmaßnahmen deutlich verlängert.

4.2 Ausblick

VORAB ALLES NEU BEDENKEN – diese Aufforderung gilt allen Beteiligten bei der Sanierung eines historischen Gebäudes. Die Erfahrungen an der Basilika Weingarten haben einmal mehr gezeigt, dass Denkmalpflege individuelles und interdisziplinäres Agieren und Reagieren auf immer wieder neue Herausforderungen bedeutet. Bestehende Restaurierungskonzepte für noch so ähnlich scheinende Aufgaben lassen sich nicht ohne entsprechende Anpassungen übertragen. Spezielle Themen wie u.a. die Betonkonservierung sind zwar nicht neu, werden uns in den nächsten Jahren jedoch immer intensiver beschäftigen. Dabei sind insbesondere unregelmäßige, filigrane Freiformen aus Beton und die Kombination von Beton mit Naturstein bislang wenig behandelte Themen.

4.3 Dank

Für uns war diese Aufgabe eine nicht alltägliche Herausforderung und gleichermaßen ein besonderes Privileg an einem so bedeutenden sakralen Kulturdenkmal wie der Basilika Weingarten in Oberschwaben mitgewirkt zu haben. Die Begegnung im Denken, Handeln und Ausführen der damaligen großen Baumeister war allgegenwärtig und immer spürbar.

Dass es gelungen ist, das anspruchsvolle Projekt im Termin- und Kostenrahmen abzuwickeln, ist das Verdienst aller am Projekt beteiligten. Mit Fachkunde, Kompetenz und großem Engagement haben Bauherr, Planer und Ingenieure eine beachtenswerte Teamleistung vollbracht. Ein außerordentlicher Dank gilt den beauftragten Handwerksbetrieben und Restauratoren, die ihr jeweiliges Gewerk hervorragend beherr-

schen und Handwerkskunst auf ganz hohem Niveau praktizieren. In Verbindung mit der Thematik dieses Beitrags sind insbesondere Fa. Herbst, Fa. Bauer-Bornemann, Fa. Renovum und Fa. Huber zu nennen. Zudem gilt ein besonderer Dank dem Landesamt für Denkmalpflege für die regelmäßige und konstruktive Zusammenarbeit: Frau Beata Hertlein als Gebietsreferentin sowie Herr Rolf-Dieter Blumer (LAD, Metallrestaurator, Metallurge) und Herr Otto Wölbert (LAD, Steinrestaurator). Über diese genannten Personen hinaus war ein weiter Kreis an Firmen, Ingenieuren und Behörden in die Sanierungsmaßnahme eingebunden, die zum Gelingen der Maßnahme beigetragen haben. Ihnen allen gilt ein besonderer Dank.

Auf der Grundlage dieser Dokumentation wünschen wir interessante Diskussionen und viele neue Erkenntnisse.

Literatur

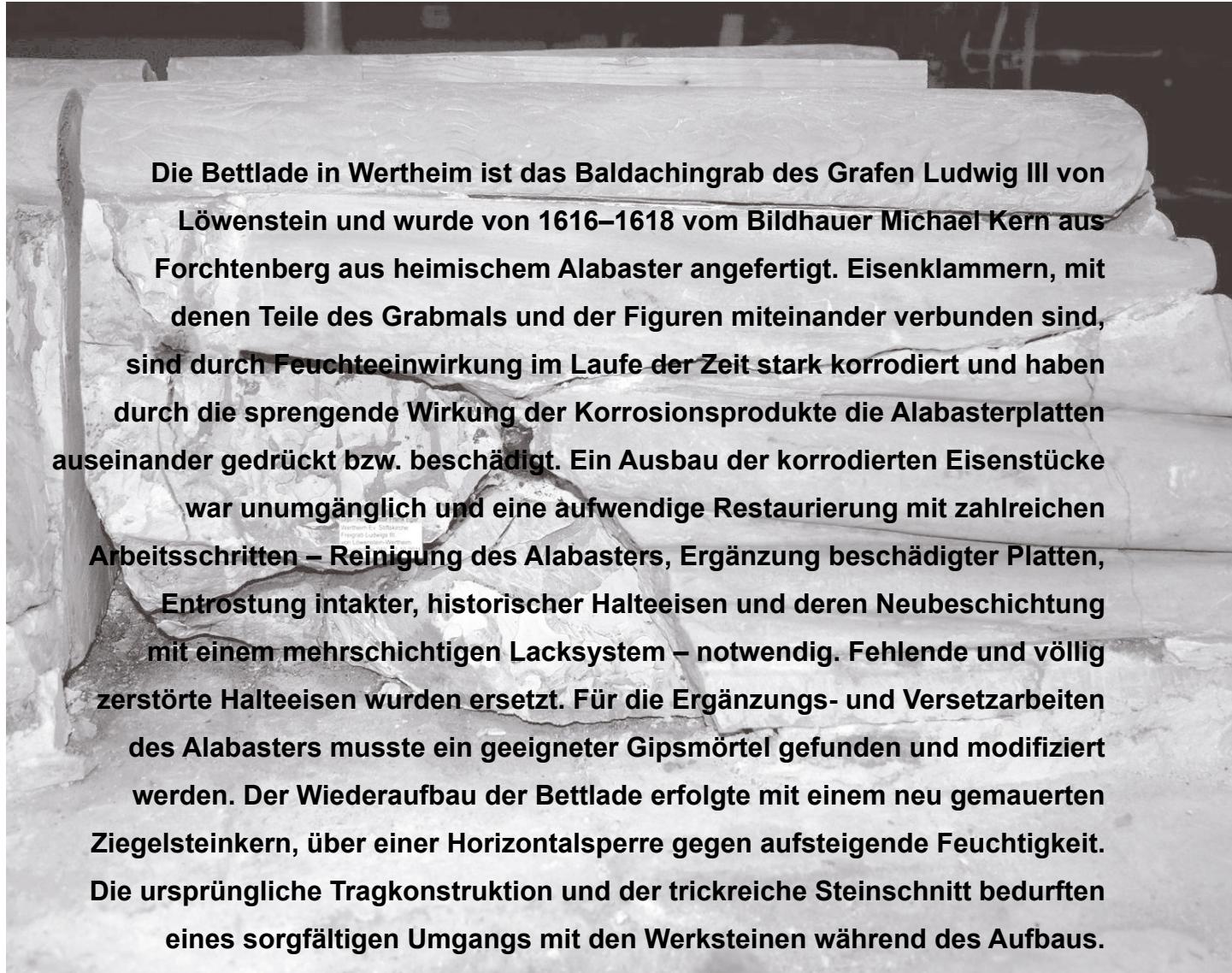
- [1] Beck, O.; Buck, I. M.: Barockbasilika Sankt Martin und Sankt Oswald Weingarten. Lindenberg, Verlag Josef Fink 2013.
- [2] Dehio, G.; Zimdars, D. (Bearb.): Baden-Württemberg 2: Die Regierungsbezirke Freiburg und Tübingen (Handbuch der dt. Kunstdenkmäler). München, Deutscher Kunstverlag 1997.
- [3] Regierungspräsidium Stuttgart – Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Die Kuppel der Basilika in Weingarten. Ein interdisziplinäres Projekt zu Konservierung und Restaurierung (Arbeitsheft 20). Konrad Theiss Verlag, Stuttgart 2008.
- [4] Untersuchungsergebnisse, Gutachten und Berichte für die Maßnahme (unveröffentlicht): HFT-Stuttgart, Bauchemie, Bauconsult – Prof. Grassegger/Winnenden, Fr. Larisch, Restaurierungsbüro/Stuttgart, ÖBP an der HFT/Stuttgart, IGB/Stuttgart – Tragwerksplanung, Büro strebe werk./Stuttgart.
- [5] Archivunterlagen Vermögen und Bau Baden-Württemberg Amt Ravensburg, Archiv „Türmle“. Zahlreiche unveröffentlichte Dokumentationen.
- [6] DIN EN 1504: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken, Teil 1–10. Teile erschienen 1997–2007.

Abbildungen

- Abb. 1: Kartierung strebewerk
Abb. 2–6: Stefan Schädel, strebewerk
Abb. 7: Jacek Pochyla, Fa. Bauer-Bornemann
Abb. 8: Sara Larisch, Larisch Restaurierung
Abb. 9–17: Stefan Schädel, strebewerk

Das Baldachingrab des Grafen Ludwig III von Löwenstein aus Alabaster in Wertheim – Problemlösungen zur Restaurierung der Grabanlage

von Friedrich Grüner, Frank Eger



1 Einleitung

Das Baldachingrab des Grafen Ludwig III von Löwenstein in der Stiftskirche in Wertheim (Abb. 1) wird als Bettlade bezeichnet und wurde von 1616–1618 von Michael Kern aus heimischem Alabaster angefertigt. Er entstammt einer Bildhauer- und Steinmetzfamilie und beendete seine Ausbildung, welche zuerst in der eigenen Werkstatt, später beim Heilbronner Bildhauer Jakob Müller erfolgte. Michael Kern gehört zweifellos zu den bedeutendsten Künstlern der deutschen Spätrenaissance. Er war bis zur Übernahme des elterlichen Bildhauerateliers Zunftmeister und Ratsbildhauer in Würzburg [1].

Die Bildhauerfamilie Kern hat ein eigenes, unterirdisch gelegenes Alabasterbergwerk in Forchtenberg besessen, welches nur über einen Zugang durch die Werkstätte der Bildhauerfamilie verfügte [2].

Zahlreiche Metallstifte und Metallklammern, mit denen die Einzelteile des Grabmals und der Figuren miteinander verbunden sind, sind im Laufe der Jahrhunderte sehr stark korrodiert (Abb. 2). Durch die Volumenzunahme der entstandenen Korrosionsprodukte sind Risse und Verfärbungen im Alabaster entstanden. Viele, zum Teil kleinteilige Alabasterstücke wurden auseinander gedrückt bzw. beschädigt. Die statische Sicherheit der Gesamtkonstruktion wurde zunehmend gefährdet. Um den weiteren Schadensfortschritt zu stoppen, wurde deshalb im Jahr 2010 der Abbau des vollständigen Grabmals mit dem Landesamt für Denkmalpflege in Esslingen beschlossen. Dieser war unumgänglich geworden, um die immer weiter korrodierenden Eisenklammern ausbauen und ersetzen zu können.

2 Erhaltungszustand der Bettlade und restauratorische Schadensaufnahme

Im Chorraum der Stiftskirche in Wertheim steht mittig, umrahmt von weiteren Denkmälern des 14.–17. Jahrhunderts, die sogenannte Bettlade (Abb. 3). Die Stiftskirche selber wurde durch Graf Johann I von Wertheim gestiftet und somit wurden die Voraussetzungen der umfangreichen Grablegen im Stiftschor geschaffen. Das Baldachingrabmal, errichtet für den verstorbenen Grafen Ludwig III von Löwenstein und seine Gemahlin Anna von Stolberg, steht dabei wegen des Zugangs zur Familiengruft leicht aus der Mittelachse versetzt auf einem einstufigen Podest aus rotem Mainsandstein. Über dem mehrfach profilierten Sockelfuß wölbt sich die eigentliche Thumba, auf welcher die beiden Verstorbenen, vollplastisch gearbeitet aus hellem, fast rein-weißem Alabastermarmor, gebettet liegen. Am Kopfende wacht ein liegender Löwe

und am Fußende befindet sich heute noch der Visierhelm. Die ursprünglich dort angebrachten Handschuhe sind leider abgängig. Die Thumba-Außenseiten werden von acht mit Gemmen und Knorpelwerk verzierten Kassetten gegliedert, welche ursprünglich von Reliefplatten geschmückt wurden. Heute ist nur noch eine davon übrig.

Über der Thumba, getragen von zehn Säulen, befindet sich der reich mit Wappen, Fruchtgehängen und Gesprenge verzierte Baldachin. An jedem der vier Ecken befindet sich ein trauernder Putto. Die Unterseite des Baldachins ist ebenfalls in vier Kassetten eingeteilt, in welche Reliefplatten eingelassen wurden. Diese zeigen, in bildhauerischer Meisterschaft gearbeitet, die Kreuzigung, die Auferstehung, die Himmelfahrt Christi und das Jüngste Gericht (Abb. 4).

Geschichtliche Daten zu früheren Restaurierungsmaßnahmen [3]:

- 1616–1618 Freigrab aus Alabaster für Graf Ludwig III von Löwenstein-Wertheim und Anna von Stolberg durch den Bildhauer Michael Kern (1580–1649), Vertrag vom 28. Juli 1614
- 1847 Bemerkung über Beschädigungen am Grabmal von Fürst Georg zu Löwenstein durch Vandalismus und Witterungseinflüsse. Später folgt der Hinweis auf die Notwendigkeit einer Restaurierung;
- vor 1888 große Restaurierung der Kirche
- 1906 Umstellung von Grabdenkmälern im Chorraum mit Restaurierung
- 1923 Reparaturmaßnahmen

Im Staatsarchiv Wertheim befindet sich der Vertrag vom 28. Juli 1614 über die Anfertigung des Grabmals, abgeschlossen zwischen den vier Söhnen des Grafen Ludwig III von Löwenstein und dem Bildhauer Michael Kern. Die im Vertrag bis ins Detail gehenden Bestimmungen und Festlegung der Anzahl der Skulpturen, die Ausformung der Wappen etc., orientierten sich an einem von Michael Kern vorgelegten Entwurf für das Grabdenkmal, welcher von ihm vor Abschluss des Vertrags dem Fürstenhaus vorgelegt wurde (Abb. 5).

Im Vertrag wurde auch das zu verwendende Alabastermaterial näher bezeichnet. So sollte für die Architekturelemente der gebänderte Alabastermarmor aus den Kern'schen Brüchen in Forchtenberg verwendet werden. Hingegen sollte für die Bildhauerwerke weißer Alabastermarmor aus dem „Thüringschen“ verbaut werden. Die Besichtigungen der historischen Brüche in Forchtenberg (Abb. 6) und in Kayh (Herrenberg) zeigten den Autoren, dass nur jeweils kleine homogene Alabasterblöcke aus den Brüchen gewonnen werden konnten. Aus diesem Grunde und der darin



Abb. 1 Historische Ansicht des Baldachingrabs in der Stiftskirche um 1930

begründeten Materialnot, mussten die ausführenden Bildhauer und Steinmetze die einzelnen Bildhauerarbeiten wie z.B. die Liegefigur des Grafen aus insgesamt 32 Einzelstücken zusammensetzen (Abb. 7).

Um die einzelnen Werksteine miteinander zu verbinden, wurden Eisendübel und Eisenhaken verwendet. Diese wurden mittels eines Gipsmörtels zusammengesetzt und verklebt. Notwendige kleinere Steinergänzungen wurden ebenfalls bereits bauzeit-



Abb. 2 Zerstörungen an Teilen des Grabmales durch stark korrodierte Metallstifte und Klammern

lich mittels dieses Gipsmörtels durchgeführt und anschließend lasiert. Die Werksteine waren in dünnem Gipsmörtel versetzt, die Fugenbreiten beliefen sich dabei auf 1–3 mm.

Bedingt durch die Feuchteexposition des Chores der Kirche am Ausläufer eines Wasser führenden Berghangs, die bis in die 1980er Jahre unbefriedigend durchgeführte Drainierung des Chorraumes sowie die immer wiederkehrenden Überschwemmun-

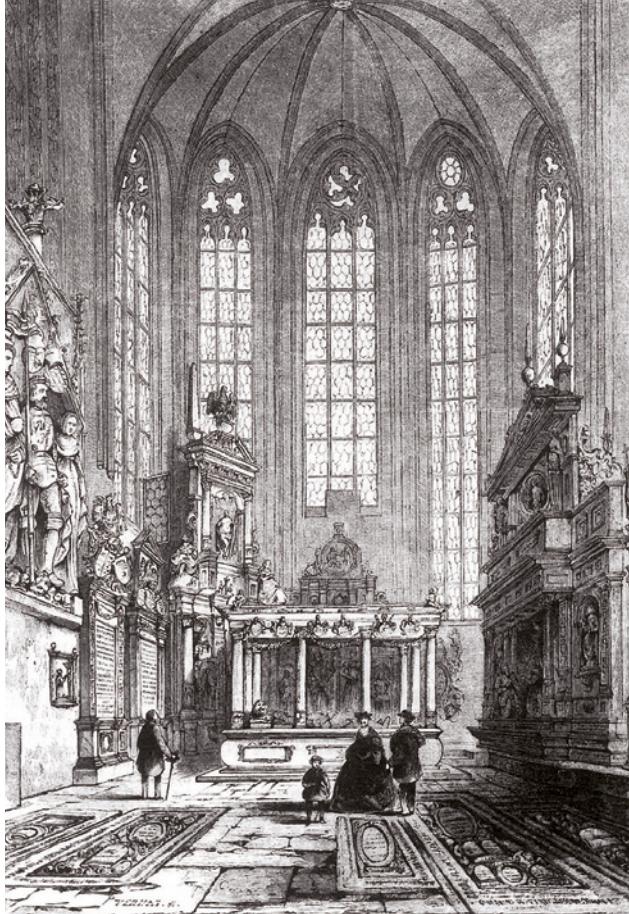


Abb. 3 Holzschnitt von Theodor Verhas von 1863, Ansicht des Chores mit Grabmal



Abb. 4 Vorzustand der Bettlade im Jahr 2010

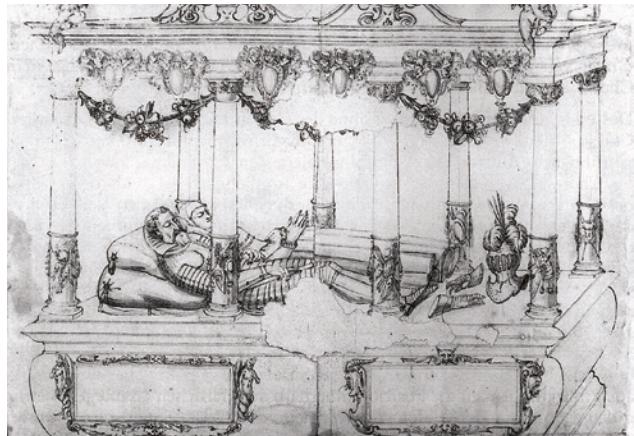


Abb. 5 Entwurf des Grabmales von Michael Kern

gen der Tauber und des Mains, welche die Wertheimer Altstadt heimsuchten, führten zur massiven Befeuchtung und einer immensen Eisenkorrosion der historischen Halteeisen, vor allem im unteren Bereich des Grabmals an der Thumba. Dabei wurden frühere Pressfugen auf eine Weite von 2–3 cm aufgedrückt (Abb. 8a, b).

Die dabei entstandenen Verformungen am Baldachin konnten an den Säulen abgelesen werden. Teil-

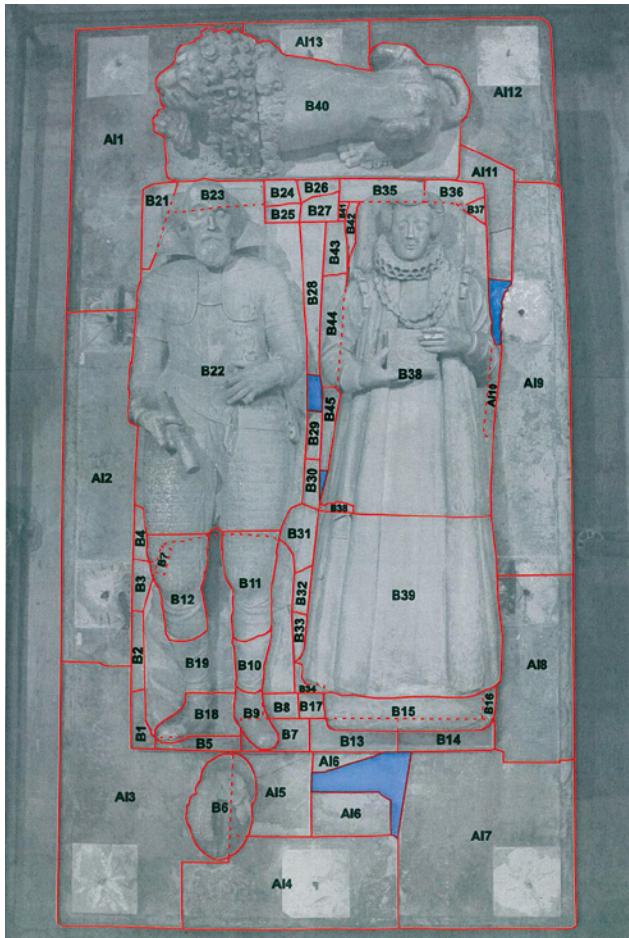
weise lag der Baldachin nicht mehr auf den Säulenkapitellen auf, bzw. hingen ganze Säulen durch den korrodierten Eisendübel am Baldachin und hatten sich über 1,5 cm von der Thumba abgelöst (Abb. 9). Es bestand also akute Gefahr, dass die komplexe Baldachinarchitektur Schaden nehmen konnte bzw. auf Dauer sogar Einsturzgefahr bestand. Es war allen am Projekt Beteiligten relativ schnell klar, dass nur ein



Abb. 6 Historischer Gipsstollen in Forchtenberg mit anstehendem Alabaster



Abb. 8 a Gut sichtbare Verformungen am Sockel des Grabmals (ehemals Pressfugen)



Abbau des Grabmals und die Entfernung der korrodierten Eisenklammern die Gefahr bannen konnten.

Im Vorfeld wurde eine umfassende restauratorische Untersuchung und eine Schadenskartierung beauftragt und durchgeführt. Diese schloss mit einem mit dem Landesamt für Denkmalpflege abgestimmten Maßnahmenkonzept ab [4].

Beim Abbau des Grabmales konnte beobachtet werden, dass sich der verwendete historische Gipsmörtel als grundsätzlich geeigneter Versetzmörtel zeigte. Er war deutlich weicher als der Alabaster, hatte eine gute Anhaftung und führte an den historischen Halteisen im oberen, deutlich weniger mit Feuchte belasteten Baldachinbereich lediglich zu leichter Kontaktkorrosion am Eisen. Alle Eisenverklammerungen in diesem Bereich waren ohne Schäden.

Auch dort, wo durch starke Feuchteaufnahme das Eisen fast komplett wegkorrodiert ist, führte die Volumenzunahme des Eisens nur dort zu Schäden durch Rostsprengung am Alabaster, wo nur wenig Gipsmörtel den Eisendübel umgab, bzw. der Eisendübel eng am Dübelloch anlag. An größer gearbeiteten Dübellöchern konnte der weiche Gipsmörtel nachgeben, und es kam zu keiner Rostsprengung.

Aufgrund dieser Beobachtungen und eingehenden Überlegungen aller Projektbeteiligten und der Tatsache, dass der Gipsmörtel seit 400 Jahren gut funktionierte und die immensen Bewegungen durch die Rostsprengung an den Werkstücken ideal abpufferte, sollte nun ein neu zu konzipierender Gipsmörtel verwendet werden. Dieser sollte, angelehnt an den historischen Mörtel, den technischen Erfordernissen beim Wiederaufbau und den physikalisch-mechanischen Werten des Alabastermarmors gerecht werden.

3 Alabaster, Naturgips und Gips als Bindemittel, theoretische Grundlagen

3.1 Vorkommen von Rohstoff Naturgips und Alabaster

Als Alabaster wird eine dichte, mikrokristalline und durchscheinende Varietät von Gipsstein ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) bezeichnet. Gipsstein und die wasserfreie Form von Kalziumsulfat, der Anhydrit, kommen weit verbreitet in der Erdkruste vor. Bedeutende Kalziumsulfatvorkommen entstanden im Laufe der Erdgeschichte durch die Verdunstung (Eindampfung) von Meer- bzw. Seewasser [5]. Entsprechend der Löslichkeit bilden sich zuerst Karbonate, gefolgt von Sulfaten und zuletzt Chloriden. Die dabei entstehenden Gesteine werden als Evaporite (Salzgesteine) bezeichnet. Im europäischen Raum findet man die bekanntesten Gipsgesteinslagerstätten rund

ums Mittelmeer und im Pariser Becken. Während der Auskristallisation wurde primär Gips gebildet, durch die Überdeckung mit weiteren Sedimenten erhöhen sich aufgrund der Auflast Druck und Temperatur, so dass der Gipsstein durch Dehydratation zu natürlichem Anhydrit umkristallisiert. Als Folge nimmt die ursprüngliche Schichtmächtigkeit stark ab, und das primäre Ablagerungsgefüge wird verändert oder zerstört [6]. Im Einflussbereich exogener Faktoren wie Grund- und Oberflächenwasser kann der Anhydrit wiederum zu Gips umkristallisieren – man spricht dann von Vergipsung bzw. Rehydratation. Dies ist nach HENNING [5] mit einer Volumenzunahme von ca. 60 % verbunden. Auch diese Vorgänge führen zu Änderungen im Gesteinseigenen und haben Schichtverbiegungen, Aufbeulung oder Rissbildungen zur Folge. Weitere Veränderungen von Gipsgestein an der Erdoberfläche sind durch die leichte Wasserlöslichkeit und geringe Gesteinshärte bedingt.

Die häufigsten Verunreinigungen im Gipsgestein sind Kalziumkarbonat (Kalk), Dolomit, Mergel, Ton, seltener Quarz, Bitumen, Glauberit und Polyhalit [7].

Wichtige Gipslagerstätten in Deutschland finden sich entlang des südlichen Harzrandes, in der Norddeutschen Tiefebene (geologische Zeiteinstufung: Zechsteinstufe im Erdzeitalter des Perms), weiterhin in Mainfranken (Keupergips) und in Thüringen (Buntsandstein und Keuper) [8].

3.2 Phasenbildungen und chemische Reaktionen im System Kalziumsulfat – Wasser

Die Eigenschaften von Kalziumsulfat als Mörtelbindemittel beruhen auf Prozessen der Dehydratation (auch Calcinierung genannt) und der Rehydratation von Gips. Durch Erhitzen (Brennen) verliert der Gips teilweise oder vollständig sein Kristallwasser und es entstehen Halbhydrat und Anhydrit. Vermischt man die entstandenen Produkte erneut mit Wasser, so rehydratisieren diese wieder zu Gips. In Abhängigkeit von der Brenntemperatur und den Brennbedingungen existieren bzw. entstehen fünf verschiedene Phasen des Systems $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, davon können vier der Phasen bei Raumtemperatur vorkommen:

- Kalziumsulfat-Dihydrat (Gips),
- Kalziumsulfat-Halbhydrat (Bassanit),
- Anhydrit III und
- Anhydrit II.

Die fünfte existierende Phase, Anhydrit I, ist nur bei einer Temperatur über 1800 °C existent und ist somit technisch bedeutungslos. Eine Übersicht zu den wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Phasen des Kalziumsulfates gibt Tabelle 2.

Tab. 1 Historische Mörtelproben aus dem Alabastergrabmal

Probe E I 1	historischer Gipsversetzmörtel, aus den Zwischenräumen der abgebauten Alabasterwerksteine entnommen
Probe E II 10	historischer Gipsversetzmörtel von Alabasterwerksteinen mit Rostverfärbungen durch korrodierte Eisenanker
Probe 11	Mauermörtel des gemauerten Kernes (Kalkmörtel und Ziegelreste) der Anlage

Tab. 2 Übersicht der wichtigsten Eigenschaften der Phasen des Kalziumsulfates [12]

Zeile	Chemische Formel der Phase	$\text{CaSO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \times \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \text{ III}$	$\text{CaSO}_4 \text{ II}$
1	Bezeichnung	Kalziumsulfat - Dihydrat	Kalziumsulfat - Halbhydrat	Anhydrit III	Anhydrit II
2	Weitere Bezeichnungen	Naturgips, Rohgips, Gipsstein, technischer Gips, abgebundener Gips	β -Halbhydrat, β -Gips, Stuckgips, α -Halbhydrat, α -Gips, Autoklavengips	löslicher Anhydrit	Natur-Anhydrit, Rohanhydrit, Anhydritstein, synthetischer Anhydrit, erbrannter Anhydrit
3	Formen		α -Form β -Form	α -A III β -A III	A II-s (schwerlöslich) A II-u (unlöslich) A II-E (Estrichgips)
4	Kristallwasser (M.-%)	20,92	6,21	0	0
5	Dichte (g/cm^3)	2,31	2,619 β 2,757 α	2,580	2,93 2,97
6	Molmasse	172,17	145,15	136,14	136,14
7	Kristallsystem Raumgruppe	monoklin - prismatisch A2/a	monoklin - prismatisch I 121	orthorhombisch C 222	orthorhombisch Amma
8	Härte nach Mohs	2			3 ½
9	Löslichkeit in H_2O bei 20 °C (g CaSO_4 /l)	2,05	8,8 β 6,7 α	8,8 β 6,7 α	2,7
10	Stabilität	< 40 °C	metastabil	metastabil	40–1180 °C
11	Bildungstemperatur im Laboratorium		β : 45–200 °C in trockener Luft α : > 45 °C in Wasserdampf-atmosphäre	50 °C Vakuum 100 % Luftfeuchtigkeit	200–1180 °C
12	Bildungstemperatur im technischen Prozess		β : 120–180 °C trocken α : 80–180 °C nass	β : 290 °C trocken α : 110 °C nass	300–900 °C A II-s: 300–500 °C A III-u: 300–500 °C A II-E: > 700 °C

Im Nachfolgenden wird kurz auf die Bildungsbedingungen einzelner Phasen eingegangen. Die Phase Gips (Kalziumsulfat-Dihydrat) ist die einzige stabile Phase unter normalen Druck-, Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen. Bei der Rehydratation von gebranntem Kalziumsulfat (Halbhydrat oder technischer Anhydrit) entsteht das technische Dihydrat (technischer Gips), welches in seinen mineralogischen Eigenschaften weitgehend dem Naturgips

entspricht. Unterschiede gibt es in der Anordnung der Kristalle und der Raumdichte (natürlicher Gipsstein, Dichte 2,2–2,4 g/cm³, rehydratisierter Gips Dichte 0,5–2,0 g/cm³) [8]. Die Wasserlöslichkeit des technischen Gipses ist geringfügig niedriger und beträgt nach WIRSCHING [9] 2,1 g/L bei 20 °C. Naturgipse weisen demgegenüber einen größeren Löslichkeitsbereich von 2,04–2,6 g/L auf [10].

Im technischen Bereich existieren mit α -Halbhydrat und β -Halbhydrat zwei Modifikationen, die durch unterschiedliche Herstellungsbedingungen erzeugt werden. Das α -Halbhydrat wird in einem Autoklavenprozess in feuchter Atmosphäre unter erhöhtem Druck zwischen 100–150 °C hergestellt. Es entstehen gut ausgebildete, kompakte Kristalle. Aus α -Halbhydrat lassen sich sehr harte Gipse herstellen, die zur Herstellung von Formgipsen sowie Gipsbaustoffen und Spezialgipsen für Anwendungsgebiete mit besonderen Anforderungen verwendet werden. Das β -Halbhydrat wird im sog. Gipskocher und in kontinuierlich zu beschickenden Drehrohröfen bei Temperaturen von etwa 120 bis 180 °C gewonnen [11], [12]. Halbhydrat wird auch als Stuckgips bezeichnet und weist eine Dichte zwischen 2,6 und 2,7 g/cm³ bei einer Wasserlöslichkeit von ca. 6,7–8,8 g/L auf [10].

3.3 Erhärtung zu Gips durch Kristallisation

Die Erhärtung von Kalziumsulfatbindemittel erfolgt durch die Aufnahme einer adäquaten Menge an Kristallwasser, die zur Kristallisation von Gips (Kalziumsulfat-Dihydrat) benötigt wird. Das Kalziumsulfat selbst wird nicht umgewandelt. Während des Hydrationsprozesses lösen sich die Phasen Halbhydrat und Anhydrit III und II auf und bilden Dihydrat, bis ein erhärtetes Kristallgefüge vorliegt. Die Hydratationsgeschwindigkeit wird von der Keimbildungsrate, der Kristallwachstums- und Keimbildungsgeschwindigkeit bestimmt. Die einzelnen Gipskristalle wachsen nadelförmig und verfilzen sehr stark unter der Bildung eines Kristallgefüges. Anfänglich findet während der Hydratation eine Kontraktion von etwa 7–9 Vol.-% statt, die mit zunehmender Erhärtung durch eine Expansion überlagert wird. Diese wird durch das Wachstum der Kristalle verursacht und hat eine Volumenzunahme der erhärteten Gipsmasse zur Folge. Die Volumen-

zunahme und die Festigkeitseigenschaften der erhärteten Masse hängen vom Verhältnis Gips zu Wasser ab [11].

Der Hydratationsprozess wird nach STARK in fünf Stadien unterteilt, insgesamt kann die Hydratation durch Beschleuniger oder Verzögerer beeinflusst werden [13]. Eine Verzögerung, und damit eine langsamere Erhärtung, wird z.B. durch Alkali- und Erdalkalihydroxide (z.B. Portlandit), Alkali- und Ammoniumphosphate oder organische Säuren und deren Salze (z.B. Zitronensäure, Tartrate) erreicht [14].

4 Naturwissenschaftliche Voruntersuchungen und Materialentwicklung

4.1 Historischer Gipsmörtel

Nach dem Abbau des Grabmals durch Diplomrestaurator Frank Eger standen Materialproben der historischen Versetzmörtel und des Alabasters für naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung. Eine besonders wichtige Fragestellung der Untersuchung war eine möglichst genaue Materialbestimmung und die Nachstellung eines geeigneten Versetzmörtels für den Wiederaufbau. Der originale Gipsmörtel aus der Zeit von 1614–1618, der zum Versetzen der Alabasterplatten verwendet wurde, hatte beinahe 400 Jahre gut überdauert. Die besonderen Anforderungen konnten dabei wie folgt formuliert werden:

- Konzeption eines Versetzmörtels und eines Antragmörtels mit unterschiedlichen Abbindezeiten
- Eine ausreichend lange Offenzeit des Versetzmörtels, um die einzelnen, großen und schweren Puzzlestücke aus Alabaster wieder vor Ort in der Kirche zusammensetzen zu können.
- Der Versetz- und Antragmörtel sollte deutlich unter den physikalisch-mechanischen Werten des Alabasters liegen.
- Kein Aufbrennen des Mörtels im Kontakt zu den historischen Gipsmörtelergänzungen.
- Er sollte auf Dauer zu keinerlei Zunahme der Härtete führen.
- Für die Antragungen und Kittungen ist es notwendig, dass der Mörtel auf Null auslaufbar ist und keine Mindeststärke zum Abbinden benötigt.
- Die Haftung des Mörtels am Alabaster muss ausreichend hoch sein.
- Der neue Gipsmörtel sollte ohne Zugabe von Pigmenten verwendet werden.

Eine erste Auswahl geeigneter Gipsbindemittel auf der Basis von Naturgipsen (als Rohstoffgrundlage) wurde im Rahmen einer Bachelor Thesis an der HAWK Hildesheim durch Herrn Markus Rüße vorgenommen



Abb. 10 Historischer Gipsmörtel (Probe E II 10) aus dem abgebauten Alabastergrabmal mit bräunlichen Verfärbungen durch die Metallkorrosion

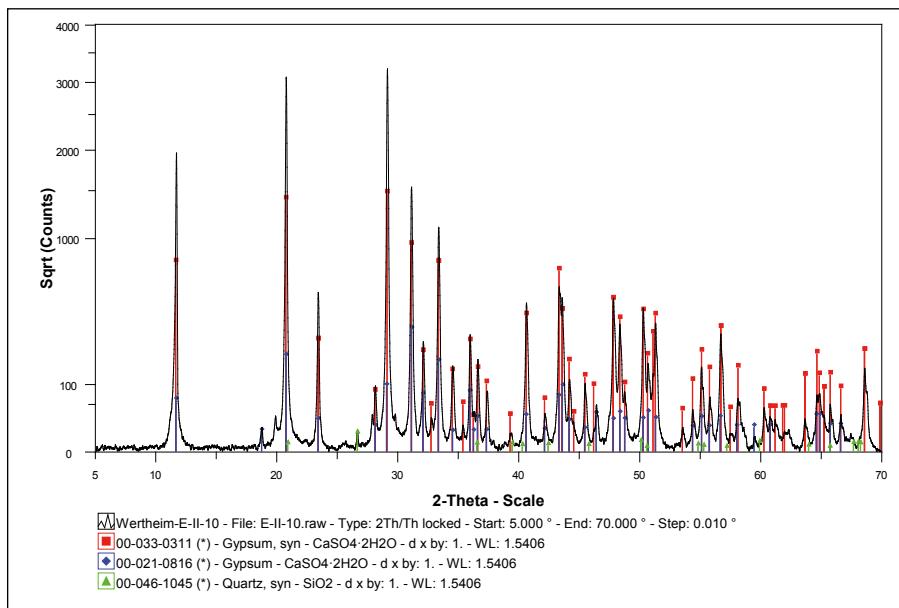


Abb. 11

Phasenanalyse mit Röntgendiffraktometrie an der historischen Gipsmörtelprobe E II 10. Neben Gips ist noch Quarz in sehr geringen Mengen nachweisbar

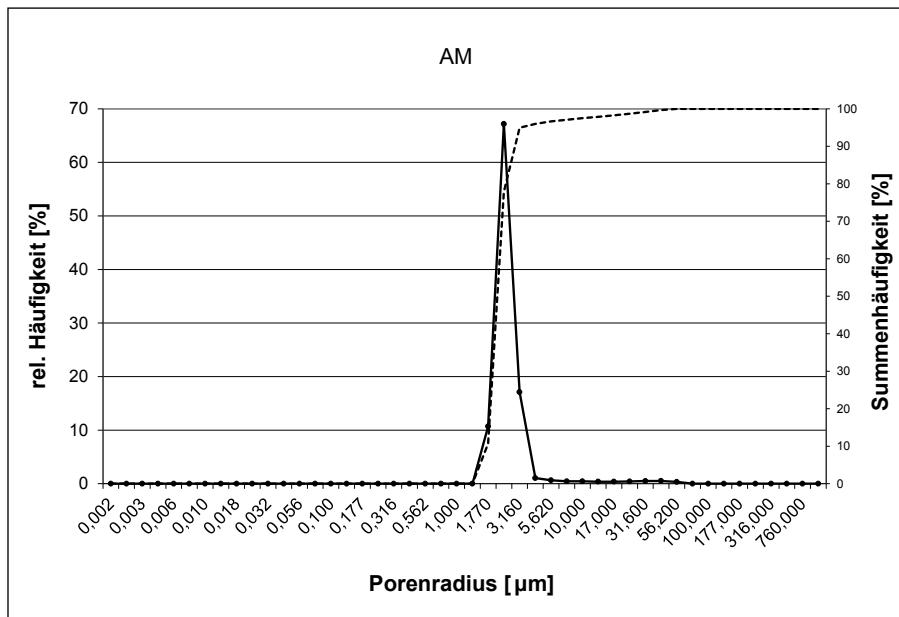


Abb. 12

Grafische Darstellung der Porenradienverteilung (Hg-Druckporosimetrie) an der Originalprobe E I 11

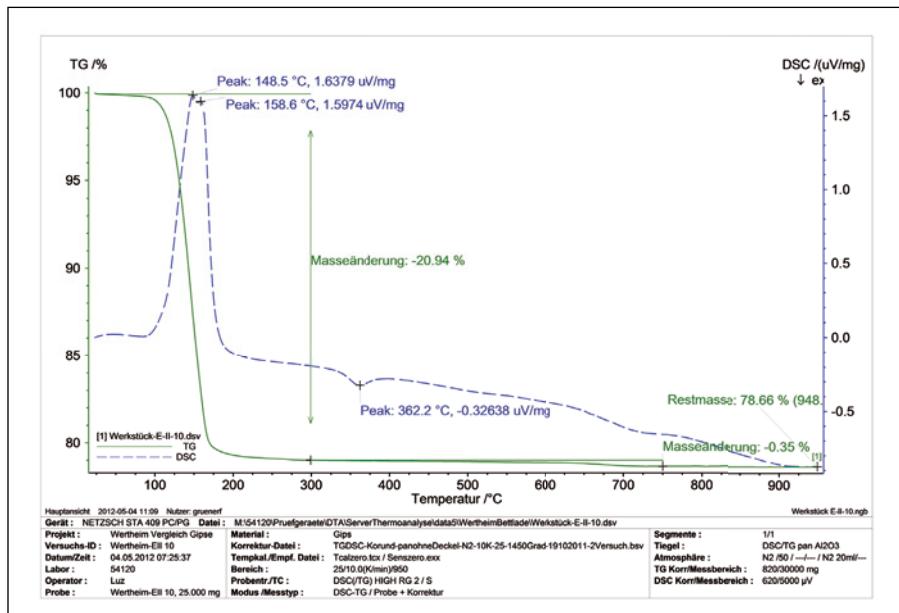


Abb. 13

Thermoanalyse (TG/DSC) an der historischen Gipsmörtelprobe E II 10

[17]. Darauf aufbauend wurden weitere Versuche zur Modifizierung und Einstellung des neuen Versetzmörtels mit besonders langer Offenzeit durchgeführt [18].

Für die anfängliche Materialcharakterisierung wurden mehrere, historische Mörtelproben untersucht (Tab. 1).

Der originale Gipsmörtel, der zum Versetzen der Alabasterplatten an der Bettlade eingesetzt wurde, ist zu fast reinem Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) erhärtet (Abb. 10). An weiteren anorganischen, kristallinen Stoffen konnte noch Quarz in der Phasenanalyse mit Röntgendiffraktometrie nachgewiesen werden (Abb. 11). Ein mikrochemischer Test zum Nachweis von natürlichen Proteinen wurde mit dem Natriumsalz von Tetrabromphenolphthaleinethylestern nach [15] durchgeführt. Eine stark positive Reaktion lässt auf den Einsatz organischer Zusätze zur Einstellung der Verarbeitbarkeit (Verzögerer wie z.B. Glutinleime) schließen. Weiterhin wurde die Rohdichte und die Porosität des historischen Gipsmörtels mit Hg-Druckporosimetrie untersucht. Die Rohdichte wurde zu $2,23\text{ g/cm}^3$ bestimmt, die Gesamtporosität hat $55,1\text{ Vol.}\%$ betragen. Der Gipsmörtel ist durch eine eng begrenzte Porenradienverteilung (Abb. 12) mit Porengrößen zwischen $0,3$ und $5,5\text{ }\mu\text{m}$ mit einem Maximum bei $1,8\text{ }\mu\text{m}$ charakterisiert. Zur Prüfung der Reinheit des verwendeten Kalziumsulfat-Bindemittels wurde eine Thermoanalyse mit TG/DSC bis 950°C durchgeführt. Die Thermogravimetrie hat die Abspaltung des Kristallwassers aus dem Gips (Masseverlust $-20,9\text{ M.}\%$, $60\text{--}280^\circ\text{C}$) und einen sehr geringen Masseverlust von $0,35\text{ M.}\%$ im Temperaturbereich von $450\text{--}750^\circ\text{C}$ durch Karbonat ergeben (Abb. 13). Weiterhin kann die Umwandlung des entstandenen Anhydrits III zu Anhydrit II bei rund 360°C mithilfe der DSC erkannt werden.

Polarisationsmikroskopische Untersuchungen am Dünnenschliff des Originalmörtels konnten ein dichtes, nadelig-tafeliges Gipseinsgefüge zeigen. Es konnten Kristallreste von Anhydrit festgestellt werden (Abb. 14, 15). In größere Poren wachsen strahlige Gipsnadeln hinein. Im rasterelektronenmikroskopischen Bild ist die tafelige Struktur der Gipskristalle und die hohe Verzahnung gut zu sehen. Neben einer sekundär entstandenen Porosität durch die Lösung von Anhydritkristallen sind auch kugelige Luftporen im Mörtel vorhanden (Abb. 16).

4.2 Moderne Gipsmörtel zur Nachstellung

Für die Nachstellung des neuen, für den Wiederaufbau des Grabmals verwendeten Gipsmörtels wurden drei verschiedene Gipssorten unterschiedlicher An-

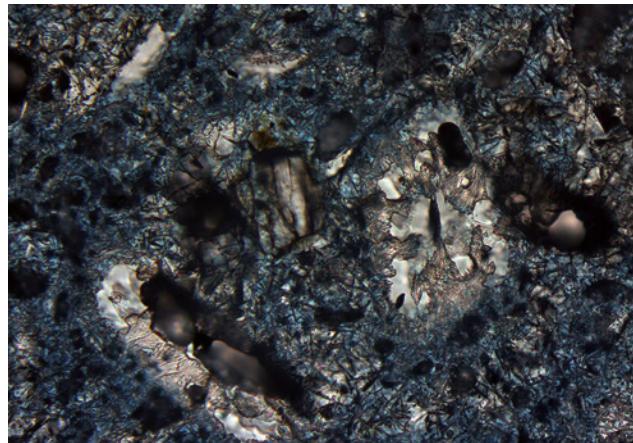


Abb. 14 Gipsmörtelprobe E II 10, mit blau angefärbtem Kunstharz eingebettet, feinfilziges Gipsnadelgefüge mit Anhydritkristallresten in Bildmitte (hohe Lichtbrechung, siehe Pfeil) und radialstrahliges Gipskristallwachstum in Poren und Hohlräumen (Porosität durch später weggelöste Anhydritkristalle).

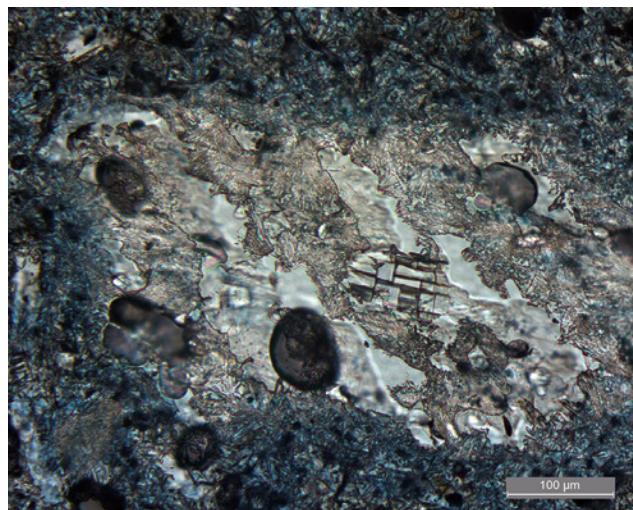


Abb. 15 Gipsmörtelprobe E II 10, unter hoher Vergrößerung mit relictisch erhaltenem Anhydritkristall (Naturanhidrit ?) und strahligem Gipskristallwachstum im Porenraum.

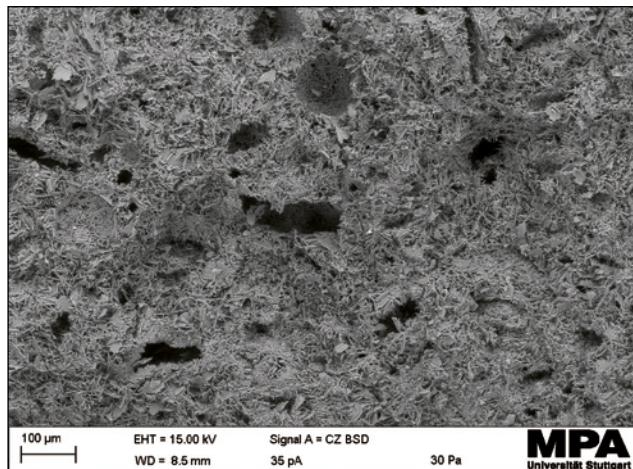


Abb. 16 Gipsmörtelprobe E II 10 zeigt einen Vergleich der unterschiedlichen Poren: Luftporen, kugelig, mit kleinen hinein wachsenden Gipskristallen und mit Poren, die durch sekundäre Lösungsprozesse von Anhydritkristallen entstanden sind.

bieter ausgewählt. Allen drei Gipssorten ist gemein, dass sie laut Technischem Merkblatt der Anbieter aus Naturgips hergestellt wurden und keine Chemiegipse oder REA-Anhydrit enthalten (Tab. 3). Multigips Alabaster von VG-Orth und Hartform 1 von BPB Formula sind Stuck- und Modellgipse aus Niederbrandherstellung, der Marmorgips der Hundisburger Baustoffmanufaktur hingegen wird im Hochbrandverfahren hergestellt. Alle drei Produkte enthalten keine weiteren (silikatischen oder karbonatischen) Zuschläge. Zur Überprüfung der physikalisch-technischen Eigenschaften wurden Mörtelprismen von Herrn Markus Rüße im Rahmen seiner Bachelorthesis hergestellt und untersucht. Es wurden die Frischmörtelleigenschaften (Konsistenz, vorgegebenes Ausbreitmaß, Wasser/Bindemittel-Wert, Erstarrungsverhalten) und später die mechanischen Eigenschaften bestimmt.

Durch Vorversuche wurde ein Ausbreitmaß von 211 ± 3 mm vorgegeben, die Anmischung der Gipsmörtel erfolgte teilweise abweichend von DIN EN 13279-2, Ausgabe 2004 unter angenäherten Baustellenbedingungen nach der Vorgehensweise von Jane RICHTER [16]. Die Anmischung aller drei Produkte erfolgte in einem Labormischer nach DIN EN 196-1 wie folgt:

- Wasser vorlegen (500 ml),
- Gips einstreuen,
- 1 Minute einsumpfen,
- 15 Sekunden mischen (Stufe 1, 140 U/min),
- 5 Minuten Reifezeit, gerechnet ab Einstreubeginn,
- 15 Sekunden mischen (Stufe 1, 140 U/min),
- 8 Minuten Reifezeit, gerechnet ab Einstreubeginn,

- 15 Sekunden mit einem Schaber nachmischen,
- Abfüllen mit Setztrichter auf dem Ausbreittisch.

Die Messung des Ausbreitmaßes erfolgte normgerecht und der Frischmörtel sollte ein Ausbreitmaß von 211 ± 3 mm aufweisen. Die so erreichte Konsistenz ist weich, leicht steif und plastisch und damit zur Verarbeitung als Versetzmörtel geeignet [17]. Die Ergebnisse zeigen Tabelle 4, der Multigips Alabaster (AM) hat dabei den höchsten Wasser/Gips-Wert aufgewiesen. Das Erstarrungsverhalten wurde nach DIN 13279-2, Ausgabe 2004 mit einem Vicat-Gerät mit Tauchkonus bestimmt. Der Versteifungsbeginn der Gipsmörtel mit AF und AM hat 10 Min. bzw. 15 Min. betragen, der Hochbrandgips AH hingegen hat einen Versteifungsbeginn bei etwa 50 Min. gezeigt [17].

Für die Prüfung der mechanischen Eigenschaften von Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und dynamischen E-Modul wurden Normprismen mit den Maßen $160 \times 40 \times 40$ mm in Styroporformen hergestellt. Die hergestellte Gipsmasse wurde im Schockverfahren in den Styroporformen verdichtet und nach einem halben Tag ausgeschalt, bevor sie für 14 Tage unter konstanten Bedingungen im Klimaraum ($18 \pm 3^\circ\text{C}$; $55 \pm 5\%$ rF) gelagert wurden.

Der dynamische E-Modul (E_{dyn} -Modul) wurde zerstörungsfrei mit Ultraschall-Laufzeitmessungen und Auswertung mit Hilfe der Auswertesoftware „Dehnwelle“ von Geotron Elektronik bestimmt. Hierfür wurde ein Prüfkoffersystem UKS 12 von Geotron und einer Frequenz von 20 kHz verwendet.

Tab. 3 Moderne Gipsbindemittel, die für die Nachstellung des Versetzmörtels verwendet wurden

Gips AF	Hartformgips 1, Formula Halbhydrat von BPB Formula, laut Technischem Merkblatt aus Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) bestehend
Gips AM	Multigips Alabaster von VG-Orth GmbH & Co. KG, aus Naturgipsstein hergestellt, Gipsbinder nach DIN EN 13279-1
Gips AH	Marmorgips der Hundisburger Baustoffmanufaktur „marble cement“, zweifach gebrannt und mit Alaunlösung nach dem ersten Brand getränkt, dabei handelt es sich um einen sog. Hochbrandgips.

Tab. 4 Ermittlung von Ausbreitmaß und Wasseranspruch, aus [17]

Gipssorte	Menge Wasser (g)	Menge Gips (g)	Ausbreitmaß (mm)	Wasseranspruch	Verhältnis Wasser zu Gips
AM	500	760	213 / 214	0,66	1 : 1,52
AH	500	1660	214 / 215	0,30	1 : 3,32
AF	500	1580	211 / 210	0,31	1 : 3,16

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Die Messergebnisse streuen je Probenserie nur gering, der Gips AM hat mit $5,33 \text{ kN/mm}^2$ im Mittel den nied-

rigsten E_{dyn} -Modul aufgewiesen und ist deutlich elastischer einzuschätzen als die Gipse AH ($23,67 \text{ kN/mm}^2$) und AF ($18,86 \text{ kN/mm}^2$) [17].

Tab. 5 Bestimmung des dynamischen E-Moduls mit Ultraschall-Laufzeitmessungen und Dehnwellenmessungen, Geotron UKS 12 Koffersystem [17]

Messausführung	Markus Rüsse						
Datum	25.04.2012						
Messgerät	Koffer-Messsystem UKS 12 von Fa. Geotron – Elektronik, Pirna US-Generator USG 20, Oszilloskop Fluke 99B Dehnwellenmessköpfe UPG-D / UPE-D						
Messgeräte-einstellungen	Frequenz 20 kHz Aussteuerung des negativen Ersteinsatzes 80–100 % auf dem Scopemeterdisplay						
Probenkonditionierung	13 Tage Trocknung im Klimakeller, ca. $18 \pm 3^\circ\text{C}$ / $55 \pm 15\%$ r.F.						
Bezeichnung	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Durchschnitt Breite/Höhe [mm]	Trockenmasse [g]	Rohdichte [g/cm ³]	E_{dyn} -Modul [kN/mm ²]
AM 1	160,20	39,84	40,06	39,95	282,75	1,106	4,445
AM 2	160,10	40,07	40,10	40,09	293,70	1,142	5,717
AM 3	160,15	39,91	40,12	40,02	291,94	1,138	5,559
AM 4	159,85	40,05	39,95	40,00	293,01	1,146	5,436
AM 5	160,04	39,81	40,82	40,32	299,71	1,152	5,447
AM 6	159,88	39,88	40,79	40,34	287,19	1,104	6,129
AM R	160,17	39,92	40,33	40,13	274,57	1,065	5,984
Mittelwert							5,53
Median							5,56
Standardabweichung							0,55
Variationskoeffizient [%]							9,89
AH 1	160,00	39,78	39,83	39,81	460,36	1,816	22,599
AH 2	160,18	39,78	39,89	39,84	464,81	1,829	22,774
AH 3	160,82	39,99	40,24	40,12	470,80	1,819	24,511
AH 4	159,92	39,70	40,16	39,93	467,14	1,832	23,982
AH 5	160,06	39,87	40,09	39,98	468,95	1,833	24,024
AH 6	160,16	39,88	39,92	39,90	467,72	1,834	24,052
AH R	160,12	40,15	39,72	39,94	462,54	1,811	23,778
Mittelwert							23,67
Median							23,98
Standardabweichung							0,71
Variationskoeffizient [%]							3,01
AF 1	160,89	40,10	40,43	40,27	421,84	1,617	18,661
AF 2	160,52	40,30	40,45	40,38	422,41	1,614	19,291
AF 3	160,88	40,61	40,66	40,64	424,96	1,600	18,432
AF 4	160,61	40,04	40,43	40,24	421,43	1,621	18,597
AF 5	160,92	40,64	40,33	40,49	424,75	1,610	19,388
AF 6	160,83	40,89	40,56	40,73	424,05	1,590	19,128
AF R	160,67	40,16	40,34	40,25	418,19	1,607	18,496
Mittelwert							18,86
Median							18,66
Standardabweichung							0,40
Variationskoeffizient [%]							2,12

Tab. 6 Ergebnisse der Biegezugfestigkeit [17]

Messausführung	Markus Rüße				
Datum der Messung	26.04.2012				
Probekörpermaterial	Gips				
Lastaufbringung	Senkrecht zur Einfüllrichtung				
Probenkonditionierung	14 Tage Trocknung im Klimakeller, ca. $18 \pm 3^\circ\text{C}$ / $55 \pm 15\%$ r.F.				
Prüflabor	HAWK, Materialprüflabor, Holzminden, Billerbeck 2				
Prüfmaschine	Chemisches Laboratorium für Tonindustrie, Seger und Cramer K.G.				
Berechnungsformel	$\beta_{BZ} = \frac{1,5 \cdot F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2}$				
Probekörperbezeichnung	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Maximalkraft F_{max} [N]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
AM 1	160,20	39,84	40,06	1700	3,99
AM 2	160,10	40,07	40,10	1220	2,84
AM 3	160,15	39,91	40,12	1140	2,66
AM 4	159,85	40,05	39,95	1180	2,77
AM 5	160,04	39,81	40,82	1120	2,53
AM 6	159,88	39,88	40,79	1480	3,35
AM R	160,17	39,92	40,33	1740	4,02
Mittelwert					3,2
Median					2,8
Standardabweichung					0,6
Variationskoeffizient [%]					19,8
AH 1	160,00	39,78	39,83	4480	10,65
AH 2	160,18	39,78	39,89	4140	9,81
AH 3	160,82	39,99	40,24	4320	10,01
AH 4	159,92	39,70	40,16	4640	10,87
AH 5	160,06	39,87	40,09	5500	12,87
AH 6	160,16	39,88	39,92	5400	12,75
AH R	160,12	40,15	39,72	4900	11,60
Mittelwert					11,2
Median					10,9
Standardabweichung					1,2
Variationskoeffizient [%]					11,0
AF 1	160,89	40,10	40,43	4030	9,22
AF 2	160,52	40,30	40,45	4780	10,87
AF 3	160,88	40,61	40,66	4020	8,98
AF 4	160,61	40,04	40,43	3960	9,08
AF 5	160,92	40,64	40,33	5200	11,80
AF 6	160,83	40,89	40,56	5090	11,35
AF R	160,67	40,16	40,34	4090	9,39
Mittelwert					10,1
Median					9,4
Standardabweichung					1,2
Variationskoeffizient [%]					11,9

Tab. 7 Ergebnisse der Druckfestigkeitsbestimmungen [17]

Messausführung		Markus Rüsse							
Datum der Messung		26.04.2012							
Probekörpermaterial		Gips							
Lastaufbringung		Senkrecht zur Einfüllrichtung							
Probenkonditionierung		14 Tage Trocknung im Klimakeller , ca. 18 ± 3°C / 55 ± 15% r. F.							
Prüflabor		HAWK, Materialprüflabor, Holzminden, Billerbeck 2							
Prüfmaschine		Toni Technik, Toni Processor B							
Laststeigerung		Prüfgeschwindigkeit 200 N/s							
Berechnungsformel		$\beta_D = \frac{F_{\max}}{l \cdot b}$ β_D = Druckfestigkeit l = Länge des Druckstempels b = Breite des Druckstempels oder Probekörpers, sofern < 40 mm							
Probekörper-bezeichnung	Länge [mm]	Breite [mm]	beanspruchte Fläche [mm²]	Maximal-kraft F_{\max} [kN]	Maximal-kraft F_{\max} [kN]	Druckfestigkeit 1 [N/mm²]	Druckfestigkeit 2 [N/mm²]	Bemerkung	
AM 1	160,20	39,84	1593,60	10,51	16,10	6,60	10,10	Prüfkörper zeigen Risse, brechen jedoch nicht	
AM 2	160,10	40,07	1602,80	11,66	11,35	7,27	7,08		
AM 3	160,15	39,91	1596,40	11,59	10,62	7,26	6,65		
AM 4	159,85	40,05	1602,00	12,59	10,76	7,86	6,72		
AM 5	160,04	39,81	1592,40	9,40	9,10	5,90	5,71		
AM 6	159,88	39,88	1595,20	15,81	14,82	9,91	9,29		
AM R	160,17	39,92	1596,80	15,35	15,91	9,61	9,96		
Mittelwert		7,9							
Median		7,3							
Standardabweichung		1,6							
Variationskoeffizient [%]		20,3							
AH 1	160,00	39,78	1591,20	72,66	81,65	45,66	51,31	Sehr spröde zerbricht in drei Teile und viele Kleinst-splitter	
AH 2	160,18	39,78	1591,20	70,97	84,20	44,60	52,92		
AH 3	160,82	39,99	1599,60	79,91	72,50	49,96	45,32		
AH 4	159,92	39,70	1588,00	67,57	75,47	42,55	47,53		
AH 5	160,06	39,87	1594,80	73,34	95,02	45,99	59,58		
AH 6	160,16	39,88	1595,20	80,12	81,32	50,23	50,98		
AH R	160,12	40,15	1606,00	53,55	80,59	33,34	50,18		
Mittelwert		47,9							
Median		48,7							
Standardabweichung		6,0							
Variationskoeffizient [%]		12,5							
AF 1	160,89	40,10	1604,00	72,19	60,32	45,01	37,61	Spröde, zerbricht in drei Teile und viele Kleinst-splitter	
AF 2	160,52	40,30	1612,00	65,01	60,54	40,33	37,56		
AF 3	160,88	40,61	1624,40	55,75	44,50	34,32	27,39		
AF 4	160,61	40,04	1601,60	43,73	39,35	27,30	24,57		
AF 5	160,92	40,64	1625,60	26,73	35,38	16,44	21,76		
AF 6	160,83	40,89	1635,60	27,38	40,83	16,74	24,96		
AF R	160,67	40,16	1606,40	57,94	53,83	36,07	33,51		
Mittelwert		30,3							
Median		30,5							
Standardabweichung		8,8							
Variationskoeffizient [%]		29,1							

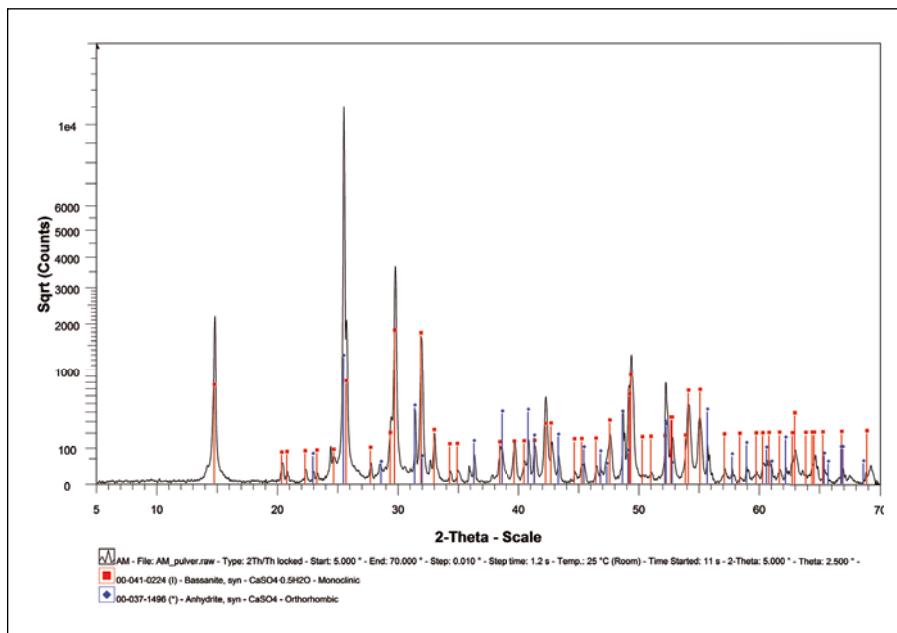


Abb. 17

Röntgenographische Phasenanalyse des Rohmaterials von Multigips Alabaster AM, enthält wenig Anhydrit neben vorwiegend Halbhydrat

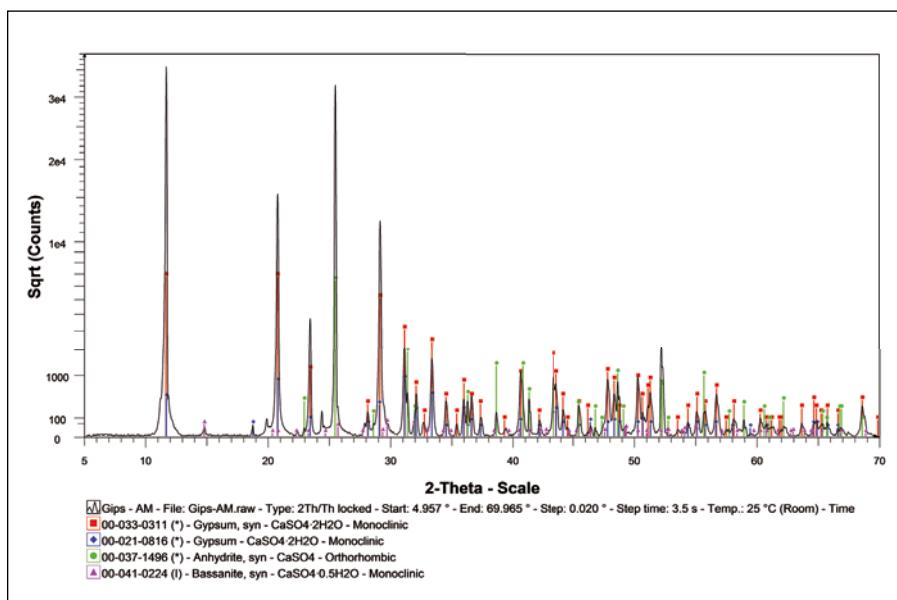


Abb. 18

Röntgenographische Phasenanalyse der ausgehärteten Mörtelprobe Gips-AM (Multigips Alabaster)

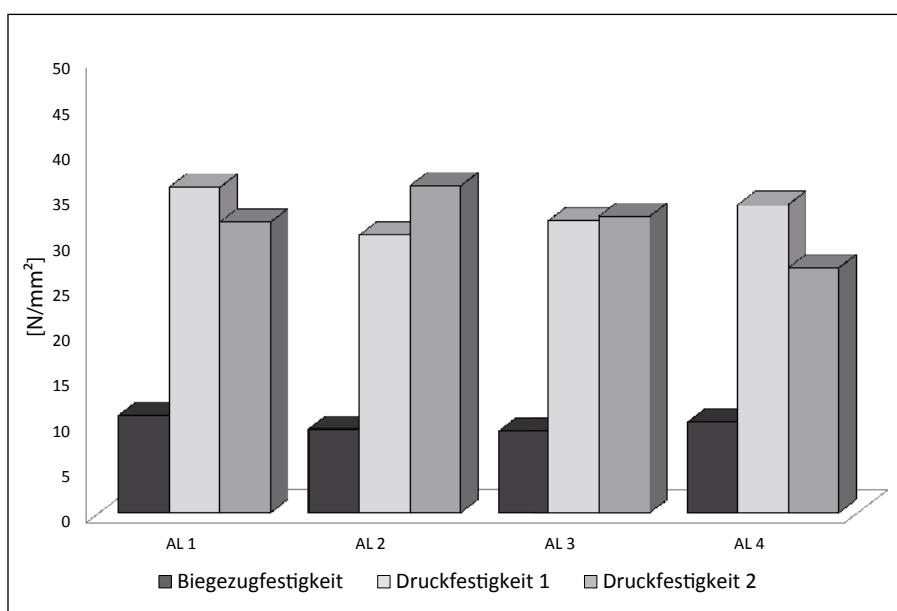


Abb. 19

Alabaster aus Forchtenberg, Ergebnisse der Biegezug- und Druckfestigkeitsuntersuchung

Tab. 8 Alabasterproben, Ergebnisse der Ultraschall-Laufzeitmessungen und Berechnung des E_{dyn} -Modules

Alabaster aus Forchtenberg				
	v_{us} [km/s]	E_{dyn} -Modul [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Poissonzahl
AL 1	4,653	36653	2,17	0,28
AL 2	4,472	35653	2,24	0,27
AL 3	4,833	42394	2,24	0,26
AL 4	4,746	40809	2,21	0,26
Mittelwerte	4,676	38877	2,22	0,27
Originales Alabasterstück des Grabmales				
AV 8	5,087	35900	2,23	0,36

Die Ergebnisse zur Biegezugfestigkeit und zur Druckfestigkeit nach DIN EN 196, Teil 1, Ausgabe 05-1995 zeigen den direkten Zusammenhang dieser Kenngrößen und liegen als Mittelwerte für den Gips AM bei $\beta_{BZ} = 3,2 \text{ N/mm}^2$, und für die Sorten AH ($\beta_{BZ} = 11,2 \text{ N/mm}^2$) und AF ($\beta_{BZ} = 10,1 \text{ N/mm}^2$) erneut um ca. den Faktor 3–3,5 höher. Die Einzelergebnisse sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt [17]. Der Bezug zwischen Festigkeit und sprödem Verhalten der Prüfkörper wird besonders deutlich bei der Druckfestigkeitsprüfung. Während die Prüfkörper der Gipse AH und AF in mehrere Teile und Splitter zerbrechen, weisen die Prüfkörper der Gipssorte AM nur Rissbildungen auf, zerbrechen jedoch nicht vollständig. Der Mittelwert β_D beträgt dabei $7,9 \text{ N/mm}^2$ für den Gips AM, während die Mittelwerte β_D für den Gips AH $47,9 \text{ N/mm}^2$ und für AF $30,3 \text{ N/mm}^2$ betragen [17].

Ein originales Alabasterstück des Grabmales hat geeignete prismatische Abmessungen aufgewiesen und konnte zerstörungsfrei zur Bestimmung des E_{dyn} -Modulus verwendet werden. Zusätzlich stand Alabaster aus dem historischen Gipsstollen von Forchtenberg der Bildhauerfamilie Kern zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 wieder gegeben. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen dem im 17. Jahrhundert von Bildhauer Michael Kern verwendeten Alabaster und dem dort heute noch in Reststücken gewinnbaren Alabaster. Die Biegezugfestigkeit des Forchtenberger Alabasters hat $9,7 \text{ N/mm}^2$ und die Druckfestigkeit hat $33,3 \text{ N/mm}^2$ betragen (Abb. 19). Weitere technische Gesteinskennwerte verschiedener Alabasterlagerstätten wurden von [19] ermittelt. Die biaxiale Biegezugfestigkeit von Alabaster aus La Pueblo de Hijar (Spanien) beträgt demnach $7,1\text{--}8,9 \text{ N/mm}^2$, aus Ellrichstadt in Thüringen $7,8\text{--}8,4 \text{ N/mm}^2$ und von Alabaster aus Castellina Marittima $13,6\text{--}16,4 \text{ N/mm}^2$.

Ein Vergleich der vorliegenden technischen Kennwerte an Prüfkörpern aus Forchtenberger Alabaster

mit den drei untersuchten modernen Gipsen führt zu einer abschließenden Bewertung ihrer Eignung als neuer Versetzmörtel. Als entscheidende Grundkriterien sind eine ausreichende, aber nicht zu hohe Festigkeit und Steifigkeit, eine gute Maßhaltigkeit und keine nachträglichen Hydratisierungsvorgänge von Anhydrit zu nennen. Im Gegensatz zum historischen Aufbau des gemauerten Kernes wird zukünftig eine eingebaute Horizontalisolierung mit Bleifolie aufsteigende Feuchte aus dem Untergrund verhindern. Hochbrandgipse wie der Hundisburger Marble-Cement sind daher in diesem Fall wegen ihrer hohen Festigkeit und dem hohen, nach dem Verarbeiten verbleibenden Anteil an nicht hydratisiertem Anhydrit als Versetzmörtel ungeeignet. Auch Gipse mit einem hohen Anteil an α -Halhydrat (sog. Autoklavengips) erhärten mit zu hoher Festigkeit. Für die Einstellung eines gut verarbeitungsfähigen Gipsversetzmörtels wurde deshalb der Multigips Alabaster (AM) von VG Orth ausgewählt.

Die röntgenographische Phasenanalyse des Rohmaterials von Multigips Alabaster von VG Orth konnte zeigen, dass dieser überwiegend Halhydrat enthält (Abb. 17). Der erhärtete Gipsmörtel AM besteht nahezu ausschließlich aus Gips, nur noch sehr wenig Halhydrat und nur Spuren an Anhydrit (Abb. 18).

4.3 Einstellung von Multigips Alabaster (AM) als Versetzmörtel

Für die Versetzarbeiten der klein- und großteiligen Alabasterplatten am Baldachingrab im Zuge des Wiederaufbaues war die Einstellung einer wesentlich längeren Verarbeitungszeit erforderlich. Ferner hatte sich gezeigt, dass auch das Wasserrückhaltevermögen des Gipsmörtels noch verbessert werden musste, um nicht die Gefahr eines vorzeitigen „Verdurstens“ einzugehen. Als Vorgabe für die „offene Zeit“ wurden mind. 20–30 Minuten dafür gefordert. Nach ersten Vorversuchen wurden drei verschiedene Verzögerer

auf anorganischer Basis – Seignettesalz (Kaliumnatriumtartrat-Tetrahydrat bzw. Salz der Weinsäure), Zitronensäure und Targon B 350 (Phosphatbasis) – verwendet. Zur Einstellung des Wasserrückhaltevermöges wurde Tylose MHB 2000 verwendet. Mit Sumpfkalk wurde eine leicht alkalische Erhärtung der Gipsmörtel eingestellt, was die Formstabilität durch ein geringeres Schrumpfverhalten verbessert. Eine Auswahl getesterter Rezepturansätze ist in Tabelle 9 aufgelistet. Die Mischanweisung lautete wie folgt:

1. Trockenes Vermischen von Gips AM mit Tylose, Seignettesalz oder Zitronensäure oder Targon B 350, Targon G 2 und Lenzin (Tab. 9),
2. Wasser im Mischgefäß vorlegen,
3. Sumpfkalkteig im Wasser dispergieren,
4. Zugabe des fertig abgemischten Gipes in das Mischgefäß,
5. nach 30 Sekunden Start des Mischers und 90 Sekunden durchmischen,
6. Stoppen des Mischers und Anhaftungen am Mischertopf abstreifen,
7. zweiter Mischvorgang für 90 Sekunden, danach ausschalten und auffüllen.

Die graphische Auswertung der Bestimmung der Offenzeit („setting time“) mit Ultraschallmessung von vier verschiedenen Testansätzen hat für den Ansatz

V4 (hellblaue Kurve) die beste Übereinstimmung mit den Vorgaben des Restaurators gezeigt (Abb. 20). Auch die Dehnungs-Schwindmessung in der Fließrinne während der Erhärtung und anschließender Lagerung unter konstanten Klimabedingungen am Ansatz V4 hat gute Ergebnisse gezeigt. Bei einer anfänglichen Dehnung von 0,16 mm/m mit leichter Zunahme bis max. 0,21 mm/m hat sich nach 3 Wochen ein stabiler Zustand von 0,10 mm/m eingestellt (Abb. 21).

Es wurden die mechanischen Kennwerte von Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit an Prismen und Würfeln der verzögert erhärtenden Gipsmörtel bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 22 und Abb. 23 dargestellt. Die Schwankungsbreite der getesteten Rezepturen beträgt für die Biegezugfestigkeit zwischen 3,5 bis 4,9 N/mm² (Mittelwerte) und liegt damit trotz sehr deutlicher Verlängerung der Verarbeitungszeit und verbessertem Wasserrückhaltevermögen in allen Werten höher als die von [17] ermittelten Werte (Mittelwert 3,2 N/mm²) am Ausgangsprodukt von VG Orth.

Ähnlich verhält es sich auch mit der Druckfestigkeit, die Werte zwischen 9,0–12,1 N/mm² (Mittelwerte) für die verschiedenen Rezepturen nach der Mörtelstellung ergeben hat. Auch hier beträgt der Mittelwert der an der HAWK Hildesheim am Ausgangsmaterial bestimmten Druckfestigkeit ca. 7,9 N/mm².

Tab. 9 Alabasterproben, Ergebnisse der Ultraschall-Laufzeitmessungen und Berechnung des E_{dyn} -Modulus

Rohstoffe	Rezeptur Nr. A3-9		Rezeptur Nr. A3-10		Rezeptur V2	Rezeptur V3	Rezeptur V4
	in M.-%	in g	in M.-%	in g	in M.-%	in M.-%	in M.-%
Tylose MHB 2000 P2	0,2	2,0	0,2	2,0	0,2	0,2	0,2
Kaliumnatrium-Tartrat (Seignettesalz)	0,015	0,15					
Targon G 2	0,01	0,1			0,01	0,02	0,01
Targon B 350			0,025	0,25			
Zitronensäure					0,02	0,02	0,085
Lenzin (= Gips)					0,1	0,1	0,1
Ca(OH) ₂ , Sumpfkalk*	1,3	13,0	1,3	13,0	1,3	1,3	1,3
Multigips Alabaster AM (VG Orth)	98,475	984,75	98,475	984,75	98,355	98,345	98,290
Summe	100	1000	100	1000	99,985	99,985	99,985
Wasserzugabe in g		550		550	550	550	550
Wasser/Bindemittelwert		0,55		0,55	0,55	0,55	0,55
Abbindebeginn in min.	ca. 40		ca. 20		ca. 4–5	ca. 7	ca. 30
Abbindeende in min.	ca. 60–80		ca. 25		ca. 35	ca. 35	ca. 70–90
Bemerkungen	Verarbeitungszeit in Ordnung		zu schnell für Versetzmörtel		zu schnell	Antragsmörtel	Versetzmörtel
Wasserrückhaltevermögen	gut		gut		gut	gut	gut

* Sumpfkalk = Mariensteiner Sumpfkalk mit einem Wasseranteil von ca. 30 %

Tab. 10 Alabasterproben, Ergebnisse der Ultraschall-Laufzeitmessungen und Berechnung des E_{dyn} -Modulus

Probe	Kraft [N]	Haftzugfestigkeit [N/mm ²]	Bruchbild
V3-1	1286	0,65	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V3-2	1301	0,66	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V3-3	1847	0,94	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V3-4	1600	0,81	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
Mittelwert	0,77		
V4-1	1030	0,52	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V4-2	1126	0,57	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V4-3	1040	0,53	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
V4-4	1150	0,59	Adhäsionsbruch zu 100% an der Grenzfläche Alabaster zu Gipsmörtel
Mittelwert	0,55		

Prüfstempelfläche: 1964 mm², Klebstoff UHU sofortfest, Prüfalter ca. 6–7 Wochen.

Abb. 20

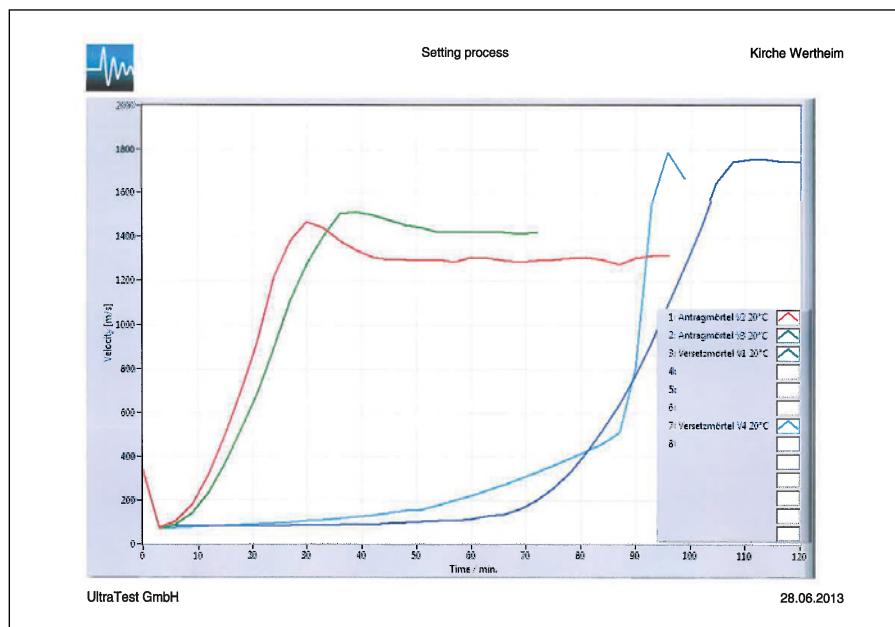
Erhärtungsverhalten von vier eingestellten Gipsmörtelrezepturen (Labor Schwenk Putztechnik) mittels Ultraschallmesstechnik.

V4 = Ansatz mit Zitronensäureverzögerer als Versetzmörtel mit langer Offenzeit (hellblau)

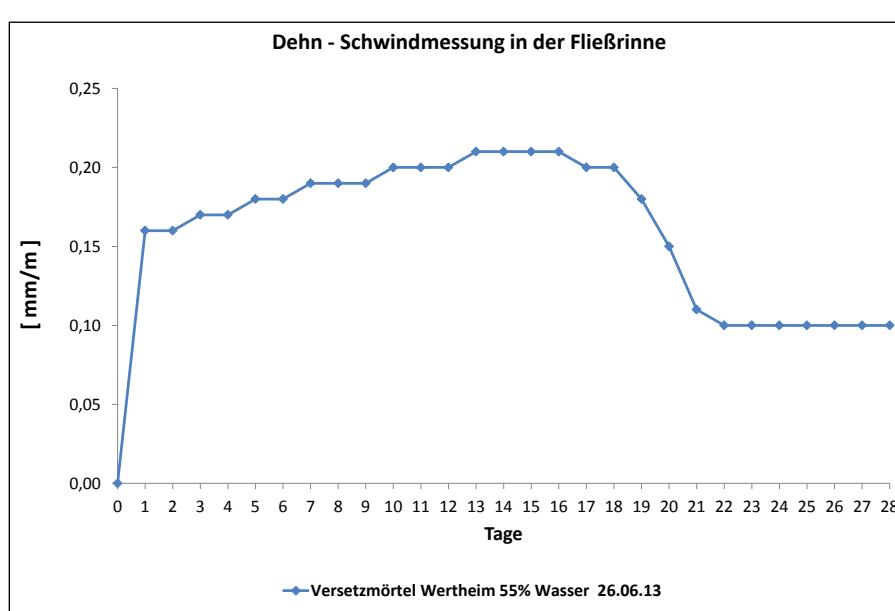
V3 = Ansatz mit Zitronensäureverzögerer mit nur wenig verlängerter Offenzeit (grün)

V1 = Ansatz mit Seignettesalz und langer Offenzeit (MPA-IWB) (dunkelblau)

V2 = ohne Zusätze zur Verzögerung (rot)

**Abb. 21**

Längenänderungsverhalten der Rezeptur V4 mit Zitronensäure als Verzögerer



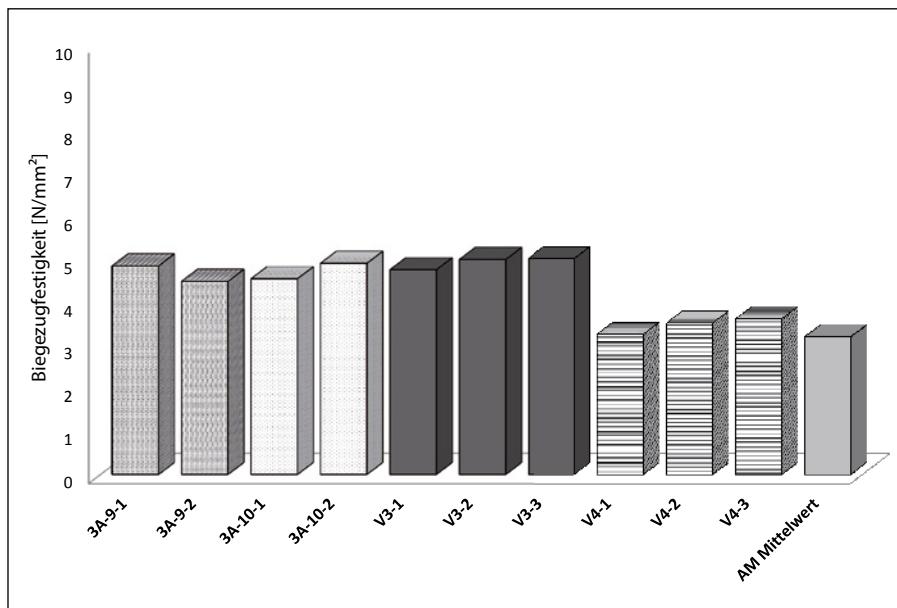


Abb. 22
Vergleich der Biegezugfestigkeiten der verzögert eingestellten Gipsmörtel zum Mittelwert der Grundrezeptur von AM

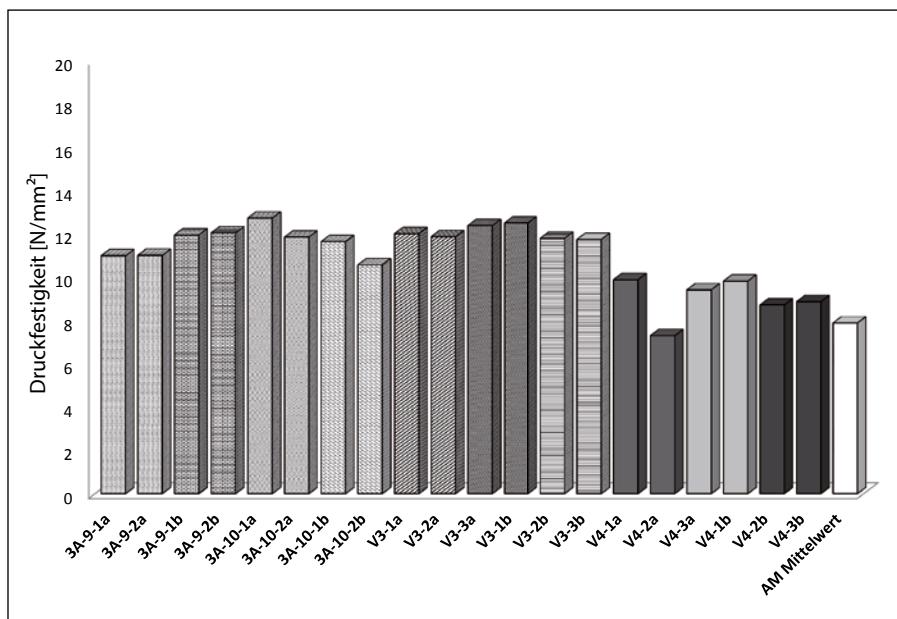


Abb. 23
Vergleich der Druckfestigkeiten der verzögert eingestellten Gipsmörtel zum Mittelwert der Grundrezeptur von AM

Eine Abnahme oder Verschlechterung der Werte durch die Einstellung des Wasserrückhaltevermögens mit Methylzellulose und der Verarbeitungszeit mit Seignettesalz oder Zitronensäure wurde nicht festgestellt. Sowohl die möglichen Versetzmörte (V4 oder A3) als auch der Antragsmörtel (V3) sind deutlich weicher eingestellt als der Alabaster (Abb. 19).

Die Ergebnisse zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit auf gesägten Alabasterflächen sind in Tabelle 10 dargestellt. Es wurde ein mechanisches Haftzugprüfgerät nach Bauart Dr. Ettl/Dr. Schuh verwendet. Die ermittelten Haftzugwerte der eingestellten Gipsmörtel zum Alabaster liegen zwischen ca. 0,5–0,9 N/mm². Die ermittelten Haftzugfestigkeiten werden als gut und ausreichend bewertet, die Gefahr einer zu hohen Festigkeit im Verhältnis zum Alabaster besteht nicht.

Abschließend wurden Gefügeuntersuchungen unter dem ESEM (Environmental-Rasterelektronenmikroskop) an Proben der Rezepturen A3, Ansatz 7 (Versetzmörtel mit Seignettesalz-Verzögerer), V3 (Ansatzmörtel, wenig verzögert mit Zitronensäure) und V4 (Versetzmörtel, stark verzögert mit Zitronensäure) vorgenommen. Alle Aufnahmen zeigen ein stark verzahntes Gipskristallgefüge. Die mit Zitronensäure verzögerten Rezepturen V3 und V4 ähneln dem Gipskristallgefüge der historischen Mörtelproben am stärksten. Diese weisen ein besonders blättrig aufgebautes Kristallgefüge auf, die mit Zitronensäure verzögerten Ansätze sind teils blättrig bis stengelig-prismatisch verfilzt. Die untersuchte Probe A3, Ansatz 7 weist ein kompakteres Gipskristallgefüge mit kürzeren Kristallen auf.

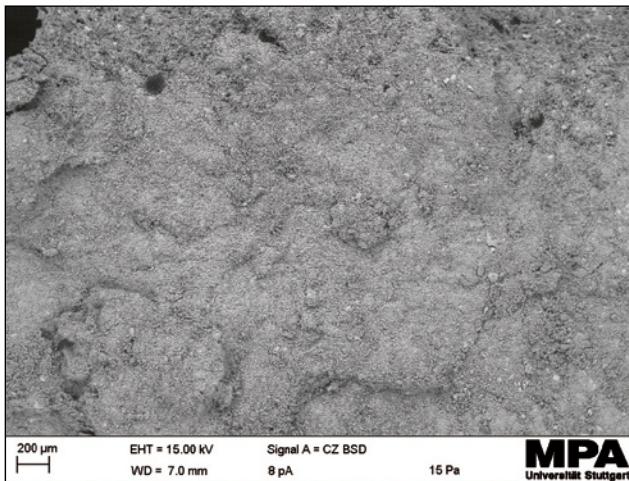


Abb. 24 Gefügebild des Gipsmörtels A3-Ansatz 7 (lange Verzögerung mit Seignettesalz), niedrige Vergrößerung; dichte Ausbildung des Gipskristallgefüges; sehr helle Kristalle enthalten auch Sr an Stelle von Ca (Materialkontrastbild)

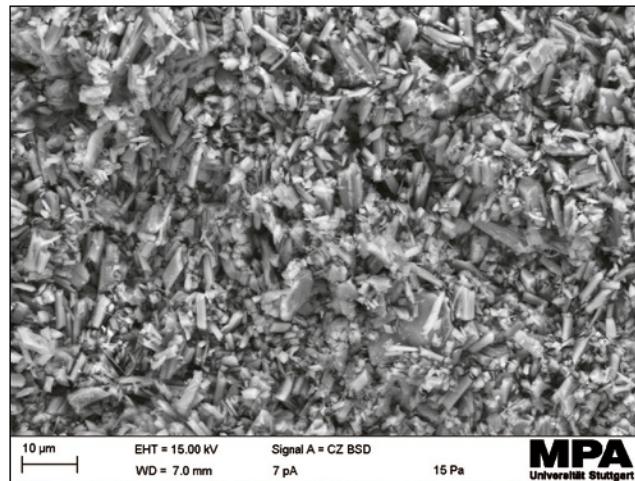


Abb. 25 Detailaufnahme des sehr stark verfilzten Gefügebildes mit kurz-stengeligen Gipskristallen im erhärteten Gipsmörtel A3-Ansatz 7, hohe Vergrößerung

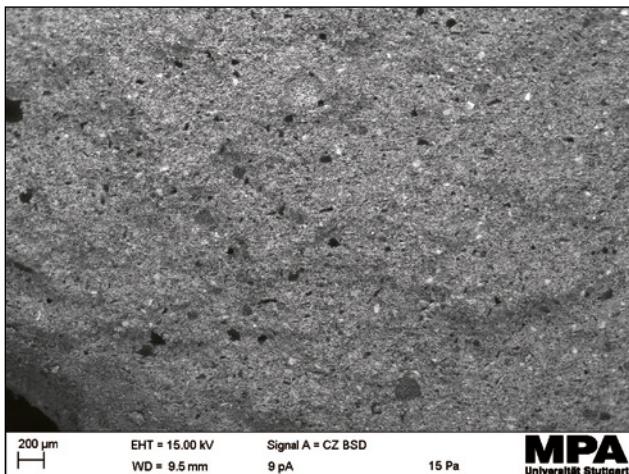


Abb. 26 Gefügebild des Gipsmörtels V4 mit Zusatz von Zitronensäure, Versetzmörtel mit starker Verzögerungseinstellung, Übersicht mit niedriger Vergrößerung. Es sind kugelige Luftporen und Lösungsstrukturen von Anhydritkristallen zu erkennen.

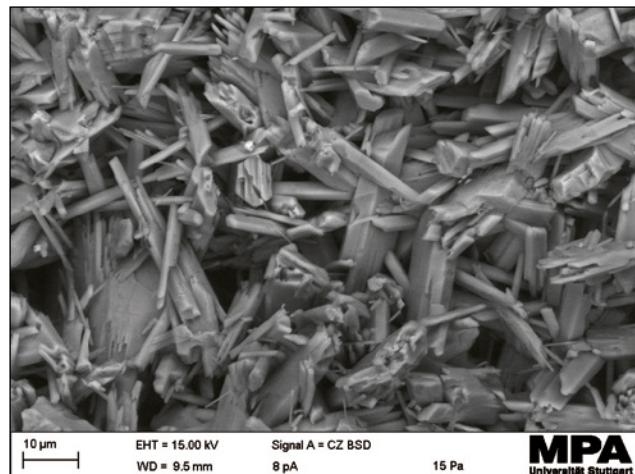


Abb. 27 Gefügebild des Gipsmörtels V3, nadeliges bis stengeliges Gipssteingefüge, stark verzahnt bzw. verfilzt, mit gut erkennbaren Lösungsstrukturen von Anhydritkristallen und kugeligen Luftporen

4.4 Zusammenfassende Schlussfolgerungen zur Auswahl und Einstellung der Gipsmörtel für den Wiederaufbau des Grabmals

Die mikroskopische Untersuchung der Originalmörtelprobe hatte ein Gipssteingefüge aus stark verzahnten, nadeligen bis tafeligen Gipsen gezeigt, das einer Hydratisierung aus Halbhydraten vergleichbar ist. Es sind Hinweise für mehrfach erfolgte Umkristallisationen und den Einfluss von Feuchte wie Lösungsstrukturen am Anhydrit (Reste von Naturanhydrit?) und Wachstum von Gips im Porenraum des Gipsgefüges vorhanden. Der Gips der Gefügematrix ist feinnadelig verfilzt und weist nicht die Charakteristika der grobprismatischen Gipsbildung aus Thermoanhydrit, wie dies bei Hochbrandgips der Fall ist.

Der Originalmörtel hat Restanhydrit nach seiner Erhärtung enthalten, der heute als zusätzliche Porosität neben kugeligen Luftporen auftritt. Restanhydritanteile sind bei der traditionellen Herstellung von β -Halbhydrat im offenen Gipskocher technologisch nicht zu vermeiden. Der Originalmörtel wurde durch organische Protein Zusätze tierischen Ursprungs (wahrscheinlich Glutinleimzusätze, Kollagen) verzögert, d.h. es hat sich wahrscheinlich um einen pH-neutralen Mörtel ohne alkalische Anregung gehandelt.

Gegenüber den im Rahmen der Diplomarbeit von [17] an der HAWK Hildesheim hergestellten Versuchsprismen weist der originale Mörtel eine deutlich höhere Porosität auf, die zum Teil auf Luftporen und eine sekundäre Porosität durch die spätere Lösung

von Anhydritkristallen im Gefüge zurück zu führen ist. Für die Nachstellung des Versetzmörtels wird ein Produkt aus β -Halbhydrat vorgeschlagen, da keine so hohen Festigkeiten, wie sie α -Halbhydrate (Hartformgipse) entwickeln, erforderlich sind.

In einem weiteren Schritt wurde das Produkt Multigips Alabaster (AM) von VG Orth aufgrund der oben angeführten Kriterien ausgewählt und für die Verwendung als Ergänzungsmörtel und Versetzmörtel modifiziert. Es war die Einstellung des Wasserrückhaltevermögens notwendig, um ein vorzeitiges Verdursten der Mörtel durch Absaugen des Anmachwassers durch den Alabaster zu verhindern. Weiterhin wurde der Ansetzmörtel nur geringfügig in seiner „setting time“ verzögert, während der Versetzmörtel auf planmäßige mind. 20–30 Minuten Offenzeit verzögert wurde. Die Untersuchungsergebnisse der mechanischen Kennwerte (Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit, Haftzugfestigkeit) sowie die Gefügeuntersuchung am ESEM an den fertig eingestellten Rezepturen haben in allen Fällen sehr gute Ergebnisse und Anpassung an den Alabaster gezeigt. Eine Verschlechterung der Eigenschaften durch die länger eingestellte Offenzeit wurde nicht beobachtet. Alle mechanisch gemessenen Kennwerte liegen deutlich unterhalb der Werte des Alabasters, so dass eine Beschädigung des Originalmaterials durch zu hohe Festigkeiten ausgeschlossen werden kann. Trotzdem sind die ermittelten Kennwerte hoch genug, um einen guten Verbund oder Anhaftung zu gewährleisten.

5 Abbau und Restaurierung der Bettlade

Der Abbau der Bettlade gewährte Einblick in die komplexe Versetztechnik im Baldachinbereich. Dieser erscheint nach Außen hin als massives Bauteil, erwies sich jedoch beim Abbau als durchdachte Konstruktion, um zum einen mit dem Mangel an großformatigem Steinblöcken umzugehen, aber auch um die Konstruktion so leicht wie möglich zu halten und den Lastabtrag über die Säulen nicht über Gebühr zu strapazieren. Einzelne Werkstücke, die von unten betrachtet als massiv angesehen wurden, setzten sich in Wahrheit aus mehreren dünnen Steinplatten zusammen, welche sich perfekt ausgearbeitet, ansatzlos zusammenfügten.

Um dieser Komplexität der Baukonstruktion gerecht zu werden und um für den Wiederaufbau detaillierte Informationen zu haben, wurden verformungsgerechte Aufmaße jeder Steinschicht erstellt (Abb. 28). Teilweise wurden die Werksteine auf Schablonit im M 1:1 eingezeichnet. Jeder einzelne Stein wurde mit Schicht- und individueller Stein-Nummer

versehen und digital aufgenommen. Höhenlinien der Steinschichten wurden mit Laser im Chor markiert und die Fußplatten der Thumba auf der einstufigen Treppenanlage exakt eingemessen.

Befunde und Fundstücke wurden akribisch aufgenommen und archiviert. Versteckte Zuganker an den Säulen mussten lokalisiert und in der richtigen Reihenfolge ausgebaut werden, um ein späteres Wiedereinbauen in umgekehrter Reihenfolge zu gewährleisten (Abb. 29). Der Abbau der Thumba zeigte, dass für den tragenden Kern teilweise Bauschutt und unterschiedlichste Ziegelsteine sowie regionale Sandsteinplatten verwendet wurden. Als Mauermörtel konnte Kalkmörtel festgestellt werden.

Für die bildhauerischen Einzelemente wurden Transportkisten angefertigt. Der Transport erfolgte gut gepolstert ins Atelier. Die über einen längeren Zeitraum in der Kirche festgestellten Klimabedingungen wurden im Atelier mittels Klimageräten ebenfalls für die Dauer der Restaurierung gewährleistet.

Die Reinigung am Alabaster sollte vor allem trocken erfolgen, um die Verunreinigungen zu entfernen und dabei das teilweise sehr feuchtegeschädigte und feuchteempfindliche Steinmaterial nicht zusätzlich zu beanspruchen. Es wurden umfangreiche Reinigungsproben angelegt (Abb. 30). Neben Mikrosandstrahlverfahren und den unterschiedlichsten Strahlmitteln wurden auch Proben mittels Lasertechnik angelegt. Letztlich zeigte sich, dass Mikrosandstrahlverfahren bei Drücken unter 0,5 bar und Edelkorund als Strahlmittel die schonendsten und besten Reinigungsergebnisse erzielten (Abb. 31).

Alle (korrodierten) Eisen (Abb. 32) wurden ausgebaut und durch neue Edelstahlanker ersetzt. Mittels mobilem Röntgengerät wurden diverse Bauteile im Atelier durchröntgt, um entsprechende Aussagen bezüglich versteckter Eisen und deren Zustand machen zu können, ohne diese zwingend auseinander montieren zu müssen.

Aufgrund der Möglichkeit der Neubeimpfung des Edelstahls durch im Steinmaterial eingewanderte Restprodukte der Eisenkorrosion, wurden die neuen Edelstahleisen auf Basis eines vier schichtigen PU-Systems behandelt (Abb. 33). Im Bereich des Baldachsins sollten in Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege die alten, nur leicht angerosteten bauzeitlichen Eisenhaken und Zugeisen entrostet, ebenfalls mit dem PU-System versehen, wieder verwendet werden. Da die Feuchtesituation im Chor bereits verbessert wurde und bei der derzeit geplanten Außenrestaurierung der Kirche zusätzlich verbessert werden soll, ist davon auszugehen, dass es zu keinen schädigenden Feuchtesituationen mehr in der Kirche



Abb. 28 Verzerrungsfreies Messgerüst für die Erstellung verformungsgerechter Aufmaße jeder Steinschicht



Abb. 29 Aufbau der Zugankersysteme in den Säulen



Abb. 30 Reinigungsprobe am Alabaster



Abb. 31 Teilgereinigte Säule aus Alabaster



Abb. 32 Eisenkorrosion an der Unterseite einer Liegefigur mit brauner Verfärbung des Alabasters und starker Rissbildung



Abb. 33 Neue Verklammerung aus Edelstahl, zusätzlich mit PU-System beschichtet. Der beschädigte Alabaster wurde mit Antragsmörtel ergänzt.

kommen wird, und somit auch die historischen Eisen wiederverwendet werden konnten.

Risse oder Bruchstücke wurden dort, wo unbedingt notwendig mittels Epoxidharz und geringstmöglich dimensionierten Edelstahl-Gewindestäben vernadelt. Die eigentliche Rissverfüllung sowie die Kittungen, die Anböschungen und die Steinergänzungen erfolgten mit dem neu konzipierten Gipsmörtel. Dieser wurde nicht eingefärbt und wird abschließend mittels Retusche angepasst.

Farbfassungsreste konnten am gesamten Grabmal lediglich an den Flügeln der Putten festgestellt werden. Mit dem Technoskop konnten eine gelbe und eine rote Farbschicht eindeutig identifiziert werden. Diesbezüglich besteht die Überlegung, ob es sich dabei um die Grundierschicht einer ursprünglichen Vergoldung handelt. An keiner Stelle waren jedoch Reste von Vergoldung oder eines Anlegeöls auszumachen. Die Intention des Farbauftrags kann derzeit somit nicht geklärt werden. Ein Hinweis auf eine Gestaltungsabsicht gibt jedoch die Tatsache, dass der Farbauftrag nur an den Flügeln der Putten erfolgte. Beim Ansetzmörtel der Flügel handelt es sich um einen anderen Mörtel als der hauptsächlich verwendete Gipsmörtel. Daher sollte hinsichtlich der Flügelbelebung neben einer bauzeitlichen Gestaltung auch eine Maßnahme im Zuge einer späteren Reparatur in Betracht gezogen werden. Die Fassungsreste wurden mit einer Acrylatlösung fixiert und gefestigt. An den Werkstücken wurden eine ganze Reihe verschiedener Steinbearbeitungswerzeuge festgestellt. Aufgrund der Tatsache, dass sich Alabaster im bruchfrischen Zustand schnitzen lässt, konnten hierzu auch die entsprechenden Schnitz- sowie Sägespuren festgestellt werden. Auf den Rückseiten der Werksteine gab es auch deutliche Spitz-, Schlag- und Scharrierhiebe (Abb. 34). Die abschließende historische Oberflächenbearbeitung der Werksteine an den Schauseiten war jedoch fein geschliffen, ohne zusätzliche Politur.

6 Wiederaufbau des Grabmals und Fertigstellung

Der Wiederaufbau erfolgte über einer kompletten, flächigen Horizontalabdichtung mittels Walzblei. Die erste Steinschicht wurde darauf mit Trasskalkmörtel versetzt. Sukzessive wurden dann immer maximal zwei Werksteinschichten mit Gipsmörtel versetzt (Abb. 35). Im Anschluss daran wurde der Mauerkerne mit Ziegelvollmetersteinen und Trasskalkmörtel im Verband ausgemauert. Zur Anwendung kam ein Trasskalkmörtel der Fa. Hasit mit Suevittrass (Abb. 36). Um



Abb. 34 Historische Spuren der Steinbearbeitung am Alabaster mit Schnitz- und Scharrierhieben

eine eventuelle Ettringitbildung zwischen Trassmörtel (Ziegelmauerwerkskern) und Gipsmörtel (Alabaster-Werksteine) am direkten Kontakt zu verhindern, wurde dazwischen ein 2cm dicker Sumpfkalkmörtel als Puffer eingebaut. Die Werksteine wurden nach den Aufmaßplänen wieder millimetergenau positioniert. Nach einer entsprechenden Trocknungsphase von 3–4 Wochen, wurden weitere zwei Werksteinschichten der Thumba versetzt. Diese sukzessive Vorgehensweise sollte verhindern, dass zuviel Feuchtigkeit im Mauerwerkskern eingesperrt wird und später lediglich über den Alabaster nach außen diffundieren kann. Aus diesem Grunde wurde auch auf eine Verwendung von historisch verwendetem Sumpfkalkmörtel verzichtet, da die hierzu notwendige ausgiebige Wässerung der Ziegelsteine die Trocknungszeiten der Thumba immens verlängert hätte.

Als abschließende Schicht des Mauerwerkskerns wurde eine Marmorplatte eingebaut, auf welcher die vielen Einzelteile der Liegefiguren exakt ausgerichtet und anschließend mit Gipsmörtel versetzt werden konnten (Abb. 37).

Die Säulen, welche in der Regel aus 4–5 Einzelstücken zusammengesetzt wurden, sind im Atelier vormontiert und auf der Baustelle als Gesamtstück versetzt worden. Die Zugeisen zwischen den einzelnen Kapitellen wurden nach Schablone ausgerichtet, dann wurde die erste Werksteinschicht des Baldachins darauf versetzt. Die Zugeisen mussten dabei in die entsprechend vorgesehene Nut an der Werksteinunterseite millimetergenau eingeführt werden (Abb. 38).

Die neu konzipierten Gipsmörtel als Versetz- und als Steinergänzungsmörtel erfüllten dabei hervorragend ihren Zweck und somit alle Erwartungen. Die nun abschließend noch zu montierenden Frucht-



Abb. 35 Wiederaufbau der Bettlade, Einsatz des neuen Gipsmörtels beim Versetzen von Alabasterplatten



Abb. 36 Neuer Mauerwerkskern mit angesetzten Alabasterstücken

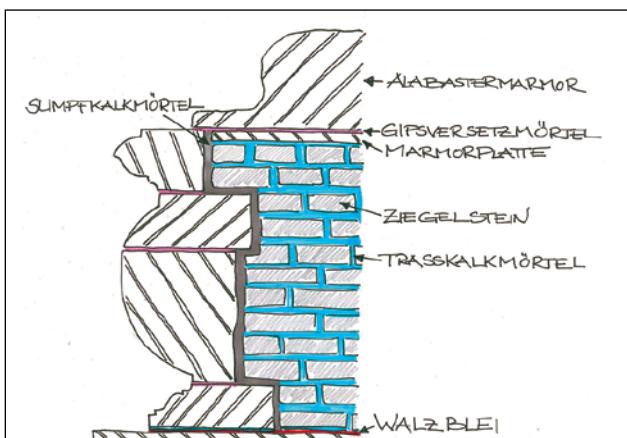


Abb. 37 Arbeitskizze zum Wiederaufbau der Thumba



Abb. 38 Ansicht der wiederaufgebauten Baldachinarchitektur von der Unterseite

gehänge sowie die Schlussretusche werden im Frühjahr 2015 abgeschlossen. Die entsprechend umfangreiche Dokumentation der Arbeiten erfolgt digital und wird bei der Kirchengemeinde und im Archiv des LAD in Esslingen hinterlegt.

Danksagung

Die Autoren danken der Kirchengemeinde Wertheim für die Unterstützung des Vorhabens vor Ort. Herrn Markus Rüsse danken wir für die Durchführung zahlreicher Laborversuche im Rahmen seiner Bachelorthesis an der HAWK Hildesheim. Zu Dank verpflichtet sind die Autoren auch Herrn Balau von der Fa. Schwenk Putztechnik für fachliche Beratung und Labornutzung, Herrn Dr. Burkhard Müller vom IWB Uni Stuttgart für fachliche Diskussion, Laborversuche und Beratung zum Baustoff Gips. Für die gute Zusammenarbeit, Unterstützung des Projektes und fruchtbare Diskussionen bedanken wir uns weiterhin bei Herrn Blumer und Herrn Wölbert, LAD.

Literatur

- [1] Gradmann, G.: Die Monumentalwerke der Bildhauerfamilie Kern. Straßburg, 1917.
- [2] Schneider, V.: Michael Kern (1580–1649) – Leben und Werk eines deutschen Bildhauers zwischen Renaissance und Barock. Ostfildern 2003.
- [3] Wipfler, J.: Der Chor der Wertheimer Stiftskirche als herrschaftliche Grablege, Die Epitaphien der Regenten bis ins frühe 17. Jahrhundert. In: Wertheimer Jahrbuch 1996, hrsg.: Historischer Verein in Verbindung mit dem Staatsarchiv Wertheim, Wertheim 1996.
- [4] Larisch, S.: Baldachingrabmal Graf Ludwig III. von Löwenstein-Wertheim und Anna von Stolberg – Bestandsaufnahme, Zustandserfassung, Maßnahmenvorschlag. Untersuchungsbericht beauftragt vom LAD Esslingen, 2010.
- [5] Henning, O.; Kühl, A.; Oelschläger, A; Phillip, O.: Technologie der Bindebaustoffe. Band 1: Eigenschaften, Rohstoffe, Anwendung, 2. Auflage, Berlin 1989.

- [6] Kulke, H.: Gips, seine Entstehung, Ausbildung und Vorkommen. Historischer Gips(mörtel) – Verwendungsprovinzen besonders in Mitteleuropa. Aus: Martin Hoernes (Hrsg.) Hoch- und mittelalterlicher Stuck, Bamberg 2000.
- [7] Wirsching, F.: Chemische Technologie. Band 3: Gips, München, Wien 1983.
- [8] Weichmann, M. J.: Historische Gipsmörtel in Deutschland: Mineralogische, chemische und physikalische Eigenschaften, Ableitung der Brennprozesse und Rezepturen, Wechselwirkungen mit Werksteinen. Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, 1998.
- [9] Wirsching, F.: Ullmann's Encyklopädie der technischen Chemie. Band 12, 4. Auflage, Weinheim 1976.
- [10] Lucas, H. G.: Gips als historischer Außenbaustoff in der Windsheimer Bucht. Dissertation der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 1992.
- [11] Krenkler, K.: Chemie des Bauwesens. Band 1: Anorganische Chemie, Berlin, Heidelberg, New York.
- [12] Gips-Datenbuch, Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V., 2013.
- [13] Stark, J.; Krug, H.: Baustoffpraktikum. Band 2: Bindemittel und Beton, Schriftenreihe des F.A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Weimar, 1999.
- [14] Lucas, G.: Versteifen von Gips. Zement – Kalk – Gips, Nr. 5, 1974.
- [15] Schramm, H. P. und Hering, B.: Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung, Akademische Druck- und Verlagsanstalt Graz, 1988.
- [16] Richter, J.: Vergleichende Untersuchungen an unterschiedlich zusammengesetzten Kalzium-sulfatbindemitteln. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Dresden, 2005.
- [17] Rüße, M.: Untersuchungen zu Naturgips; Eignung als Versetzmörtel in Anlehnung an historisch verbauten Gips für ein Alabaster – Grabmal in der Stiftskirche zu Wertheim. Bachelor-Thesis, HAWK Hildesheim/Holzminnen/Göttingen, 2012
- [18] Argow, H.: Untersuchung zum Einfluss von historischen Verzögerungsmitteln auf die Eigenschaften von Gips. Master-Thesis an der HAWK Hildesheim, 2010.
- [19] Gering, S.: Alabaster – Ermittlung von Eigenschaften und Kennwerten des Natursteins sowie Bewertung von verschiedenen Steinersatzmassen. Diplomarbeit, FH Potsdam, 2010.

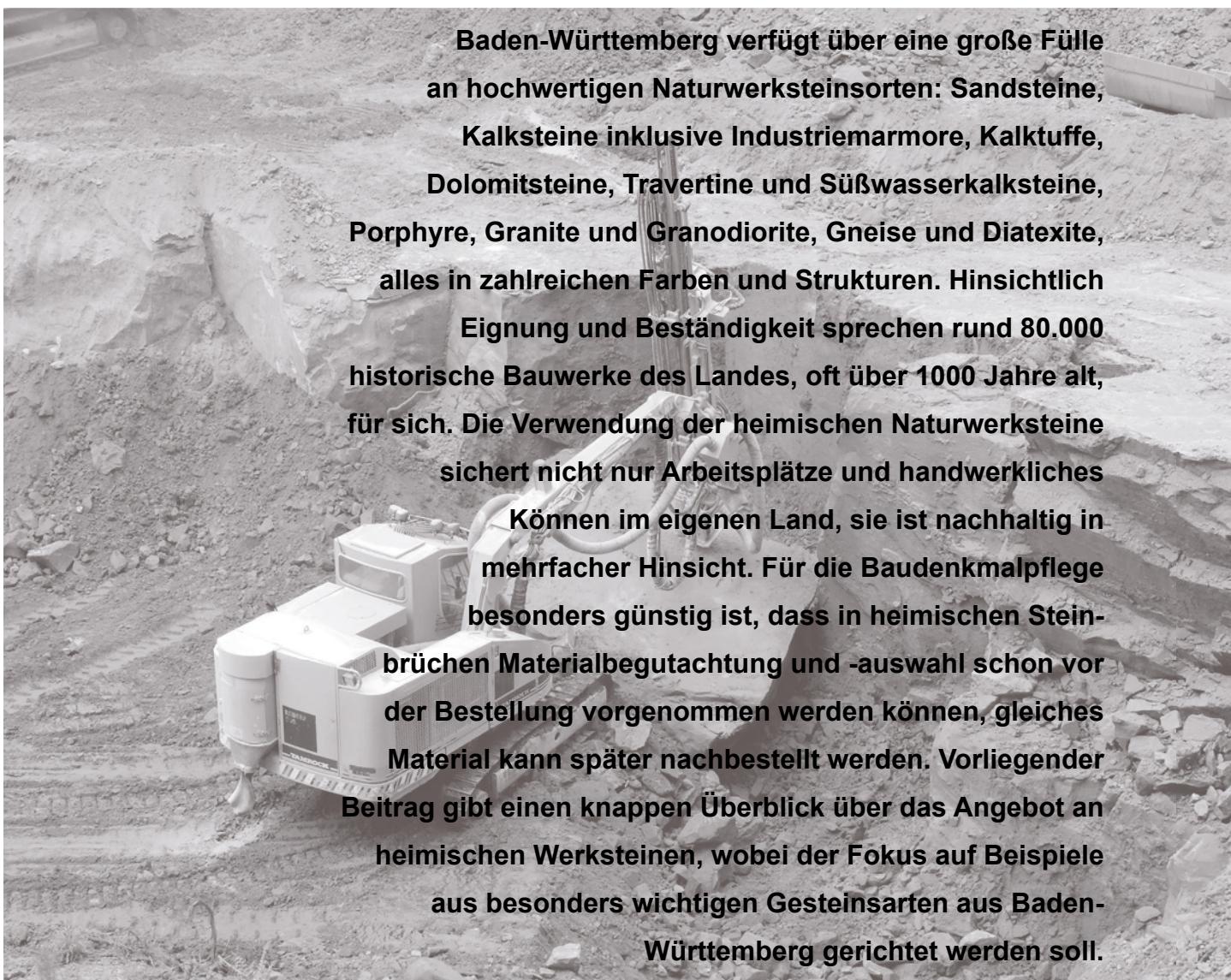
Abbildungen

- Abb. 1: Historische Ansicht des Baldachingrabes in der Stiftskirche um 1930, Marburger Bildindex, Bild-Nr. fm834906
- Abb. 3: Holzstich von Theodor Verhas von 1863, Ansicht des Chor mit Grabmal, Grafschaftsmuseum Wertheim
- Abb. 4: Vorzustand der Bettlaide im Jahr 2010, Landesamt für Denkmalpflege Esslingen
- Abb. 5: Visualisierung von Michael Kern, Grafschaftsmuseum Wertheim
- Abb. 20 und 21: Fa. Schwenk Putztechnik

Alle weiteren Abbildungen:
Friedrich Grüner und Frank Eger

Heimischer Naturwerkstein für heimische Bauwerke

von Wolfgang Werner



Baden-Württemberg verfügt über eine große Fülle an hochwertigen Naturwerksteinsorten: Sandsteine, Kalksteine inklusive Industriemarmore, Kalktuffe, Dolomitsteine, Travertine und Süßwasserkalksteine, Porphyre, Granite und Granodiorite, Gneise und Diatexite, alles in zahlreichen Farben und Strukturen. Hinsichtlich Eignung und Beständigkeit sprechen rund 80.000 historische Bauwerke des Landes, oft über 1000 Jahre alt, für sich. Die Verwendung der heimischen Naturwerksteine sichert nicht nur Arbeitsplätze und handwerkliches Können im eigenen Land, sie ist nachhaltig in mehrfacher Hinsicht. Für die Baudenkmalpflege besonders günstig ist, dass in heimischen Steinbrüchen Materialbegutachtung und -auswahl schon vor der Bestellung vorgenommen werden können, gleiches Material kann später nachbestellt werden. Vorliegender Beitrag gibt einen knappen Überblick über das Angebot an heimischen Werksteinen, wobei der Fokus auf Beispiele aus besonders wichtigen Gesteinsarten aus Baden-Württemberg gerichtet werden soll.

1 Einführung

Als „heimische Naturwerksteine“ werden nachfolgend all jene natürlichen, von Steinmetz und Bildhauer bearbeitbaren Gesteine bezeichnet, die aus dem Gebiet des heutigen Baden-Württembergs und aus den unmittelbar benachbarten Regionen stammen und die seit Jahrhunderten für Bauwerke in Baden-Württemberg genutzt werden. Zu den benachbarten Regionen gehören das Elsass, der Pfälzerwald, der Odenwald, Mainfranken und Steigerwald, die Fränkische Alb und das Nördlinger Ries, Vorarlberg und die Nordschweiz.

Baden-Württemberg verfügt über einen enormen historischen und modernen Gebäudebestand aus Naturwerkstein. Alleine an Bau- und Kunstdenkmalen existieren in Baden-Württemberg rund 80.000, die meisten davon bestehen ganz oder überwiegend aus Naturstein. In die Zeit, als heimischer Werkstein als selbstverständliches „Alltagsbaumaterial“ angesehen wurde, führt uns das folgende Zitat von HIRSCHWALD [1915] zurück, das aus seinem Büchlein über die praktische Beurteilung natürlicher Bausteine stammt: „*Von den mineralischen Rohstoffen, welche uns die Erdrinde in reicher Fülle bietet, wird keines in so gewaltigen Massen ausgebeutet, wie das dem Bau unserer Häuser, Straßen, Brücken, Tunnel- und Hafenanlagen dienende natürliche Gestein. Aber nur ein beschränkter Teil der zahlreichen in Betrieb stehenden Brüche liefert ein Material, das in aller Vollkommenheit diejenigen Eigenschaften vereinigt, denen das natürliche Gestein seine Wertschätzung als vornehmstes Baumaterial verdankt; fast so verschiedenartig wie ihre mineralogische Zusammensetzung sind auch die bautechnischen Eigenschaften der Steine, ihre Festigkeit, Wetterbeständigkeit und Bearbeitungsfähigkeit.“*

Es gibt eine Reihe von Definitionen des Begriffs „Naturwerkstein“, sie unterscheiden sich vor allem nach dem fachlichen Blickwinkel. Der Staatliche Geologische Dienst Baden-Württembergs, der in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine sehr große Zahl von Werksteinlagerstätten des Landes untersucht und dokumentiert hat, definiert so: „*Ein Naturwerkstein ist ein natürliches Gestein, aus dem nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten Rohblöcke in den erforderlichen Mengen und Dimensionen gewonnen werden können, welche hinsichtlich Bearbeitbarkeit, Festigkeit, Verwitterungsbeständigkeit und visueller bzw. architektonischer Attraktivität alle Voraussetzungen mitbringen, um in oder an einem Bauwerk langfristig und wiederholt Verwendung finden zu können*“ [WERNER et al. 2013]. Es müssen also drei Faktoren erfüllt sein:

- (1) Das natürlich entstandene Gestein muss aufgrund seiner mineralischen Zusammensetzung, Festigkeit und des gewinnbaren Blockvolumens geeignet sein, von einem Steinmetz oder einem Steinbildhauer zu den unterschiedlichsten Werkstücken bearbeitet zu werden.
- (2) Es weist architektonische Attraktivität auf und
- (3) kann aufgrund der Lagerstättenbeschaffenheit und -vorräte wiederholt und über längere Zeiträume verwendet werden.

Der wichtigste Unterschied zu allen anderen Definitionen¹ ist die unter (3) genannte Bedingung, wonach ausreichend große und wirtschaftlich gewinnbare Vorkommen (= Lagerstätten) vorhanden sein müssen. Die nachfolgend vorgestellten Gesteine erfüllen diese Voraussetzungen, für Architektur und Renovierungshandwerk stehen große geologische Vorräte zur Verfügung.

In Baden-Württemberg werden derzeit noch 52 Steinbrüche in 42 Abaugebieten betrieben, aus denen Originalmaterial bezogen werden kann. Viele Steinbrüche werden allerdings nur zeitweilig betrieben. Wie schon lange nicht genutzte Vorkommen zu Zwecken der Baudenkmalflege erschlossen werden können, ist in mehreren in den letzten Jahren erschienenen Publikationen beschrieben worden [WERNER 2013 a&b, WERNER et al. 2013], Tipps für Bestimmung und Auswahl des benötigten Materials sind bei WERNER [2014] zu finden.

2 Ausdruck der geologischen Entwicklungsgeschichte: Große Vielfalt an Naturwerksteinen

Besonders der süddeutsche Raum ist reich an verschiedenenartigen hochwertigen Werksteinen, die durch oberflächennahen Abbau gewonnen werden können (Abb. 1). Aufgrund der jüngeren erdgeschichtlichen Entwicklung, die durch viele tektonische Ereignisse und die bis heute anhaltende Heraushebung der Erdkruste gekennzeichnet ist, finden wir sehr unterschiedlich entstandene und artenreiche Gesteine in unmittelbarer Nachbarschaft. So liegen z.B. am westlichen Schwarzwaldrand auf nur 10 km Distanz 340 Mio. Jahre alte Granite neben 160 Mio. Jahren alten Kalkoolithen (Hauptrogenstein) und 50 Mio. Jahren alten Kalksandsteinen (Pfaffenweiler oder Rouffacher Sandstein). Listet man die seit Jahrhunderten

¹ Eine ausführliche Diskussion dieser Definitionen ist bei WERNER et al. 2013: S. 19–25 zu finden.

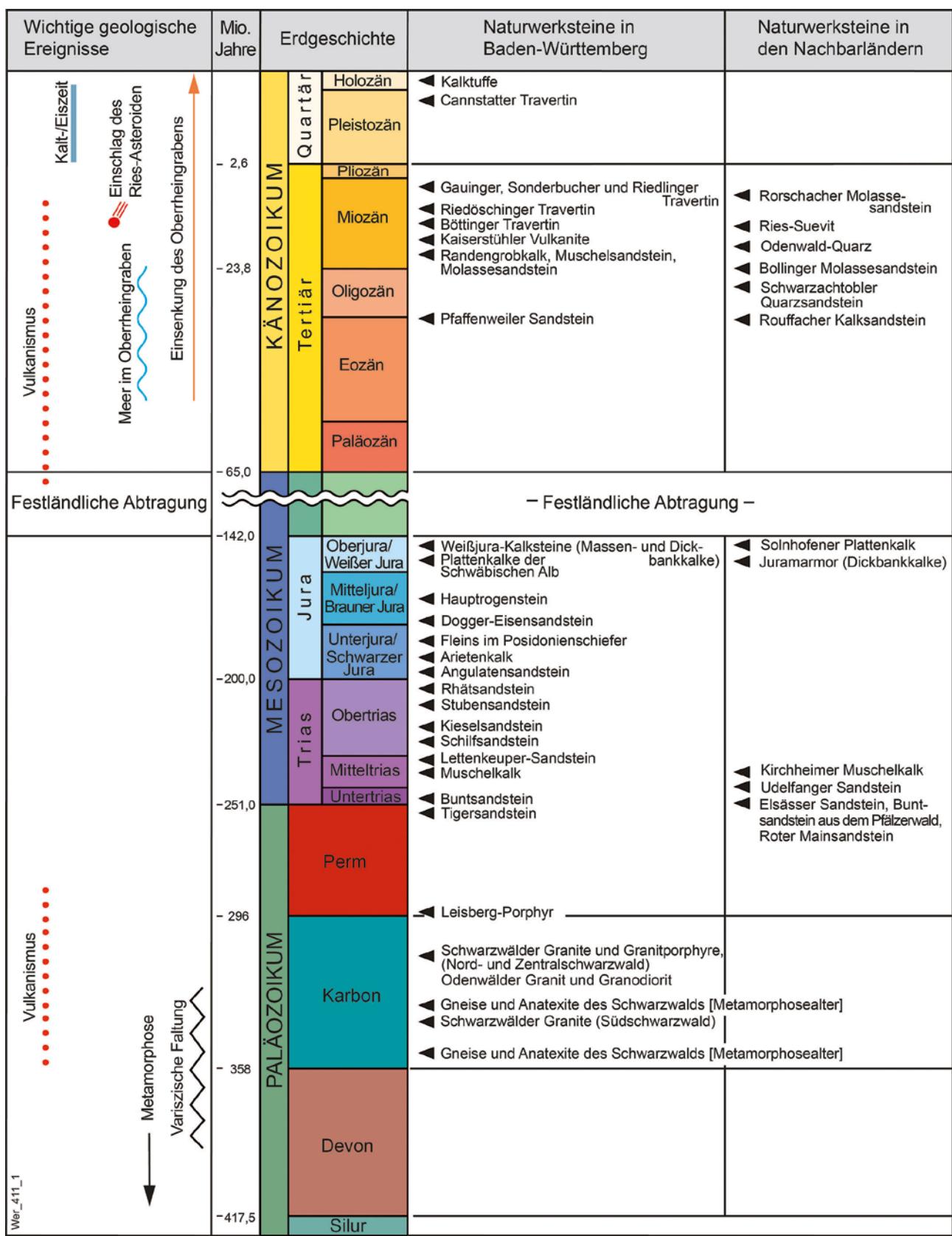


Abb. 1 Geologische Zeitleiste mit erdgeschichtlicher Position der in Baden-Württemberg (mittlere Spalte) und den benachbarten Regionen (rechte Spalte) auftretenden wichtigen Naturwerksteine. Graphik: LGRB

genutzten Gesteinsarten alleine des Landes Baden-Württemberg nach den bekannten Bezeichnungen in alphabetischer Reihenfolge auf, so ergibt sich nachfolgende Aufstellung:

- Angulatensandstein (Unterjura)
- Arietenkalk (Unterjura)
- Böttlinger Marmor (Jungtertiär)
- Buntsandstein im weiteren Sinne (Oberperm und Untertrias)
- Cannstatter Travertin (Pleistozän)
- Dogger-Eisensandstein bzw. Donzdorfer Sandstein (Mitteljura)
- Gauinger, Sonderbucher und Riedlinger Travertin (Jungtertiär)
- Hauptrogenstein (Mitteljura)
- Kaiserstühler Tuffstein, Phonolith und Karbonatit (Jungtertiär)
- Kalktuff/Quellkalk (Quartär)
- Kieselsandstein (Mittelkeuper)
- Leisberg-Porphyr (Perm)
- Lettenkeuper-Sandstein (Unterkeuper)
- Muschelkalk (Mitteltrias), darunter die Varietäten Crailsheimer Muschelkalk und Krensheimer Quadernkalk
- Pfaffenweiler Kalksandstein bzw. Markgräfler Kalksandstein (Alttertiär)
- Plattenkalksteine von Kolbingen, Renquishausen und Steinweiler (Oberjura)
- Posidonienschiefen (Fleins) von Holzmaden (Unterjura)
- Randengrobkalk bzw. „Tengener Muschelkalk“ (Jungtertiär)
- Molassesandstein (Jungtertiär)
- Rhätsandstein bzw. Pfrondorfer Sandstein (Oberkeuper)
- Riedöschinger Travertin (Jungtertiär)
- Schilfsandstein (Mittelkeuper),
- Schwarzwälder Granite (Karbon)
- Stubensandstein (Mittelkeuper), darunter Schlaitdorfer, Dettenhauser und Pliezhauser Stubensandstein
- Weißjura-Kalkstein inkl. Brenztal-Oolith und Korallenkalk (Oberjura).

Hinter diesen Überbegriffen verbergen sich weitere Gesteinsvarietäten, welche im Steinhandwerk oder der Baudenkmalpflege meist bekannter sind, als die geologischen Zuordnungen. Nehmen wir als Beispiele den Buntsandstein, den aus dem mittleren Keuper stammenden Schilfsandstein und die Schwarzwälder Granite. Im **Buntsandstein** (im weiteren Sinne, d.h. Oberperm und Untertrias) treten folgende Werksteinvarietäten auf: Neckartäler Hartsandstein, Roter

Mainsandstein, Nordschwarzwälder Buntsandstein, Tigersandstein bei Baden-Baden (Murgtalsandstein), Loßburger, Freudenstädter und Seedorfer Sandstein (Plattensandsteine), Lahrer Sandstein, Emmendinger Buntsandstein, Freiburger Buntsandstein (Lorettoberg), Südschwarzwälder Buntsandstein (Degerfelder und Schopfheimer Sandstein). **Schilfsandstein**-

Varietäten: Weiler Sandstein, Mühlbacher Sandstein, Niederhofener Sandstein, Pfaffenhofener Sandstein (Güglinger Sandstein), Maulbronner Sandstein, Freudentaler Sandstein, Heilbronner Sandstein, Stuttgarter Schilfsandstein, Schilfsandstein von Winnenden, Schilfsandstein im Gebiet Murrhardt-Gaildorf-Crailsheim sowie Wendelsheimer, Renfrizhauser und Trichtinger Sandstein. Eine ebenso große Bandbreite an Varietäten findet man bei den **Schwarzwälder Graniten**: Bühlertal-Granit (Gertelbach- oder Rotenberg-Granit), Raumünzach- bzw. Forbach-Granit, Oberkirch-Granit (Kappelrodeck- und Achertal-Granit), Seebach-Granit, Triberg- und Elztal-Granite, Malsburg-Granit, Albtal-Granit und St. Blasien-Granit. Die Aufzählung verdeutlicht, welche beeindruckende Vielfalt an Baustein-, Steinmetz- und Steinbildhauermaterial bei uns vorkommt; fast jede Gesteinsart steht für eine andere geologische Zeit und andere Entstehungsbedingungen.

Daneben gibt es noch eine Reihe von Gesteinen, die entweder wegen ihrer Seltenheit nur in geringen Mengen vom Steinmetz oder Steinbildhauer genutzt oder nur in bestimmten Gebieten zum Einsatz kamen, solange Kunststeine noch nicht in großen Mengen und günstigen Preisen verfügbar waren. Dazu gehören z.B. Alabastergipse aus Schichten des Keupers (Herrenberg-Kayh) und des Muschelkalks (Forchtenberg), bestimmte Dolomitgesteine (besonders auf der Ostalb) und tertiärzeitliche Kalksandsteine am Hochrhein.

Eine umfassende Darstellung der heimische Naturwerksteinschätze ist Ende 2013 fertiggestellt und im Jahr 2014 ausgeliefert worden; in diesem Nachschlagewerk wird auf die lange Geschichte der Gewinnung und Nutzung der heimischen Werksteine und auf die einzelnen Werksteinlagerstätten des Landes eingegangen [WERNER et al. 2013]. Einen Überblick über alle mineralischen Rohstoffe des Landes bieten die Landesrohstoffberichte [LGRB 2006, LGRB 2013].

3 Beispiele für das Angebot an heimischem Naturwerkstein

Aufgrund der immensen Vielfalt an Naturwerksteinen ist es in einem Tagungsbeitrag nicht möglich, einen

vollständigen Überblick zu geben. Daher sollen im Folgenden aus der zuvor erwähnten Zahl heimischer Gesteine, die sich – nach der unter Abschnitt 1 gegeben Definition – als hochwertiger Werkstein eignen und zugleich langfristig verfügbare Reserven aufweisen, beispielhaft einige wichtige dargestellt werden. (1) Als Vertreter wichtiger Sandsteintypen: **Buntsandstein** aus dem Neckartäler Odenwald, aus dem Nordschwarzwald und den Lahr-Emmendinger Vorbergen bei Freiburg, **gelber Schilfsandstein** aus Heilbronn. (2) Als Vertreter der Karbonatgesteine: Der **Süßwasserkalkstein von Zwiefalten** (Gauinger und Sonderbucher Travertin). (3) Als Vertreter der polierfähigen Kristallingesteine: **Malsburg-Granit** aus dem Südschwarzwald. Rund 80 weitere Gesteine sind in dem im Jahr 2014 ausgelieferten LGRB-Nachschlagewerk inklusive der Bezugsmöglichkeiten beschrieben [WERNER et al. 2013]. Die nachfolgenden Kurzbeschreibungen sind überwiegend diesem Buch entnommen.

3.1 Buntsandstein

Von der großen Palette an Buntsandsteinvarietäten, die zwischen Schwarzwald, Pfälzerwald und Main auftreten, werden drei wichtige Varietäten vorgestellt, die einerseits seit langem verwendet werden (hoher Gebäudebestand) und hohe Qualität aufweisen und zudem aktuell leicht verfügbar sind.

Neckartäler Hartsandstein (Abb. 2, 3)

Das Abbaugebiet des Neckartäler Hartsandsteins erstreckt sich im südlichen Buntsandstein-Odenwald von Neckarsteinach über Eberbach bis zur hessisch/baden-württembergischen Grenze. Es handelt sich um einen hell- bis mittelroten, oftmals hellgelb bis weißlich gestreiften Mittelsandstein. Diese äußerstwitterungsbeständigen und gut bearbeitbaren Sandsteinschichten erreichen nutzbare Mächtigkeiten von 80–100 m. Die große Härte und Widerstandsfähigkeit der Sandsteine ist vor allem auf die Zusammensetzung der Gesteine (reine Quarzsandsteine) und eine gute Kornbindung durch Drucklösungsvorgänge während der Verfestigung der Sedimente zurückzuführen. In den drei zurzeit betriebenen Steinbrüchen bei Eberbach-Igelsbach und -Rockenau am Neckar sowie an der Gaimühle im Ittertal treten die Sandsteine mit großen Bankmächtigkeiten auf. Ein weitständiges Kluftsystem lässt eine Gewinnung großer Rohblöcke zu. Die gute Bearbeitbarkeit und die ungewöhnliche Haltbarkeit des Neckartäler Hartsandsteins machen ihn zu einem beliebten Werkstein. Dies zeigen die zahlreichen Bauten von Schlössern, Brücken und die vielseitigen früheren Verwendungsmöglichkeiten

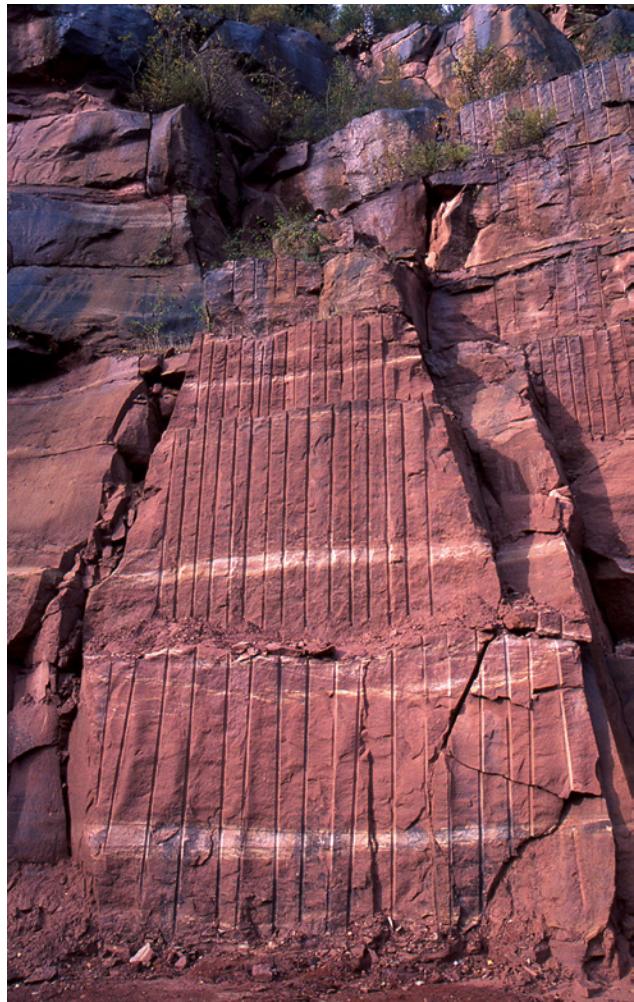


Abb. 2 Steinbruch im Neckartäler Hartsandstein bei Rockenau nahe Eberbach (Odenwald). Foto: Wolfgang Werner



Abb. 3 Platten von Neckartäler Hartsandstein im Werk der Fa. Bambergener Natursteinwerke H. Graser in Bamberg. Foto: Wolfgang Werner

im Bereich der chemischen Industrie. Heute wird der Sandstein, um nur einige Beispiele zu nennen, als Renovierungsmaterial (Freiburger Münster und das Heidelberger Schloss) sowie als Fassaden-, Boden- und Wandplatten, Mauersteine im Garten- bis Straßenbau sowie als Blöcke beim Hang- und Uferverbau geschätzt.

Bezugsmöglichkeiten: Aktuell stehen drei Steinbrüche im Hartsandstein in Nutzung. Zwei Brüche befinden sich an den Neckarhängen bei Eberbach, ein weiterer im Ittertal an der Landesgrenze Baden-Württemberg/Hessen: Lieferadressen: (1) Helmut Melchior Natursteinbetriebe, Stbr. Gretengrund bei Eberbach, Werk: Weinstraße 61, 74392 Freudenstadt. (2) Bamberger Natursteinwerk Hermann Graser GmbH, Dr.-Robert-Pfleger-Straße 25, 96052 Bamberg, Internet: www.bamberger-natursteinwerk.de. Im hessischen Teil des Buntsandstein-Odenwalds wird ein dem Neckartäler vergleichbarer Buntsandstein abgebaut, so z.B. von der Fa. Hans Hintenlang in Gras-Ellenbach. Er wird hier als „Odenwälder Buntsandstein rot“ bezeichnet (www.natursteinwerk-hintenlang.de).

Seedorfer Sandstein (Nordschwarzwald) (Abb. 4, 5) Dieser feinkörnige Plattensandstein des Oberen Buntsandsteines tritt in der Region östlich von Schramberg auf. Er wird im Steinbruch der Fa. Roth in Vierhäuser südwestlich von Seedorf gewonnen. Die kräftig roten, gut sortierten und hellglimmerführenden Fein- bis Mittelsandsteine sind zumeist tonig-ferritisch, seltener kieselig oder karbonatisch gebunden. Die Werksteinfazies im Steinbruch Vierhäuser erreicht eine Mächtigkeit von 2,5 bis 4 m mit Bankmächtigkeiten zwischen 0,6 und 1,2 m. Überlagert werden die Werksteine durch eine 3–5 m mächtige Abraumschicht, die sich aus roten Tonsteinen des Oberen Buntsandsteins und Gesteinen des Unteren Muschelkalks zusammensetzt. Diese Überdeckung verhindert die Aufwitterung der darunter liegenden Sandsteine, was zu qualitativ hochwertigen Werksteinen führt. Aufgrund der weitständigen und steilen Durchklüftung der Sandsteine ist eine Gewinnung von mehrere Kubikmeter großen Rohblöcken möglich. Der Seedorfer Sandstein wurde für eine Vielzahl von Kirchen und Profanbauten verwendet; auch am Schaffhauser Münster ist er zu finden. Für Renovierungsarbeiten am Turm des Freiburger Münster wurde in den 1950er bis 60er Jahren Seedorfer Sandstein erfolgreich eingesetzt (während sich der aus Freudenstadt stammende Plattensandstein dort als nicht witterungsstabil herausstellte). Derzeit wird er überwiegend als Mauerstein, im Garten- und Landschaftsbau sowie als Ornamentgestein für bildhauerische Arbeiten nachgefragt.

Bezugsmöglichkeiten: Roth Natursteine Buntsandsteinwerk GmbH, Vierhäuser 13, 78713 Schramberg; Internet: www.roth-sandsteine.de Alternativen können die allerdings nur zeitweilig abgebauten Plattensandsteine des Nordschwarzwalds bei Remchingen-Wilferdingen (Fa. NSN) und bei

Tiefenbronn-Mühlhausen (Erich Freihofer Sandsteinwerk) bieten: (1) NSN Natursteinwerke Nordschwarzwald GmbH & Co. KG, Brettener Straße 80, 75417 Mühlacker, Internet: www.nsn-naturstein.de (2) Erich Freihofer Sandsteinwerk, Friolzheimer Str. 56, 71299 Wimsheim.

Emmendinger Sandstein, Tennenbacher Sandstein (Abb. 6, 7)

Im Gebiet der Emmendinger Vorberge zwischen Freiamt-Niedertal, Tennenbach, Heimbach und dem Bleichbachtal werden spätestens seit dem 12./13. Jh. meist mittel- bis dunkelrote, selten weiße bis gelbliche Sandsteine des Buntsandsteins gewonnen. Die für die Werksteingewinnung nutzbare Mächtigkeit liegt meist zwischen 40 und 50 m; hochwertige Bereiche (Bildhauermaterial) sind i. d. R. zwischen 10 und 15 m mächtig. Die durchschnittlichen Bankmächtigkeiten variieren zwischen 0,5 und 2 m, erreichen aber auch 5–8 m. Die zumeist kieselig gebundenen, mittel- bis grobkörnigen, dickbankigen Sandsteine enthalten konglomeratische Horizonte (sog. Geröllsandstein). Verwendung fanden die genannten Sandsteine in einer Vielzahl von repräsentativen und einfachen Bauwerken in der näheren und weiteren Umgebung; bekanntestes Bauwerk ist das Freiburger Münster. Die Steine des Mauerwerks sowie für figürliche Arbeiten stammen zum großen Teil aus den Steinbrüchen der Emmendinger Vorberge.

Die im Juni 2012 begonnene und im Winter 2014 abgeschlossene Neuerschließung eines alten Klostersteinbruchs am Langauweg bei Tennenbach (Krs. Emmendingen) durch die Fa. Lauster Steinbau (Abb. 6) gibt Anlass zur Hoffnung, dass die Münsterbauhütte Freiburg in naher Zukunft wieder Originalsandstein aus Tennenbach und damit aus dem ursprünglichen Hauptherkunftsgebiet der „Münstersteine“ an dieser bedeutenden Kathedrale verbauen kann. Ähnliche Gesteine werden im Bleichbachtal bei Kenzingen und bei Lahr-Kuhbach abgebaut.

Bezugsmöglichkeiten:

1. Fa. Nuvolin GmbH, Natursteinwerk, Friedhofstr. 25, 77933 Lahr (Werk: Tullastr. 19, 79341 Kenzingen), Thomas Nuvolin
2. Fa. Werner Göhrig, Breitmatten 28/1, 77933 Lahr-Kuhbach (Internet: www.steinmetz-goehrig.de).
3. Stbr. Langauwald bei Tennenbach, Stadtforst Emmendingen, Betreiber: Fa. Lauster Steinbau GmbH Natursteinwerke, Postfach 500720, 70337 Stuttgart; Verwaltung: Enzstraße 46, 70376 Stuttgart, Internet: www.laustersteinbau.de. Werk: Lauster Steinbau GmbH, Stuttgarter Str. 73, 5433 Maulbronn.



Abb. 4 Abbau von Seedorfer PlattenSandstein (Oberer Buntsandstein des Nordschwarzwalds) im Steinbruch Vierhäuser der Fa. Roth. Foto: Fa. Roth, Seedorf

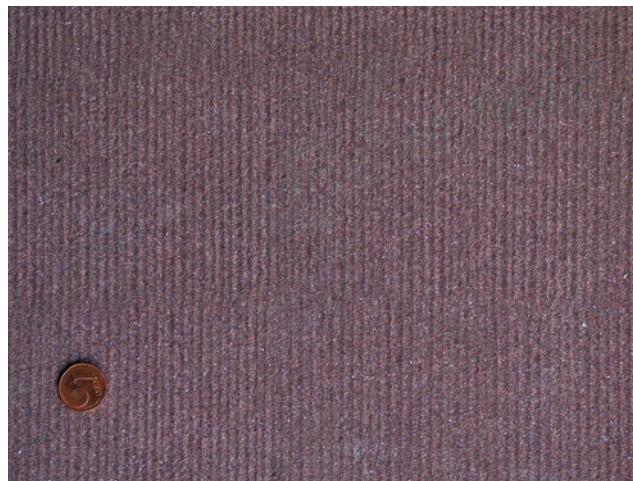


Abb. 5 Platte von Seedorfer Buntsandstein, scharriert; Bearbeitung in der Steinmetz- und Bildhauerwerkstatt Eduard Schnell, Fridingen a. d. Donau. Foto: Wolfgang Werner



Abb. 6 Abbau von Buntsandstein in einem wieder in Betrieb genommenen historischen Buntsandsteinbruch bei Tennenbach (Krs. Emmendingen), nördlich von Freiburg. Abbauspuren belegen, dass der Bruch schon im Mittelalter betrieben wurde. Gewinnung von Rohblöcken im November 2014 durch die Fa. Lauster Steinbau, Stuttgart. Foto: Wolfgang Werner



Abb. 7 Mit der Schwertsäge freigelegter Tennenbacher Sandstein im neuen „Münstersteinbruch“ bei Tennenbach, Krs. Emmendingen. Foto: Wolfgang Werner

3.2 Heilbronner Schilfsandstein (Abb. 8, 9)

Aus der großen Zahl der Schilfsandstein-Varietäten (s. Abschnitt 2) wird der Heilbronner Sandstein als Beispiel für diese viel verwendeten Feinsandsteine des Keupers angeführt. Der Heilbronner Sandstein gehört neben dem aus Mühlbach und Maulbronn zu den bedeutendsten und in besonders großem Umfang genutzten Schilfsandstein-Varietäten. Er ist überwiegend gelblichbraun, bankweise aber auch rötlich und dunkelvioletttrot geflammt. Verbreitet ist er im Keuperbergland östlich und südöstlich von Heilbronn und in den angrenzenden Löwensteiner Bergen. Die Vorkommen bei Heilbronn weisen das größte Werksteinpotenzial auf. Dort folgen unter 8–10 m plattigen Sandsteinen 15–20 m mächtige, dickbankige bis massive Sandsteine mit charakteristischer Pigmentierung aus Eisen- und Manganoxiden sowie schlierenartiger



Abb. 8 Gewinnung von Heilbronner Schilfsandstein im östlich von Heilbronn gelegenen Steinbruch Winterhaldenhau der Fa. Harald Holz. Foto: Wolfgang Werner



Abb. 9 Kirche St. Kilian in Heilbronn, errichtet aus gelblichbraunem Schilfsandstein aus den nahen Steinbrüchen. Foto: Wolfgang Werner

Brauntönung. Genutzt wird der Heilbronner Sandstein in großem Umfang seit dem Mittelalter. In einem 1983 wiedereröffneten Bruch bei Heilbronn-Sontheim wird er heute noch von der Fa. Harald Holz abgebaut. Als schöne Verwendungsbeispiele können angeführt werden: Kilianskirche, Rathaus und Bahnhof sowie viele Gründerzeitvillen in Heilbronn, Reichsbankgebäude in Düsseldorf, Hoftheater in Wiesbaden, Mariä-Empfängniskirche in Düsseldorf, Hauptbahnhöfe in Mainz, Frankfurt a.M. und Amsterdam, der als Wahrzeichen der Stadt bekannte Wasserturm von Mannheim (zusammen mit Sandstein aus Sinsheim-Weiler), Frankfurter Börse, Landesgewerbeamt bzw. Haus der Wirtschaft sowie Olgabau in Stuttgart und viele Privat- und Verwaltungsgebäude in Berlin, Frankfurt und fast allen süddeutschen Großstädten. Aus dem Heilbronner Sandstein werden heute vor allem Werkstücke für Renovierungsarbeiten sowie Boden- und Fassadenplatten gefertigt.

Bezugsmöglichkeit: Fa. Harald Holz, Natursteinwerk, Kaltenbergstr. 15, 75031 Eppingen-Mühlbach, Internet: www.natursteinwerk-holz.de; in diesem Werk wird der aus dem Steinbruch Winterhaldenhau bei Heilbronn (RG 6821-1) stammende Schilfsand-

stein verarbeitet; das Werk liegt im Gelände der Mühlbacher Steinbrüche.

3.3 Süßwasserkalkstein von Zwiefalten (Gauinger und Sonderbucher Travertin) (Abb. 10, 11)

Auf der mittleren Schwäbischen Alb, im Raum Zwiefalten-Riedlingen, treten Süßwasserkalksteine in Schichten der jungtertiären Oberen Süßwassermolasse auf, die mehrere Meter mächtige Werksteinlager von Travertinqualität enthalten (Abb. 10). Die Gewinnung dieser Industrie-Travertine erfolgt bei den Ortschaften Zwiefalten-Gauingen und Zwiefalten-Sonderbuch derzeit in drei Steinbrüchen. Die Brüche bei Langenenslingen nahe Riedlingen sind trotz interessantem Potenzial seit einigen Jahrzehnten stillgelegt. Der Gauinger, Sonderbucher oder Riedlinger Travertin ist ein hell- bis dunkelbraun schattierter, fossilreicher, kavernöser und polierfähiger Kalkstein. Auffallendes Texturmerkmal sind die zahlreichen braunen Kalkkrusten, die sich um Algenmatten gebildet haben (Abb. 11). Die Industrie-Travertine aus Gauingen, Sonderbuch und Langenenslingen eignen sich für Mauersteine, Platten und Massivarbeiten aller Art sowie für Bildhauerarbeiten. Wegen ihrer interessanten Strukturen, guten Schleif- und Polierfähigkeit

und langfristigen Witterungsbeständigkeit werden sie heute besonders für Wand- und Fassadenverkleidungen eingesetzt. Bekannte Verwendungsbeispiele sind das Kloster und das Münster in Zwiefalten, der Königin-Olga-Bau (heute Dresdner Bank) und die Eberhardskirche in Stuttgart, die Landeszentralbank in Heilbronn, das Olympiastadion in Berlin und die neue Synagoge in München.

Bezugsmöglichkeiten: (A) Gauinger Travertin: Fa. Lauster Steinbau GmbH Natursteinwerke, Postfach 500720, 70337 Stuttgart; Verwaltung: Enzstraße 46, 70376 Stuttgart, Internet: www.laustersteinbau.de. Werk: Lauster Steinbau GmbH, Stuttgarter Str. 73, 5433 Maulbronn. (B) Sonderbucher Travertin: (1) Schön + Hippelein GmbH & Co. KG, Industriestraße 1, 74589 Satteldorf, Internet: www.schoen-hippelein.de. (2) Traco GmbH, Poststraße 17, 99947 Langensalza, Internet: www.traco.de.

3.4 Malsburger-Granit (Südschwarzwald)

(Abb. 12, 13)

Wie im Nordschwarzwald (dort besonders Seebach- und Raumünzach-Granit) treten auch im Südschwarzwald verschiedene ausgedehnte Granitkörper (Granitplutone) auf. Vom Westen nach Osten werden die Südschwarzwalder Granite bezeichnet als Rand-, Münsterhalden-, St. Blasien-, Bärhalde-, Schluchsee-, Wellendingen-, Klemmbach-, Malsburg-, Mambach-, Schlächtenhaus-, Albtal-, Säckingen- und Hauenstein-Granit. Beim Malsburg- und Albtal-Granit handelt es sich um Biotitgranite, die häufig feinkörnige, dunkle Mineralanreicherungen und seltener Nebengesteinseinschlüsse enthalten. Zu den Zweiglimmergraniten werden Bärhalde- und Schluchsee-Granit gezählt. Diese Granite zeigen neben Biotit und Muskovit als Glimmerminerale auch den feinschuppigen Hellglimmer Serizit.

Der Malsburg-Granit wird in mehreren Brüchen abgebaut. Allerdings wird er seit Jahrzehnten primär für Natursteinkörnungen und den einfachen GaLa-Bau verwendet, eine gezielte Gewinnung von Rohblöcken für Steinmetzarbeiten findet heute nicht mehr statt; sie wurden schon in den 1960er Jahren eingestellt. Schonend gewonnen (also nicht mitbrisanten Sprengstoffen) werden die sog. Findlinge, das sind runde Blöcke aus der bis 20 m mächtigen oberflächennahen Auflockerungszone. Diese Blöcke sind unterhalb der wenige cm dicken angewitterten Schale ebenso kompakt wie Blöcke aus frischen Aufschlüssen. Der Malsburg-Granit, auch als „Marzell-Granit“ bekannt, ist in den Steinbrüchen bei Malsburg-Mar-

zell und Tegernau über dem Talniveau in einer Mächtigkeit bis 100 m aufgeschlossen.

Das graue bis rötlichgraue Gestein (Abb. 12 und 13) weist ein mittel- bis kleinkörniges Gefüge ohne bevorzugte Einregelung auf. Die Hauptgemengteile sind Plagioklas, Kalifeldspat, Quarz und Biotit. In den östlichen Randbereichen des Plutons konnte zudem schwarzgrünlche Hornblende festgestellt werden. In den Steinbrüchen bei Malsburg-Marzell ist die graue Varietät des Malsburg-Granits mit weißem bzw. rosa Kalifeldspat aufgeschlossen. Dagegen werden die Varietäten in den Steinbrüchen Tegernau und Lüttschenbach von rötlichem Kalifeldspat dominiert. In den vorherrschenden gleichkörnigen Bereichen liegt die Kristallgröße meist bei 1–4 mm.

Der Malsburg-Granit eignet sich nicht nur für den Flussbau oder für Pflaster- und Bordsteine. Aufgrund seiner guten Kornverzahnung und resultierenden Polierfähigkeit ist auch eine Verwendung für Treppenstufen, Boden- und Fassadenplatten, Fensterbänke sowie als Grab- und Denkmalsteine möglich. Grabsteine aus der Mitte des 20. Jh., die vereinzelt noch auf heimischen Friedhöfen erhalten sind, zeigen, dass dieser Granit bildhauerisch gestaltet werden kann. Am Rathaus in Malsburg-Marzell ist dieser Granit für Fenster- und Türgewände, Treppen, als Dekorstein und als Massivmauerstein verwendet worden.

Bezugsmöglichkeiten: (1) Alfred Dörflinger Granitwerke GmbH, Kreisstraße 7, 79429 Malsburg-Marzell, Internet: www.doerflinger-granit.de. (2) Alfred Seider Granit- und Schotterwerk, Lausbühl 2, 79429 Malsburg-Marzell. (3) Lothar Voeglin Sandwerk Tegernau, Dorfstraße 9, 79692 Niedertegernau.

4 Diskussion und Ausblick

Die Veränderungen in den Baugewohnheiten und das fast unüberschaubare Angebot an billigerem, oft aggressiv vermarktetem Importgestein haben der heimischen Naturwerksteinindustrie schwer zugesetzt, ist sie doch an zahlreiche, oft kostenintensive Standards in puncto Arbeitssicherheit, Entlohnung, Qualitätssicherung und Umweltschutz gebunden. Wegen der umfangreichen Verwendung von billigerem Fremdmaterial aus über 20 Länder – ganz vorne dabei: China, Indien und Brasilien – ist über Jahrzehnte hinweg im Steinhandwerk und selbst im Bereich der Baudenkmalpflege das Wissen über das heimische Werksteinangebot weitgehend verloren gegangen. Doch nun zeichnet sich seit einigen Jahren ein allmähliches Umdenken ab.



Abb. 10 Steinbruch in Zwiefalten-Gauingen, angelegt in mioänzeitlichen Süßwasserkalksteinen, dem sog. Gauinger Travertin. Foto: Wolfgang Werner

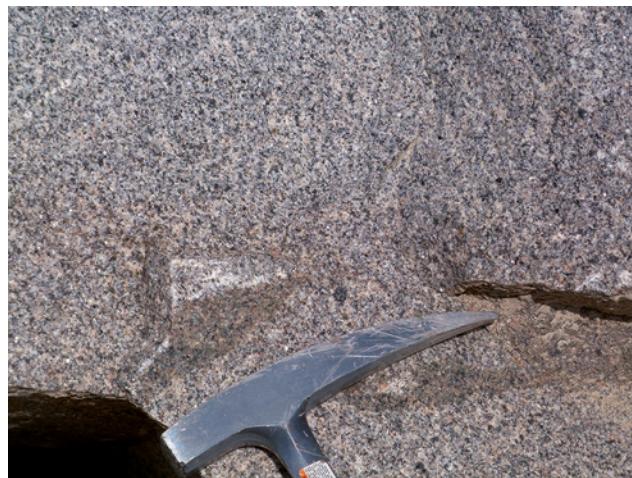


Abb. 12 Malsburg-Granit der grauen Varietät aus dem Steinbruch Malsburg-Marzell der Fa. Dörflinger. Foto: Wolfgang Werner.

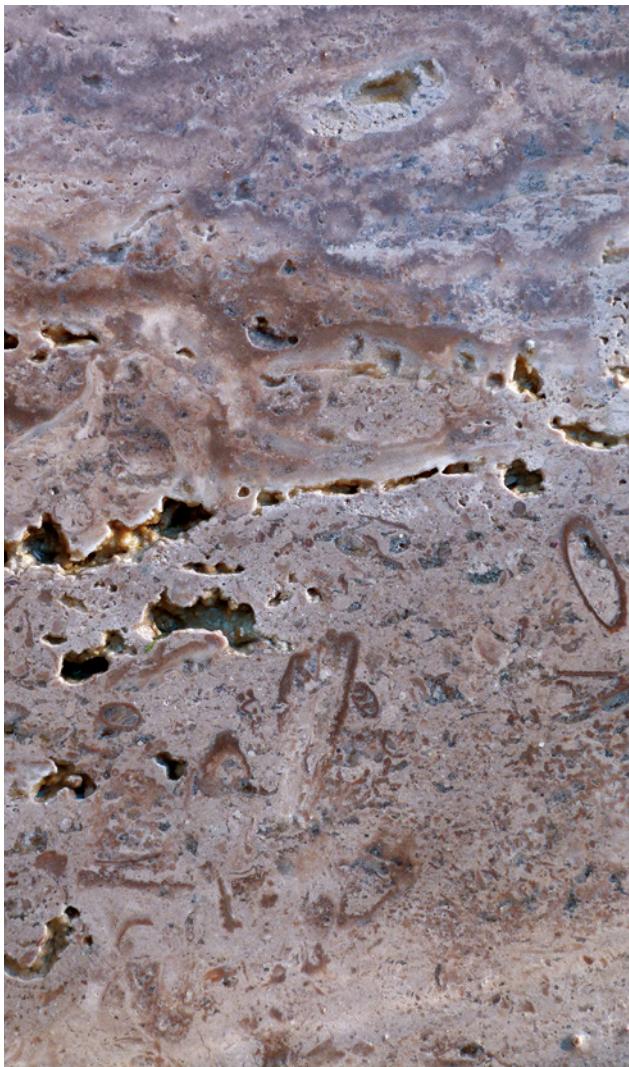


Abb. 11 Senkrecht zur Schichtung angelegter Anschnitt von Gauinger Travertin. Foto: Wolfgang Werner



Abb. 13 Rötlichgraue Varietät des Malsburg-Granits aus dem Steinbruch Malsburg-Marzell der Fa. Dörflinger. Foto: Jens Wittenbrink



Abb. 14 Auf Maß gesägte Blöcke von Lauchheimer Eisensandstein im Hof der Bamberger Natursteinwerke H. Graser, fertig zum Abtransport in die Ulmer Münsterbauhütte. Weil sowohl in Baden-Württemberg als auch in Bayern kein Eisensandsteinbruch mehr in Betrieb war, wurde vom LGRB im Auftrag der Münsterbauhütte eine geeignete Lagerstätte erkundet, aus der die Blöcke gewonnen werden konnten. Foto: Wolfgang Werner, Jan. 2015

Dem mittlerweile recht schlechten Image fernöstlicher Gesteine versucht man derzeit durch verschiedene Zertifikate entgegenzuwirken, mit denen der Importeur belegen möchte, dass Werksteinroh- oder -fertigwaren nicht durch Kinderarbeit oder sonstige ausbeuterische und stark gesundheitsgefährdende Arbeit erzeugt wurden. Auf Nachfrage müssen die Zertifizierungsagenturen allerdings meist zugeben, dass sie den tatsächlichen Weg der Gesteine nicht nachverfolgen können. Schon aus rein petrographischen Gründen ist das oft gar nicht möglich; graue Granite treten in Hunderten von z.B. chinesischen Steinbrüchen in auch vom Fachmann kaum zu unterscheidenden Varietäten auf. Wie will man beim Zwischenhändler in China, der von vielen Dutzend Steinbrüchen beliefert wird, zuverlässig erkennen, welcher Granit „fair“ und welcher unter – aus europäischer Sicht – untragbaren Verhältnissen gewonnen wurde?

Die Verwendung hochwertiger heimischer Gesteine sichert nicht nur Arbeitsplätze und handwerkliches Können im eigenen Land, sie ist nachhaltig in mehrfacher Hinsicht: kurze Transportwege, im Vergleich sehr geringe Emissionen und niedriger Energieverbrauch, Abbau unter Einhaltung strenger Kriterien von Arbeitssicherheit und Umweltschutz. Ein weiterer Vorteil wiegt für die Baudenkmalpflege besonders schwer: nur in heimischen Steinbrüchen können Materialbegutachtung und -auswahl schon vor der Bestellung vorgenommen werden, gleiches Material kann nachbestellt werden.

Die in Deutschland noch existierenden Betriebe, die heimische Natursteine gewinnen, haben aus den eingangs genannten Gründen verschiedene Strategien entwickelt, um trotz ausländischer Billigimporte bestehen zu können. Dazu gehört z.B. die Nutzung mehrerer Steinbrüche, die jeweils unterschiedliche Gesteine erschließen und die bei größeren Bauaufträgen saisonal, meist über 2–3 Monate hinweg, „just in time“ genutzt werden. Einige kleinere Betriebe bauen nur für den eigenen Bedarf ab und sind ansonsten im Bereich des Bauhandwerks als Unternehmer tätig. Wieder andere betreiben vor allem große Brüche und Anlagen zur Erzeugung von Körnungen, Mineralstoffgemischen und Mehlen für die Baustoffindustrie und gewinnen nur in Teilbereichen ihrer Lagerstätten Werksteinblöcke (besonders bei Betrieben im Muschelkalk, Oberjura-Kalkstein und Schwarzwald-Granit).

Für den Steinmetz oder Steinbildhauer bedeutet dies in der Praxis häufig, dass derzeit Blöcke aus heimischen Lagerstätten nicht so kurzfristig und bequem bestellt werden können, wie bei vielen ausländischen Natursteingroßimporteuren. Gerade bei kleineren Bestellungen ist deshalb eine gewisse

Hartnäckigkeit und vorausschauende Planung erforderlich. Ein Grund für die oft ablehnende Haltung von Steinbruchbetreibern gegenüber dem Neukunden, der einige Kubikmeter Werkstein für die Denkmalpflege oder eigene bildhauerische Arbeiten benötigt, ist vor allem die Sorge um Reklamationen. Ratsam ist es daher, mit dem Abbauunternehmer ins Gespräch zu kommen und möglichst gemeinsam Blöcke auszuwählen. Durch ansteigende Nachfrage und wieder verbesserten Austausch zwischen Steinbruchindustrie und Steinhandwerk können die derzeit bisweilen noch existierenden Hürden bei der Materialbeschaffung aber überwinden werden. Gerade in Baden-Württemberg wurde in den vergangenen Jahren zudem mehrfach gezeigt, dass auch die Reaktivierung historischer Brüche zur Beschaffung von hochwertigem Gesteinsmaterial für die Baudenkmalpflege und in der Folge auch für andere Bauprojekte möglich ist (Abb. 14).

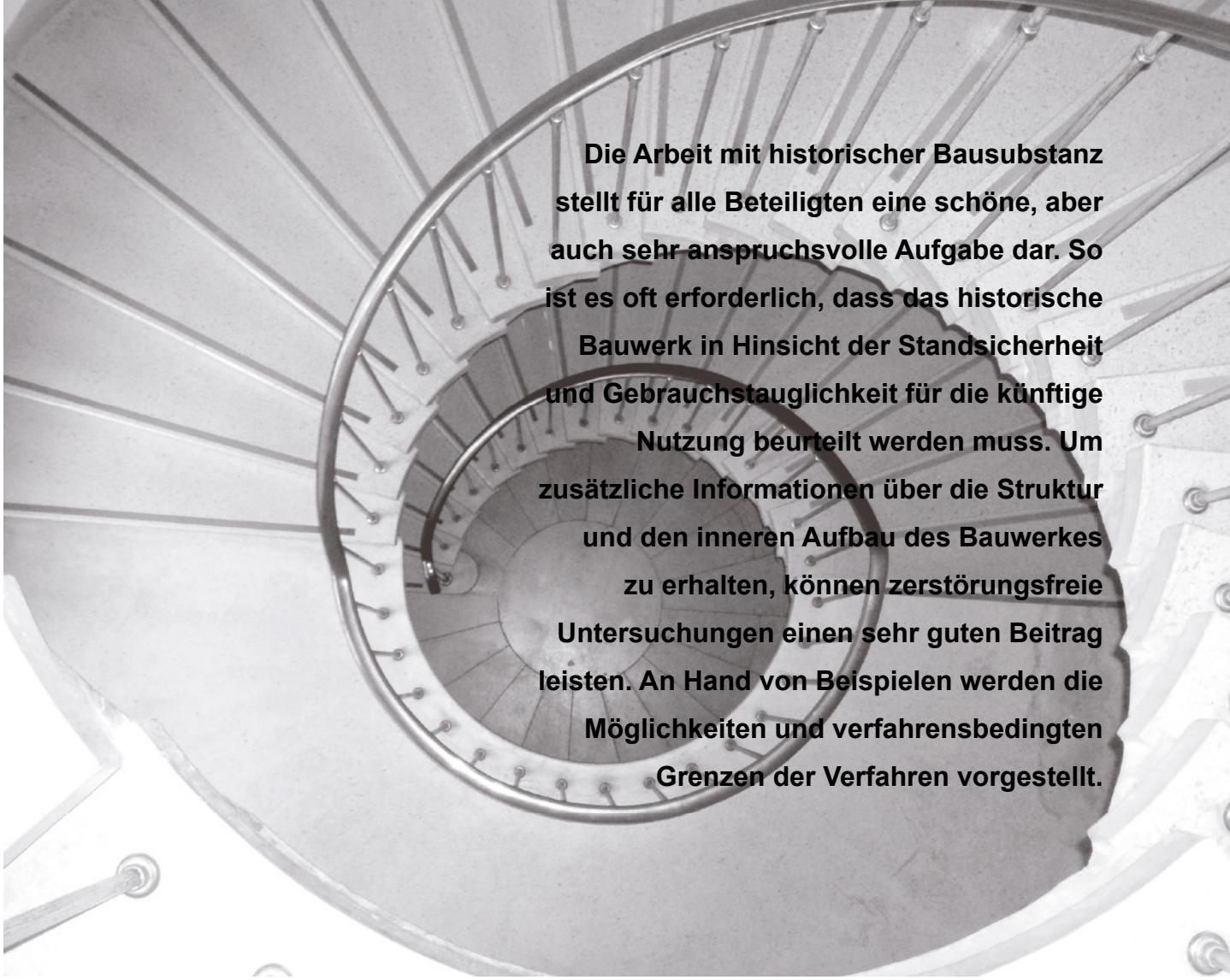
Literaturverzeichnis

- [Grimm 1990] Grimm, W.-D. (Hrsg.) (1990) mit Beiträgen von Ballerstädt, N.; Clemens, K.; Erfle, E.; Grimm, W.-D.; Lukas, R.; Niehaus, F.; Poschlod, K.; Schürmeister, R.; Schwarz, U.; Simper, M.; Weiss, G.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsheft Bayr. Landesamt Denkmalpflege, 50: 255 S., 70 Abb., 10 Tab., 232 Taf.; München (Bay. L.-Amt Denkmalpflege, Hrsg.).
- [Grimm 2013] Grimm, W.-D. (2013): Die Natursteinprovinzen Deutschlands als Identifikationsmerkmale der Kulturlandschaft. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (Hrsg.): Naturstein in der Kulturlandschaft. 40–59, 41 Abb.; Halle (Mitteldeutscher Verlag).
- [Hirschwald 1915] Hirschwald, J. (1915): Leitsätze für die praktische Beurteilung, zweckmäßige Auswahl und Bearbeitung natürlicher Bausteine. 36 S., 18 Abb.; Berlin (Borntraeger).
- [LGRB 2006] Landesamt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Hrsg.) (2006): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2006. LGRB-Informationen, 18: 202 S., 21 Abb., 15 Tab., 1 Kt.; Freiburg i. Br. [Bearbeiter: Werner, W.; Kimmig, B.; Liedtke, M.; Kesten, D.; Kleinschnitz, M.].
- [LGRB 2013] Landesamt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau (Hrsg.) (2013): Rohstoffbericht Baden-Württemberg 2012/2013. Bedarf, Gewinnung und Sicherung von mineralischen Rohstoffen Dritter Landesrohstoffbericht. LGRB-Informationen, 27: 204 S., 228 Abb., 7 Tab.; Freiburg

- i. Br. [Bearbeiter: Werner, W.; Kimmig, B.; Tschernay, P.; Wittenbrink, J.; Bock, H.; Kleinschnitz, M.].
- [Werner 2013a] Werner, W. (2013a): Zur Erschließung historisch genutzter Naturwerksteinlagerstätten für die Baudenkmalpflege – Beispiele aus Baden-Württemberg. In: BHU Bund Heimat und Umwelt in Deutschland (Hrsg.): Werksteinabbau und Kulturlandschaft. Chancen und Konflikte für das Natur- und Kulturerbe. Dokumentation der Tagung am 22. und 23. März 2012 in Maulbronn. 29–42, 15 Abb.; Bonn.
- [Werner 2013b] Werner, W. (2013b): Heimische Steinbrüche als Lieferanten von hochwertigem Naturwerkstein für die Baudenkmalpflege. In: Siegesmund, S.; Snethlage, R. (Hrsg.): Naturstein in der Kulturlandschaft. 60–69, 14 Abb., 1 Tab.; Halle (Mitteldeutscher Verlag).
- [Werner et al. 2013] Werner, W.; Wittenbrink, J.; Bock, H.; Kimmig, B. (2013), unter Mitarbeit von Grüner, F.; Stein, K. J.; Koch, R.; Hildebrandt, L.; Reiff, W.: Naturwerksteine aus Baden-Württemberg – Vorkommen, Beschaffenheit und Nutzung. 765 S., 1248 Abb., 45 Tab.; Freiburg i. Br. (L.-Amt. Geol., Rohst. Bergbau, Hrsg.). ISBN 978-3-00-041100-7.
- [Werner 2014] Werner, W. (2014): Natursteinaus tausch – Hinweise zu Auswahl und Beschaffung von Ersatzmaterial. In: Natursteinbauwerke. Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen (Patitz, G.; Grassegger G.; Wölbart, O., Hrsg.), Regierungspräsidium Stuttgart/Landesamt f. Denkmalpflege: Arbeitsheft 29: 193–200, 4 Abb., 3 Tab.; Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag).

Zerstörungsfreie Prüfung von Naturstein – Möglichkeiten und Grenzen

von Andreas Hasenstab



Die Arbeit mit historischer Bausubstanz stellt für alle Beteiligten eine schöne, aber auch sehr anspruchsvolle Aufgabe dar. So ist es oft erforderlich, dass das historische Bauwerk in Hinsicht der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die künftige Nutzung beurteilt werden muss. Um zusätzliche Informationen über die Struktur und den inneren Aufbau des Bauwerkes zu erhalten, können zerstörungsfreie Untersuchungen einen sehr guten Beitrag leisten. An Hand von Beispielen werden die Möglichkeiten und verfahrensbedingten Grenzen der Verfahren vorgestellt.

1 Einleitung

Die zerstörungsfreie Prüfung (zfP) erfreut sich in der Baudenkmalpflege teils einer großen Beliebtheit. So wird seit einigen Jahren die Bau-Endoskopie, Bohrkernentnahme, Bohrwiderstandsmessung und Rückprallmethode sowie Ultraschall in Transmission als zerstörungsarme bzw. zerstörungsfreie Prüfung angewendet. In den letzten Jahren wurden leistungsstarke Radarmessgeräte und Ultraschallgeräte vom Laborbetrieb in die Praxistauglichkeit überführt. Mit diesen Verfahren wurde und wird in der Baudenkmalpflege vieles untersucht und es war fast immer möglich, durch die Untersuchungen die Erkenntnis über das Bauwerk ohne Schäden desselben zu steigern und so gemeinsam mit dem Nutzer, Planer und Tragwerksplaner sowie dem Denkmalschutz eine Lösung zu erarbeiten.

Hierzu werden im Beitrag Untersuchungen an einer Natursteinbrücke, an Treppenhäusern, Säulen etc. mit Radar, Ultraschall und aktiver Thermografie vorgestellt.

Durch die technische Weiterentwicklung werden nun sogenannte Kompaktgeräte vermehrt auf dem Markt angeboten, wo die ursprüngliche, sehr komplexe, auf umfangreiche Erfahrung aufbauende Auswertung der gemessenen Signale „durch Knopfdruck“ vereinfacht wird. Diese Geräte stellen eine Bereicherung in ihrem, dafür entwickelten Anwendungsfeld dar. Das Adaptieren der sehr „hochgezüchteten“ und optimierten Messgeräte auf andere Fragestellungen stellt hingegen oft eine Schwierigkeit dar.

So kann es sein, dass ein sehr zuverlässig in seinem Aufgabenbereich funktionierendes Messgerät bei einer Anwendung in anderen Bereichen an physikalische Grenzen stößt und schlecht interpretierbare oder gar fehlerhafte Resultate liefert.

Die Ziele einer Anwendung der zerstörungsfreien Prüfverfahren sind:

- frühes Erkennen und Eingrenzung von Schäden,
- zerstörungsfreie Dokumentation und Integritätsprüfung des Bauteilzustandes,
- Kostenabschätzung bei Instandsetzung,
- Erhaltung von Bauteilen durch Schadensauschluss,
- Vermeidung unnötiger Instandsetzung sowie Kostendämpfung.

2 Überblick über die zerstörungsfreien Prüfverfahren

Zum besseren Verständnis der folgenden Praxisbeispiele werden die angewendeten Prüfverfahren kurz vorgestellt. Eine umfangreiche Erläuterung der zfP-Bau-Verfahren kann [1–3] entnommen werden.

2.1 Ultraschallechomethode

Das Ultraschallechoverfahren beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Werkstoffinhomogenitäten wie der Bauteilrückwand oder an anderen Grenzflächen. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand oder innere Schäden getroffen werden.

Aufgrund vieler Untersuchungen kann z. B. bei Holz und Beton sowie Naturstein davon ausgegangen werden, dass beim Vorliegen eines Rückwandechos die untersuchte Struktur frei von Innenfäule, ausgeprägtem Insektenbefall oder ausgeprägten Rissen bzw. Kiesnestern oder Ablösungen ist.

Wird dagegen bei einer Messung bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen kein Echosignal von der Bauteilrückseite empfangen, besteht ein Verdacht auf innere Schädigung. Details zur Ultraschallechomethode und den Grenzen des Verfahrens kann [1–3], an Holz [4] und an Beton [5] entnommen werden (Tab. 1).

Tab. 1 Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschallechoverfahrens

Anwendungsbereiche	Ziele
Bestimmung von Bauteilabmessungen	Gleichmäßige Dicke von nur einseitig zugänglichen Balken, Unterzügen, Fundamenten
	Lage von nicht sichtbaren Aussparungen, Nischen etc.
	Lage von Holzdübelverbindungen
Ortung von Schäden/stofflichen Inhomogenitäten	Hohlstellen
	Fäulnis
	Verdichtungsmängel (Kiesnester)
	Ablösungen, Risse parallel zur Oberfläche
	Äste
Ortung von Schichtwechseln, stofflichen Inhomogenitäten	Verbund von unterschiedlichen Schichten aufeinander

2.2 Bohrwiderstandsmethode

Das Bohrwiderstandsverfahren dient zur punktuellen Untersuchung von Holz. Anwendungsbereiche der Bohrwiderstandsmethode sind die Bestimmung von Bauteilabmessungen (gleichmäßige Dicke, Aussparungen, Zapfenverbindungen) sowie die Ortung von inneren Schäden (Hohlstellen, breite Risse parallel zur Oberfläche, Fäulnis, ausgeprägter Insektenbefall). Meist werden mit der punktweisen Bohrwiderstandsmessung Stellen überprüft, für die, z.B. nach der flächigen, zerstörungsfreien Ultraschallechomessung, ein Verdacht auf Schädigung besteht oder wenn eine Schädigung sicher ausgeschlossen werden soll. Bei Brücken- und Kirchenprüfungen erfolgt daher in der Praxis sehr häufig eine Kombination aus Ultraschall-echo- und Bohrwiderstandsmethode.

Die am Schneidkopf 3 mm breite Bohrnelde hinterlässt kaum wahrnehmbare Löcher. Da jedoch nur punktuelle Messungen durchgeführt werden, sind Aussagen nur für einen örtlich begrenzten Bereich möglich [4, 9].

2.3 Radar (Impulsradar, Georadar)

Das Radarverfahren ist ein elektromagnetisches Verfahren und vielfältig einsetzbar. Eine Optimierung ist auch durch eine Kombination von unterschiedlichen Radaranennen möglich. Die Anwendungsbereiche und die physikalischen Grenzen von Radar sind in [1] zusammengestellt (Tab. 2).

2.4 Aktive Thermografie

Bei Impuls-Thermografie (auch aktive Thermografie) wird das zu untersuchende Bauteil an der Oberfläche mit einer Wärmequelle (Infrarotstrahler, Heizlüfter) während einer bestimmten Zeitdauer erwärmt. Sowohl während der Erwärmung als auch während der anschließenden Abkühlung nach dem Entfernen der Wärmequelle wird die Oberflächentemperatur bildgebend mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet.

Aus dem zeitlichen Abkühlungsverhalten an der Oberfläche können oberflächennahe Strukturen ge-

ortet werden, wenn diese die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und/oder die Dichte in diesem Bereich beeinflussen.

Ob eine Fehlstelle geortet werden kann oder nicht, kann wie folgt grob abgeschätzt werden: Die Materialüberdeckung darf nicht größer sein als der Durchmesser der zu ortenden Fehlstelle. Mit der aktiven Thermografie sind z.B. die

- Ortung von Hohlstellen und Kiesnestern im Beton bis zu einer Tiefe von 10 cm,
- Ortung von Hohlstellen und Ablösungen (z.B. CFK-Laminate auf Beton),
- Lokalisierung von Fehlstellen und Ablösungen hinter Spaltklinker (z.B. in Tunnelwänden),
- Lokalisierung von Mauerwerk und Fugen hinter Putz sowie
- Ortung von Bereichen mit erhöhter Feuchtigkeit in oberflächennahen Schichten möglich.

3 Praktische Anwendungen der zerstörungsfreien Prüfung

Im folgenden Abschnitt werden mehrere Beispiele der praktischen Anwendung der zfP-Verfahren vorgestellt. Mittels der Beispiele soll die Vorgehensweise bei den Untersuchungen und der Nutzen für den Auftraggeber gezeigt werden.

3.1 Steinqualität bei Treppenhäusern in Bestandsbauten mit Ultraschallecho untersuchen

3.1.1 Aufgabenstellung

Ein Bestandsgebäude aus den 50er Jahren soll umgenutzt werden. Bei dem künftigen Nutzungskonzept stellte sich die Frage, in welchem Zustand sich zwei Treppenhäuser (Abb. 1) des Gebäudes befinden. Die Leitung der Untersuchungen und die Materialuntersuchungen in Form von Bohrkernanalysen erfolgte durch Herrn Dipl.-Ing. Stolarski TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH, Nürnberg. Diese punktuellen

Tab. 2 Anwendungsmöglichkeiten des Radarverfahrens

Anwendungsbereiche		Ziele
an historischen Bauwerken	aus Mauerwerk, Steinen	struktureller Aufbau (Schalen, Dicken), Einbauteile (Klammer, Dübel, Anker, Hölzer), Schadstellen (Risse, Ablösungen), Feuchte- und Salzverteilung, Sanierungskontrolle
	aus Holz	Einbauteile, Anker, Klammern
in Beton- und Stahlbetonbauten (Hochbauten, Brücken)		Bewehrung, Spannglieder, struktureller Aufbau
Verkehrswege, Erdbauwerke		struktureller Aufbau, gestörter Aufbau, Schadstellen, Schichtdicken
Archäologie/Baugrund		Bauwerksreste, Objektdetektion, verborgene bauliche Situationen, Hohlräume, Leitungen



Abb. 1 Zwei Treppenhäuser im Bestandsgebäude aus den 50er Jahren sollen vor Umnutzung untersucht werden.

Untersuchungen im Fußbereich der Treppen sollten durch flächige zerstörungsfreie Prüfungen an vielen Treppenstufen ergänzt werden.

3.1.2 Lösungsansatz

Um die Materialhomogenität der Treppensteinen bestimmen zu können, sollten Untersuchungen mittels Ultraschallecho durchgeführt werden. Transmissionsmessungen waren aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht möglich (Abb. 2).

Da der Aufbau der Treppen völlig unbekannt war und die Möglichkeit von inneren Metallankern bestand, wurden zusätzlich eine hochfrequente Radarantenne und ein Bewehrungsortungsgerät angewendet.

3.1.3 Messungen und Ergebnisse

Die Messungen mittels Ultraschallecho ergaben, dass die gemessenen Ultraschallgeschwindigkeiten sehr konstante Werte aufweisen, was auf eine homo-



Abb. 2 Verwendetes zerstörungsfreies Prüfverfahren Ultraschall-echo, Ankopplung ohne Koppelmittel

gene Qualität der Treppen hindeutet. In Abbildung 3 sind exemplarische Ergebnisse von Ultraschallmessungen an einer der beiden Treppen dargestellt.

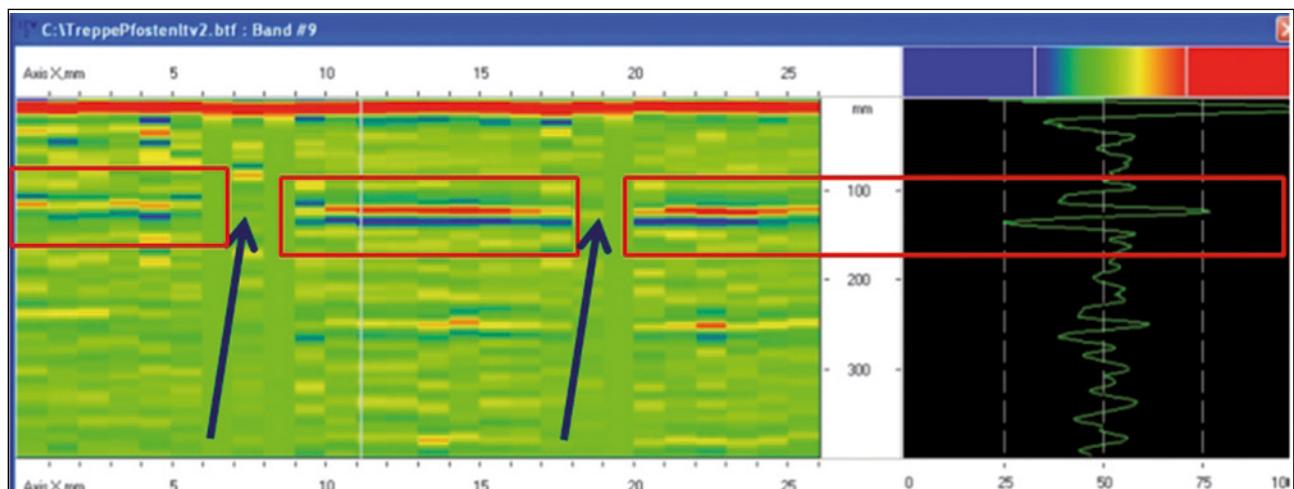


Abb. 3 Ergebnis der Ultraschallechomessungen am obersten Podest der Natursteintreppe, deutliche Echos (Kasten) zeigen, dass Risse und innere Inhomogenitäten ausgeschlossen werden können; Pfeil markiert Bereich ohne Echo, was einem Riss zugeordnet werden kann.

Wie in Abbildung 3 zu sehen, ergab die Ultraschallechomessung deutliche Echos (Kasten) an der Bauteilrückseite, was bedeutet, dass innere Risse und Ablösungen etc. im untersuchten Bereich im gesamten durchschallten Querschnitt ausgeschlossen werden können. Weiter fällt bei der Betrachtung von Abbildung 3 auf, dass in zwei Bereichen kein Echo von der Bauteilrückwand empfangen wurde (Pfeile). Diesen auffälligen Bereichen konnten bei einer sehr genauen visuellen Überprüfung des Messbereiches zwei Rissen zugeordnet werden.

Die Untersuchungen mit den elektromagnetischen Messverfahren ergab, dass sich die beiden Treppenhäuser sehr stark im inneren Aufbau unterschieden. So wurden bei einem der Treppenhäuser viele metallische Reflektoren detektiert (Abb. 4), welche als Bewehrung gedeutet wurden. Bei der zweiten Treppe wurden keine metallischen Reflektoren detektiert.

3.1.4 Nutzen für den Bauwerkseigner

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Qualität der Treppenstufen sehr homogen war. Diese Aussage konnte durch die Untersuchung einer sehr großen Anzahl von Treppenstufen gestützt werden. Mittels Bohrkernentnahme konnten die indirekten zerstörungsfreien Prüfergebnisse realen Festigkeiten zugeordnet werden. Weiter ergaben die Untersuchungen, dass es sich um zwei völlig unterschiedliche Treppen handelt. So besteht eine Treppe aus Natursteinen, eine Treppe aus Kunststein.

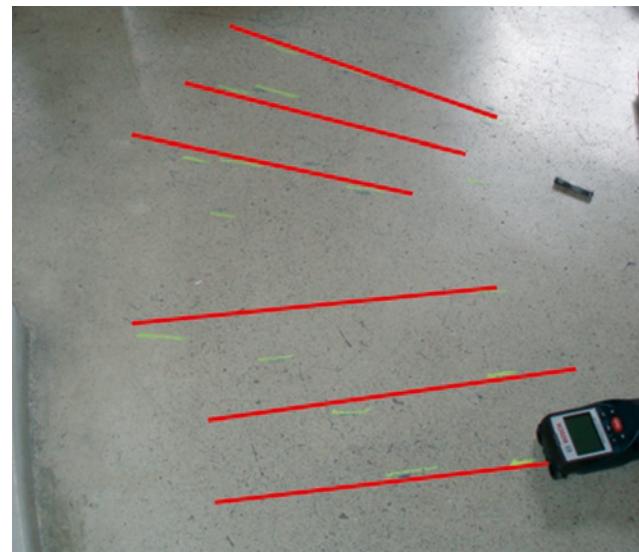


Abb. 4 Lage der metallischen Reflektoren (als Linie verdeutlicht) in einer der beiden Treppen, gemessen mit hochfrequenter Radarantenne

3.2 Ultraschallmessungen in Transmission an Natursteinsäule

Ultraschall in Transmission stellt bei einer genauen Auswertung eine sehr anspruchsvolle Aufgabenstellung dar. Nur wenn genaue Kenntnisse über den Stein und die Schädigungsprozesse vorliegen, ist eine exakte Auswertung möglich. Da diese Regeln oft nicht eingehalten werden, kursieren viele wahre Geschichten, wo sich mittels Ultraschalluntersuchungen in Transmission keine deutbaren Ergebnisse bei der Untersuchung von Natursteinen ergaben. Als

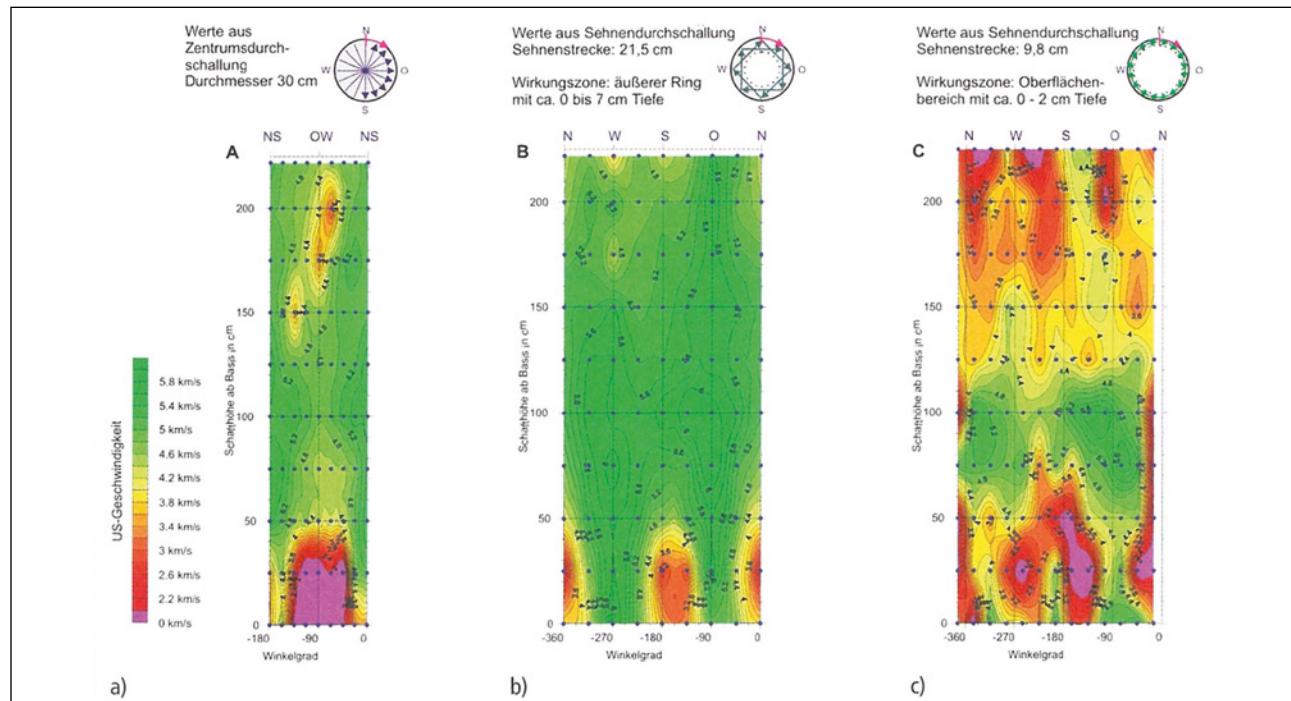


Abb. 5 Ergebnisse von Ultraschalluntersuchungen an einer Kalksteinsäule, dunkelgrüne Bereiche stellen homogene Bereiche dar, rosa bis rote Bereiche deuten auf Gefügestörungen wie Risse, Ablösungen etc. hin [6, 7]

Positivbeispiel werden folgend die Messungen von Dr.-Ing G. Patitz, IGP Ingenieurbüro, Karlsruhe, an einer Kalksteinsäule dargestellt [6, 7].

Bei den Messungen an der Kalksteinsäule wurden die Schallgeschwindigkeiten der Ultraschallimpulse bestimmt. Mittels Auswertung der Schallgeschwindigkeiten war es möglich, Ablösungen und Gefügestörungen zu detektieren, da diese zu Streuung der akustischen Wellen und verlängerten Schalllaufzeiten oder gar zur Totalreflexion der Wellen führen.

So kann bei den in Abbildung 5 dargestellten Messergebnissen eindeutig zwischen homogenem Gefüge (Abb. 5, dunkelgrün markiert) und starken Gefügestörungen, Risse oder Ablösungen (Abb. 5, rote und violette Bereiche) unterschieden werden. Die in Abbildung 5 angegebenen gelb- und orangefarbigen Zonen geben Hinweis auf Festigkeitsminderung bzw. Störungen im Gefüge.

Die vorgestellten Messungen zeigen, dass es möglich ist, die innere Struktur der untersuchten Säule in unterschiedliche Zonen einzuteilen, was für die weitere Planung von großer Bedeutung war.

3.3 Untersuchung in einer gotischen Kirche in Bayreuth mit Impact-Echo, Ultraschallecho und Bohrkernentnahme

3.3.1 Aufgabenstellung

An einer gotischen Kirche in Bayreuth wurden bei Untersuchungen der Gewölberippen Risse an Sandsteinrhomben festgestellt. Um eine kraftschlüssige Verbindung herzustellen zu können, wurden diese Risse verpresst. Der Erfolg dieser Rissverpressungen war unbekannt und sollte untersucht werden. Weiter sollte die Schädigung auf der Oberkante der Steine, welche durch ein vergangenes Brandereignis verursacht wurde, untersucht werden (Abb. 6).

3.3.2 Lösungsansatz

Um die Rissverpressung zu überprüfen und die Gewölbesteine zu untersuchen wurde angedacht, die akustischen Verfahren Ultraschallecho und Impact-Echo anzuwenden.

3.3.3 Messung mit Ergebnissen

Die Auswertung der Messungen ergab, dass in den Steinen mittels Echomessungen Risse erkannt werden können. Weiter konnten an Bauteilen mit breiten Abmessungen und parallelen Oberflächen die Verklebung durch die Rissinjektion gezeigt werden.

Weiter ergab die Auswertung, dass eine schräge Schalleinleitung in Echomethode bei geometrisch

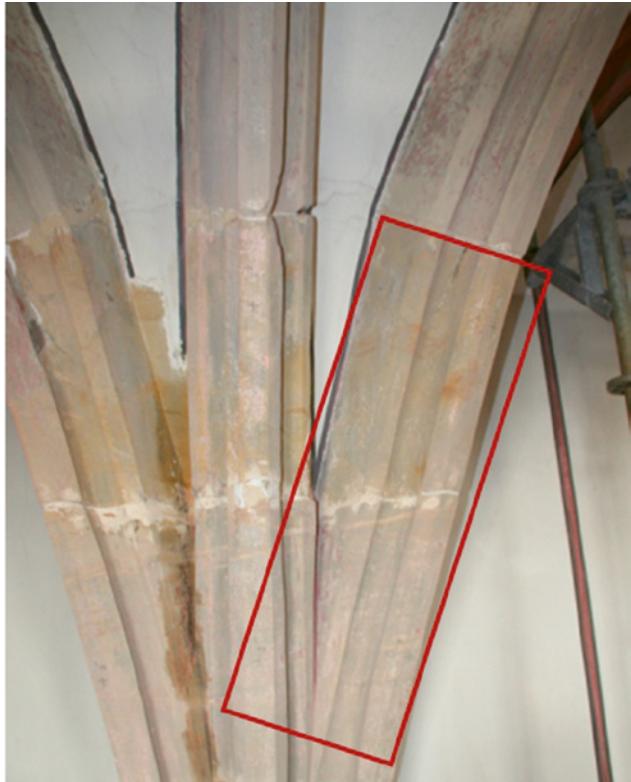


Abb. 6 Lage der Impact-Echo- und Ultraschallechomessungen

schwierigen Strukturen wie den Sandsteinrhomben zu keinen brauchbaren Ergebnissen führt.

Zudem stellte sich eine Untersuchung der Brandschäden mittels akustischen Verfahren als unmöglich heraus, da verfahrensbedingt eine langsam beginnenden Materialveränderung keine deutliche Reflexionsebene darstellt und so keine Signale reflektiert werden können.

Demzufolge wurde die Abbrandtiefe des Sandsteines mit kleinen Bohrkernen ($D = 30\text{ mm}$) bestimmt.

3.3.4 Nutzen für den Bauwerkseigner

Mit den Messungen konnten die Qualität der Rissverpressungen überprüft werden. Weiter war es möglich in vielen Bereichen eine Aussage über die Struktur des Sandsteines zu bekommen und der Anzahl der erforderlichen Bohrkerne auf ein Minimum zu reduzieren.

3.4 Historische Brücke aus Natursteinen mit Radar und Ultraschallecho untersuchen

3.4.1 Aufgabenstellung

Eine an einer Nebenstraße gelegene Bogenbrücke aus Naturstein sollte im Zuge der Sanierung einer überregionalen Straße als Ausweichroute für den LKW-Verkehr dienen. Um die zulässigen Belastungen



Abb. 7 Ansicht des Bogens und der Auflagerwand mit unbekanntem Aufbau der Böschung und unbekannter Wandstärke; Pfeil gibt Lage der später dargestellten Radarmessspur an.

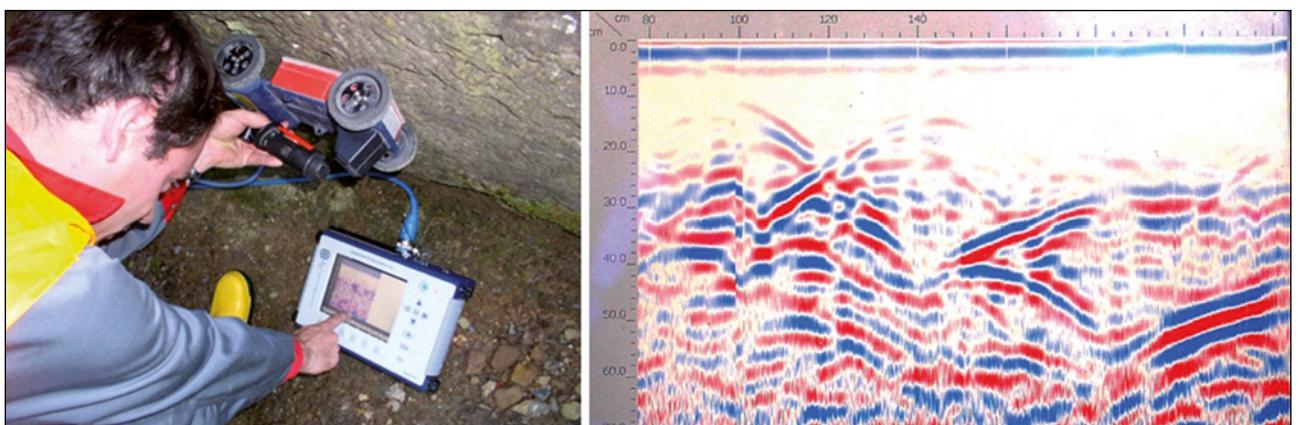


Abb. 8 Radarmessung; links: (Mittenfrequenz 1,6 GHz, GSSI); rechts: unterschiedliche Steindicken und feuchte Struktur hinter der Wand

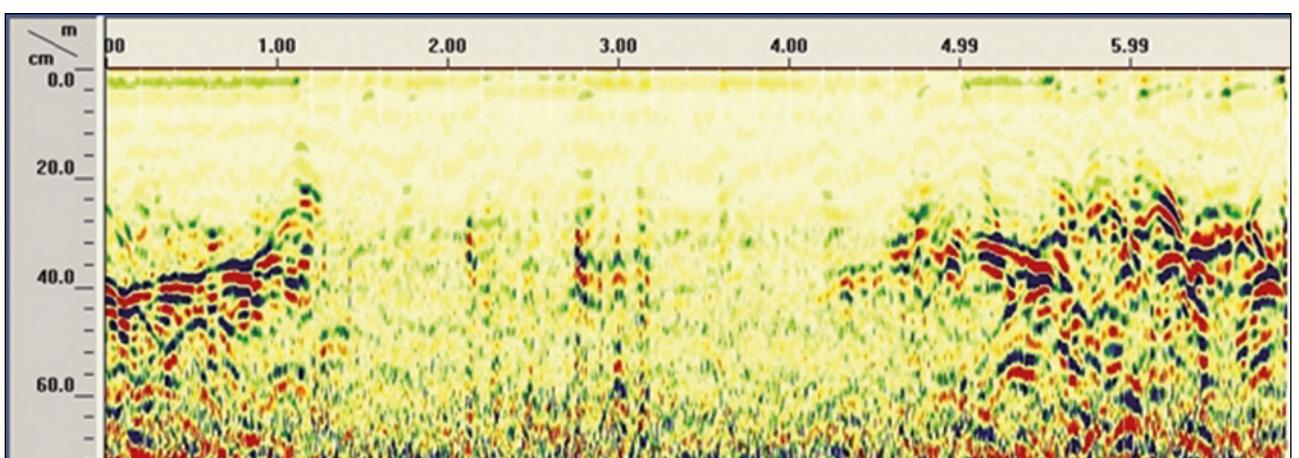


Abb. 9 Aufbau der Straße, deutliche Reflexionsebene der unteren ehemaligen Fahrbahn zu erkennen; Bereich ohne Reflexionsebene bedeutet, dass hier der Untergrund ausgetauscht wurde.

zu definieren, musste eine Statik für die Brücke angefertigt werden. Die Angaben für die Berechnungen wurden mit einer visuellen Untersuchung beschafft, aber z. B. die Abmessungen der Steine und Hinterfüllung der Brücke blieben unklar (Abb. 7).

3.4.2 Lösungsansatz

Mittels zerstörungsfreien Prüfungen sollten möglichst viele Daten über das Bauwerk beschafft werden. Als Verfahren wurden das Radarverfahren für den Straßenaufbau und die Flügelwände ausgewählt. Mittels Ultraschallecho sollten die Einbindetiefen und die Homogenität der Steine untersucht werden.

3.4.3 Messung mit Ergebnissen

Mit Ultraschallecho wurde an Steinen mit bekannten Abmessungen die Schallgeschwindigkeit bestimmt (Kalibrierung). So war es möglich, die Steinabmessungen nicht nur an den äußerlich sichtbaren Steinen, sondern auch der eingebauten Steinen zu bestimmen, was für einen statischen Nachweis wichtig war.

Mit einer hochfrequenten Radarantenne (1,6 GHz) wurde der Aufbau und der Grad der Hinterfüllung der Stützwände untersucht und anstehendes Wasser lokalisiert und markiert. Weiter wurde von der Straße aus mit einer niederfrequenten Radarantenne (400 MHz) der Aufbau des Untergrundes untersucht. Dabei ergaben die Messungen, dass der Bogen im Inneren einen asymmetrischen Aufbau hat und unterschiedlich hinterfüllt ist (Abb. 9).

3.4.4 Nutzen für den Bauwerkseigner

Mit den Ergebnissen der Messungen war es möglich, eine auf die Brücke angepasste neue Statik zu erstellen. Durch die umfangreichen Ergebnisse war es zudem nicht erforderlich, wie sonst üblich, erhebliche Sicherheiten einzuplanen, was bedeuten kann, dass der Brücke nur sehr geringe Belastungen zugewiesen werden können.

Wenn der Brücke bei der Nachrechnung nur geringe Belastungen zugewiesen werden können,

kann es zu einer Herabstufung der Brücke kommen, was die Konsequenz haben könnte, dass die Brücke den Anforderungen nicht mehr entspricht und rückgebaut werden muss.

3.5 Ortung einer verborgenen Türöffnung in der Wartburg mittels aktiver Thermografie

Im Palais der Wartburg, dem ältesten Wohngebäude dieser Art in Deutschland (zwischen 1157 und 1170 errichtet) (Abb. 10, links) war in der Vergangenheit in der Nordwand zum Treppenhaus eine Türöffnung vorhanden. Diese Türöffnung wurde später geschlossen und verputzt und es befinden sich nun auf der Innenseite (Raumseite) dieser Wand Ornamente und Wandmalereien. Die Außenseite der beschriebenen Wand wurde in ein 1950 neu errichtetes Treppenhaus integriert und ist weiß verputzt. (Dieses Beispiel wurde mit freundlicher Genehmigung von Frau Dr. Maierhofer (BAM, Berlin) aufgenommen) [8].

3.5.1 Aufgabenstellung

Die Position der ehemaligen Tür zwischen Treppenhaus und Raum bestimmen.

3.5.2 Lösungsansatz

Mit aktiver Thermografie soll die innere Struktur der Nordwand untersucht werden.

3.5.3 Messung mit Ergebnissen

Nach einer Erwärmung der Oberfläche mittels Heizlüfter wurde das Abkühlungsverhalten mit einer sehr hoch auflösenden IR-Kamera erfasst. Die anschließende Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) im Frequenzbereich.

Abbildung 10, Mitte, zeigt ein ausgewähltes Phasenbild, wo sich die Struktur des großformatigen Mauerwerks innerhalb der ehemaligen Türöffnung sowie der obere Türbogen deutlich abbilden. Das vergleichsweise mit der Variocam IR-Kamera aufgenommene Thermogramm zeigt die Mauerwerksstruktur und den zugesetzten Bogen ebenfalls (Abb. 10, rechts). Die

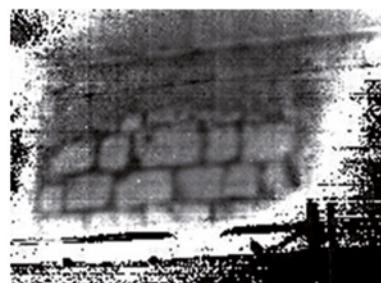


Abb. 10 Links: Wartburg in Eisenach, Palas im Hintergrund. Mitte: Phasenbild eines Wandausschnitts des Landgrafenzimmers nach 5 min Erwärmung mit einem Heizlüfter. Rechts: Thermogramm der Variocam IR-Kamera ohne zusätzliche Erwärmung

detektierte Öffnung, die ca. 150 cm breit ist, konnte aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen genau eingemessen werden.

3.5.4 Nutzen für den Auftraggeber

Mit den aktiven Thermografie-Messungen war es möglich, zerstörungsfrei genau die Lage der ehemaligen Wandöffnung zu bestimmen, was für die historische Bauwerksdokumentation von großem Interesse war. Zudem konnten Putzablösungen ausgeschlossen werden.

3.6 Kritische Diskussion der Anwendung von Kompaktgeräten an Natursteinbauwerken

Die eindrucksvollen Ergebnisse der Untersuchungen mit Kompaktgeräten an Beton mit Bewehrungsstahl lassen Begehrlichkeiten nach ebenso deutlichen Ergebnissen in der Bau-Denkmalpflege und hier auch an Naturstein entstehen. Aufgrund vieler physikalischer Randbedingungen können diese optisch schönen Ergebnisse mit dem identischen Gerät und auch einem für Betonuntersuchung ausgebildeten Personal nicht erreicht werden:

Fallbeispiel: erfolglose Ankersuche an Sandsteinbrücke
Aufgrund der „automatischen Auswertung“ der Kompaktgeräte war es nicht möglich, die unterschiedlichen Bauteilfeuchten der Brücke zu berücksichtigen, welche am Bauwerk vorkamen. Dies führte zu erheblichen Fehlern der errechneten Tiefenachse bei den Radargrammen. So kann es sein, dass einem Anker bei einer höheren Bauteilfeuchte eine größere Tiefe zugeordnet wird.

Bei einer hohen Messfrequenz kann die hohe Materialfeuchte eine sehr starke Signaldämpfung verursachen, was wiederum eine Untersuchung tieferer Bereiche (10–20 cm) gänzlich unmöglich macht.

Das Resümee, dass Radarmessungen keinen Erfolg an dem Bauwerk gebracht haben, ist zwar im eingegrenzten Fall korrekt, trifft aber nur für das verwendete Kompaktgerät zu. Messungen mit einer niedrigeren Messfrequenz und damit geringerer Signaldämpfung in Kombination mit einer umfangreichen Auswertung waren z.B. an der vorgestellten Natursteinbrücke erfolgreich.

Fallbeispiel: automatische Auswertung verwechselt breite Hohlräume mit Bewehrung

Im vorliegenden Beitrag wurde vorgestellt, dass es mit Radar möglich ist, die Rückseite von Natursteinen und Hohlräume zu detektieren. Aufgrund der automatisierten Signalauswertung bei den genannten Kompaktgeräten wurden oberflächennahe Hohlräume mit

einer Breite von über 20 cm als dünne Reflektoren am Bildschirm dargestellt und diese Hohlräume fälschlicherweise an sehr vielen Stellen angebohrt (800 x). Eine umfangreiche Auswertung der Rohdaten des Kompaktgerätes hätten diese sehr kostspielige Fehldiagnose ziemlich sicher verhindert, da hier eindeutig zwischen schmalem Reflektor und Hohlraum unterschieden werden kann. Mit einer herkömmlichen Radarantenne wäre diese Fehlinterpretation nahezu unmöglich gewesen.

Fallbeispiel: Radabstand der Antenne verhindert Untersuchung von Säulen

Die Verwendung von mehreren Radarantennen in einer Gerätekapsel ermöglicht ein schnelles flächiges Messen von Betonplatten etc. – an Säulen und besonders an runden Stützen ist die Anwendung dieser großflächigen Messgeräte oft nicht sinnvoll da der Radabstand ca. 35 cm beträgt. Mit herkömmlichen Radargeräten mit getrenntem Messrechner ist es möglich, Säulen zu untersuchen.

Mit dieser Aufzählung sollen keine sehr gut optimierten Messgeräte herabgewürdigt werden, es soll nur ausdrücklich vor der Adaption auf Fragestellungen, wofür das Gerät – auch laut Hersteller – nicht gedacht war, gewarnt werden. In solchen komplexen Fällen ist eine komplexe Untersuchung in Kombination mit einer, auf Erfahrung aufbauenden Auswertung, notwendig.

4 Zusammenfassung

Es wurden an Hand von mehreren Beispielen die sehr vielfältigen Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Messmethoden an Naturstein vorgestellt. Folgend eine grobe Zusammenstellung nach Verfahren gegliedert:

Mit **Ultraschallecho** und auch **Impact-Echo** können die Materialstruktur, Bauteilabmessungen etc. sehr gut untersucht werden, wenn eine eindeutige Rückwandreflexion möglich ist.

Wenn es zu einer schleichenen Materialveränderung kommt – wie z.B. bei einer beginnenden, sich immer stärker ausprägenden Strukturauflösung – dann ist keine Rückwandreflexion möglich und somit auch kein Echo. Dies bedeutet, wenn an keiner Stelle ein Echo empfangen werden kann, kann schlecht zwischen einer geschädigten und einer ungeschädigten Struktur unterschieden werden.

Eine weitere wichtige Untersuchungsgrenze ist die Form des zu untersuchenden Bauteils bei Echomessungen. So kann es bei einigen Gewölbebögen

schwierig sein, ein eindeutiges Echo aufgrund der Form zu erlangen, und eine Untersuchung mittels akustischen Wellen ist dann nicht zielführend.

Für die Untersuchung von Mauerwerk ist wichtig: Viele Mörtel sind nicht für den Schallübertrag geeignet und so kommt es an der geringsten Fuge etc. zur Totalreflexion der akustischen Welle – was ein Untersuchen der hinteren Ebene der Steine mit akustischen Verfahren unmöglich macht. Die Einbindetiefe des Steins hingegen kann so sehr genau bestimmt werden.

Radar eignet sich für viele Untersuchungen. So können Hohlräume, Metallteile, Inhomogenitäten der Struktur etc. sehr gut untersucht werden. Zudem können die Mauerwerkssteine im Gegensatz zu akustischen Verfahren mit Radar hinter der ersten Ebene auch analysiert werden.

Sehr wichtig ist, dass eine inhomogene Durchfeuchtung etc. bei der Auswertung unbedingt berücksichtigt werden muss. Ebenso nimmt die Signaldämpfung bei einer Zunahme der Materialfeuchte bzw. der Versalzungsgrad stark zu, was die Tiefenreichweite der Untersuchungen einschränkt.

Bei Radar ist auch eine Schichtgrenze etc. als Reflexionsebene erforderlich.

Trotz sehr guter Ergebnisse bei eigenen Messungen an der Nürnberger Stadtmauer an den vorderen Mauerwerksschalen war es nicht möglich, aus der Tiefe der Burgmauer Signale von einer Reflexionsebene zu empfangen. Die durchgeführten Bohrkernentnahmen ergaben, dass es in der Tiefe der Wand zu einem Übergang von feuchtem zerbröselten Sandstein der Sandsteinmauer und feuchten zerbröselten Sandsteinfelsen kam, was verfahrensbedingt mit Radar nicht darstellbar ist.

Mit der **aktiven Thermografie** können breite Mauerwerksfugen oder Hohlräume hinter dem Putz untersucht werden. Entscheidend für die Genauigkeit der Aussagen ist hier das thermisch unterschiedliche Verhalten der untersuchten Materialien und die Auflösung der Thermografiekamera.

Literatur

- [1] Hasenstab, A.; Jost, G.; Taffe, A.; Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – angewandte Forschung und Praxis. Tagungsband der DGzfP-Jahrestagung 2008, St. Gallen, 28.–30.04.2008.

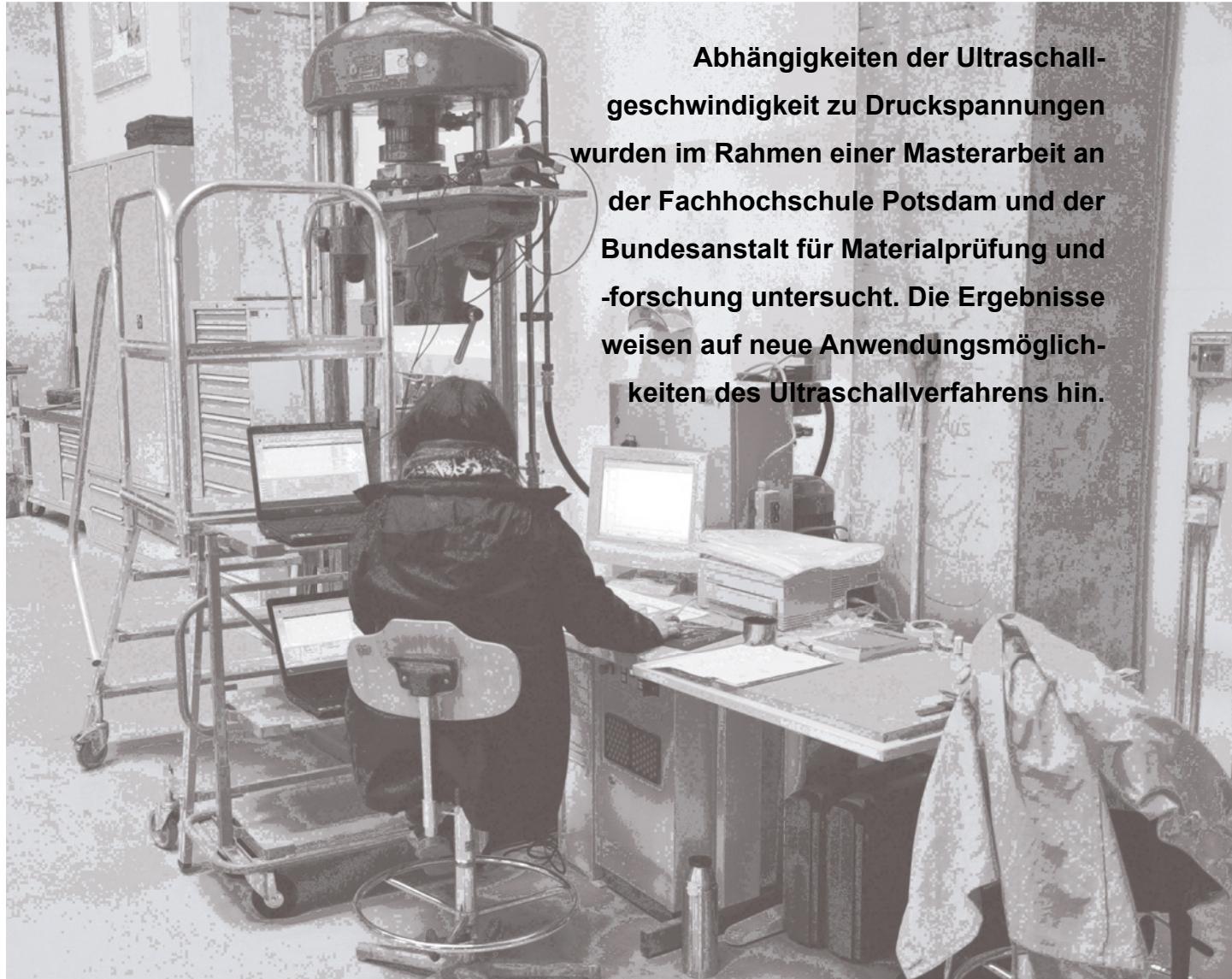
- [2] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompendium. http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/welcome.html (2004).
- [3] Walter, A.; Hasenstab, A.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau. In: Fouad N. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Ernst und Sohn (2012).
- [4] Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI, Prof. Dr. Hillemeier (TU Berlin), Prof. Scheer (TU Berlin), Dr. Krause (BAM).
- [5] Hasenstab A.; Walther A.; Hillemeier B.; Homburg S.: Integritätsprüfung statisch relevanter Bereiche von Spannbetonbrücken mit dem Ultraschallecho, Radar und Remanenzmagnetismus Verfahren. Tagungsband der DGzfP Fachtagung Bauwerksdiagnose, 17.–19.02.2012, Graz.
- [6] Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012, Gebäudediagnostik. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Kapitel A bis C, S. 1–442.
- [7] Patitz, G. (Hrsg.): MONUDOCthema01 – Mauerwerksdiagnostik in der Denkmalpflege. Fraunhofer IRB Verlag, 2004.
- [8] Maierhofer C.; Arndt, R.; Röllig, M.; Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Ortung von Ablösungen und Fehlstellen in Beton und Mauerwerk. In: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose Berlin 23.–24.02.2006.
- [9] Hasenstab, A.; Steinberr H.: Zuverlässige Bestandsanalyse von Holzbalkendecken, Dachstühlen und Fachwerken mit zerstörungsfreien Prüfverfahren und Nutzen für die Statik. In: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose Berlin 23.–24.02. 2014.

Abbildungen

- Abb. 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9: Verfasser
 Abb. 5: Dr.-Ing. G. Patitz, IGP Ingenieurbüro, Karlsruhe
 Abb. 10: Dr. Maierhofer; BAM, Berlin

Tragvermögen von Sandstein – Messung mittels Ultraschalltransmission?

von Sarah Hutt, Gerhard Eisele und Martin Krause



1 Einleitung

Seit ca. 90 Jahren wird die Anwendung von Ultraschallwellen zur Materialprüfung erforscht. Mittlerweile standardisierte Verfahren sind die Lokalisierung von Imperfektionen an metallischen Bauteilen, die Kontrolle der Gefügeveränderung von Frost- oder Salz geschädigtem Beton oder auch die Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls poröser Materialien. Darüber hinaus ist es möglich, die Dicke von Betonbauteilen beispielsweise an Tunnelinnenschalen zu bestimmen oder tiefliegende Spannbewehrung zu orten.

Beim Bauen im Bestand und der Bauwerkserhaltung werden zur Bestimmung des Tragvermögens von historischen, oft unter Denkmalschutz stehenden Bauwerken aus Naturstein Materialkennwerte benötigt. In jüngerer Zeit wurde vermehrt versucht, aus der Ultraschallgeschwindigkeit Rückschlüsse auf das Tragvermögen zu ziehen und dem Tragwerksplaner notwendige Bemessungsgrundlagen zu übermitteln. Der Vorteil des Verfahrens ist vor allem die zerstörungsfreie Anwendung. Die üblichen Prüfverfahren mittels Probennahme am Objekt und Bestimmung der Kennwerte im Labor bedeuten bei Denkmälern einen massiven Eingriff und sollten bekanntermaßen vermieden werden.

Im Bereich der Denkmalpflege werden Ultraschallverfahren bereits seit den 1980er Jahren genutzt [1], vor allem, um den Zustand des Gefüges von Natursteinen zu bewerten und die Qualität von Restaurierungsmaßnahmen zu kontrollieren. Welche Zusammenhänge zwischen tragvermögensrelevanten Kennwerten und der Ultraschallgeschwindigkeiten an Natursteinen bestehen, scheint sich die Forschung jedoch uneins zu sein. Im Rahmen einer Masterarbeit an der Fachhochschule Potsdam und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung wurde dieser Frage nachgegangen.

2 Bewertung von Tragvermögen

Historische Tragwerke sind statisch zu beurteilen, wenn durch eine Umnutzung die Lasten erhöht werden, durch bauliche Maßnahmen das Tragwerk verändert wird oder eine Schädigung des Tragwerks eine Verringerung der Standsicherheit vermuten lassen.

Die Standsicherheit ist gemäß neuem Sicherheitskonzept DIN EN 1990:2010-12 nachzuweisen:

$$F_d \leq R_d$$

F_d Bemessungswert einer Beanspruchung aus den charakteristischen Werten der Einwirkungen und einem Teilsicherheitsbeiwert

R_d Bemessungswert des Tragwiderstands

Der Tragwiderstand R_d ist eine Funktion der Bauteilgeometrie a_d und der Baustoffeigenschaften X_d . Beim charakteristischen Wert der Baustoffeigenschaften handelt sich oft um die Druck- oder Zugfestigkeit. Bei historischen und auch bei gealterten Baustoffen liegen jedoch meist keine Kennwerte vor und sind daher über statistisch verteilte Probennahmen zu ermitteln. An historisch bedeuteten Bauten, insbesondere an denkmalgeschützten Objekten, ist eine Entnahme originaler Bausubstanz, wenn überhaupt, nur sehr eingeschränkt möglich. Eine Bestimmung der mechanischen Eigenschaften mittels zerstörungsfreier Prüfung ist daher wünschenswert.

3 Das Ultraschallverfahren

Im Bauwesen werden Ultraschallverfahren im Frequenzbereich von 20 bis 200 kHz angewendet. Ultraschall ist eine mechanische Welle, die sich nur im Medium ausbreitet. Die Grundlage jeder Welle ist die Schwingung eines Einzelteilchens. Tritt dieses mit anderen Teilchen in elastische Wechselwirkung, breitet sich die Schwingung des Einzelteilchens als elastische Wellen (Longitudinal- und Transversalwelle) aus. Die Schallgeschwindigkeit c ergibt sich aus dem Produkt von Wellenlänge λ und Frequenz f .

$$c = \lambda \cdot f$$

c Wellengeschwindigkeit in m/s

λ Wellenlänge in m

f Frequenz in Hz

Die Wellenlänge ist bei der messtechnischen Umsetzung im Besonderen zu berücksichtigen. Je niedriger sie ist, desto höher ist die Auflösung. Und je größer die Wellenlänge ist, desto tiefer dringt der Impuls in das Objekt ein, die Auflösung wird dann jedoch geringer. In der Regel sollte die Wellenlänge kleiner als die Hälfte der Querabmessung des zu durchschallenden Objekts sein. Andernfalls werden Dehnwellen erzeugt, die mit veränderten physikalischen Parametern beschrieben werden und eine andere Ausbreitungsgeschwindigkeit ergeben als die Longitudinalwelle. Die Wellenlänge wird über die Prüffrequenz bei grober Kenntnis der Schallgeschwindigkeit eingestellt [1].

Der Schalldruck eines sich ausbreitenden Impulses wird innerhalb eines Mediums, bedingt durch Absorption, sphärische Divergenz und Reflexion, geschwächt. Beim Übergang in ein zweites Medium treten darüber hinaus Reflexion, Streuung und Beugung auf. All diese physikalischen Effekte wirken sich in der Amplitude des ankommenen Signals aus.



Abb. 1 Verwendetes Probenmaterial aus Cottaer Sandstein mit charakteristischen Kohle- und Tonflasern

Bei der angewandten Ultraschalltransmissionsmessung wird im Besonderen der Einfluss des Fermatschen Prinzips genutzt. An Hohlräumen, Gefügestörungen oder Rissen wird der Schall umgeleitet und die reale Messstrecke wird von der geometrisch gemessenen kürzesten Distanz abweichen. Die ermittelte Ultraschallgeschwindigkeit wird geringer sein. Dieser Wert ist jedoch nur als fiktive Größe zu betrachten, denn die Ultraschallgeschwindigkeit ist eine Materialkonstante. In Wirklichkeit wird sich die Messstrecke verlängern [2].

Bei der Ultraschalltransmissionsmessung wird in der Regel die Laufzeit des ersten ankommenden Longitudinalwellen-Impulses ausgewertet. Hierzu wird der erste signifikante Flankenanstieg des Signals bestimmt. Die Longitudinalwellengeschwindigkeit ist physikalisch von der Rohdichte, dem dynamischen E-Modul und der dynamischen Querdehnzahl abhängig. Zwischen Druckfestigkeit und Ultraschallgeschwindigkeit besteht demnach kein direkter Zusammenhang.

4 Untersuchung

4.1 Untersuchungsziele

Im Rahmen der Masterarbeit wurden mehrere Fragestellungen bearbeitet. Zunächst wurde die Messunsicherheit des angewendeten Verfahrens bestimmt. Es galt darüber hinaus, die Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Gesteinsschichtung und in Abhängigkeit von Gefügeschädigungen zu ermitteln. In einem weiteren Schritt wurde durch empirische Messungen versucht, Korrelationen von Druckfestigkeit und Ultraschallgeschwindigkeiten zu erreichen. Ferner sollte die Ultraschallgeschwindigkeit eines unter wechselnder Druckspannung stehenden Bauteils festgestellt werden, und wie sich Be- und Entlastungen sowie Wiederbelastungen auf die Ultraschallgeschwindigkeiten auswirken.



Abb. 2 Verwendete Prüfkörper aus Cottaer Sandstein

4.2 Versuchsdurchführung

4.2.1 Probenmaterial Cottaer Sandstein

Als Probenmaterial wurde ein Steinblock aus Cottaer Sandstein zur Verfügung gestellt.

Das verwendete Probengestein ist durch Diagenese vor ca. 90 Millionen Jahren entstanden. Man ordnet den Cottaer Sandstein zur Gruppe der klastischen Sedimente und dem Zeitalter des Unterturons der Oberkreide zu. Er wird als braun-gelblich bis graulich-weiß beschrieben, mit einer feinen Körnigkeit. Auffällig sind kurze, wellenartig geschwungene, braune Bänder. Hierbei handelt es sich um charakteristische Ton- und Kohleflasern, die seine Schichtung bestimmen (Abb. 1). Die Bindung ist vorwiegend silikatisch, die Rohdichte liegt bei ca. $2,0 \text{ g/cm}^3$ und die Gesamtporosität wurde mit 20 bis 23 Vol.-% bestimmt. Das im Rahmen der Masterarbeit verwendete Gestein zeigt eine gemittelte Druckfestigkeit von 39 N/mm^2 . [3]

Aus dem Probenmaterial wurden 50 Probekörperwürfel mit einer Kantenlänge von 140 mm zugerichtet (Abb. 2). Um den Einfluss durch Feuchte auf die Messungen auszuschließen, lagerten alle Probekörper zur Massenkonstanz (0,1% innerhalb von 24 h) bei Normklima.

4.2.2 Verteilung der Messstellen

Pro Probekörperwürfel ergeben sich 15 Messstrecken mit einer Länge von 14 cm. Diese verteilen sich auf drei Seiten mit je fünf Messstellen, wobei eine Messstelle mittig und vier umrahmend davon positioniert sind. Die Abhängigkeit zur Gesteinsschichtung und zur Lastrichtung bedingen fünf verschiedene Messrichtungen, die farbig gekennzeichnet sind (siehe Skizze der Probekörper in Abb. 3 und Abb. 4). Pro Messstelle erfolgten 10 Wiederholmessungen ohne Kopplungsmittel.

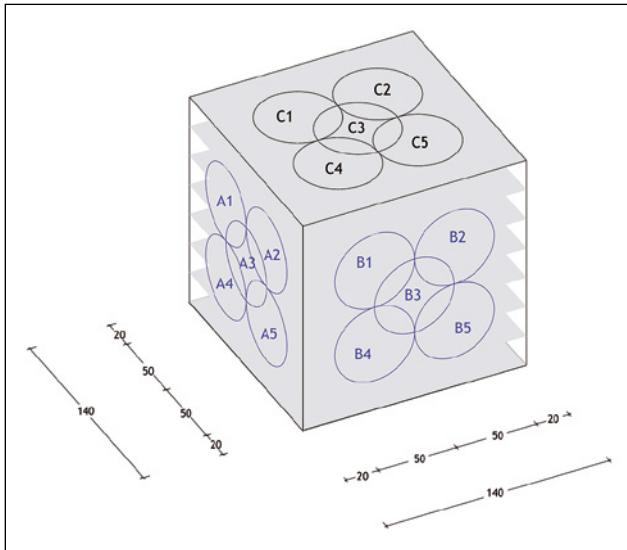


Abb. 3 Prüfkörper mit horizontaler Schichtung und Messstellen

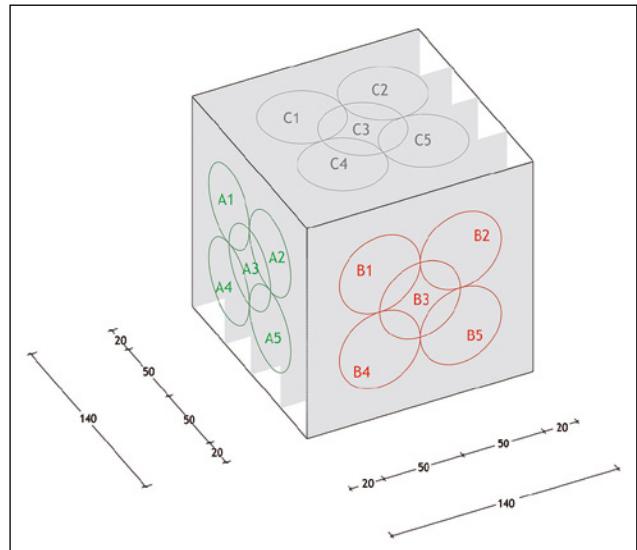


Abb. 4 Prüfkörper mit vertikaler Schichtung und Messstellen

4.2.3 Verwendetes Ultraschallmessgerät

Die Ultraschallmessungen wurden mit dem Gerät PunditLab® der Firma Proceq mit 54 kHz-Flächen-Prüfköpfen durchgeführt (Abb. 5). Neben einem Zeitinkrement von 0,1 bis 1,0 μs sind messtechnisch die Vorlaufzeiten der Prüfköpfe mit 0,5 μs zu berücksichtigen. Bei korrekter Einstellung werden diese Zeiten direkt abgezogen. Das Gerät verfügt ferner über die Möglichkeit Intervallmessungen einzustellen, so dass eine Messung automatisch erfolgen kann und eine Bedienung durch eine Person möglich ist. Über die Software PunditLink® wird das erste ankommende Signal automatisch bestimmt und ausgewertet. Da im Rahmen der Arbeit über 500.000 Messwerte ermittelt werden sollten, wurde auf diese Funktion zurückgegriffen.

4.2.4 Bestimmung der Messunsicherheit

Um die Messunsicherheit des angewendeten Verfahrens (Wegstrecke 140 mm, Laufzeit 52,3 μs) wurden 10 Wiederholungen mit jeweils neu angekoppelten Prüfköpfen am selben Probekörper wiederholt. Die empirische Standardabweichung der Messstrecke beträgt $\pm 1 \text{ mm}$ und der Laufzeit $\pm 0,6 \mu\text{s}$. Daraus ergibt sich nach dem Gesetz der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung eine kombinierte Standardabweichung von 51 m/s und eine Messunsicherheit von 1,9 %. Vorwiegend fließt in die Messunsicherheit die Standardabweichung der Laufzeit ein. Diese ist im Besonderen durch den Fehler in der Bestimmung des Erstanstiegs nach dem Grundrauschen (messtechnisch bedingte Störgröße) mit 0,5 μs bedingt.

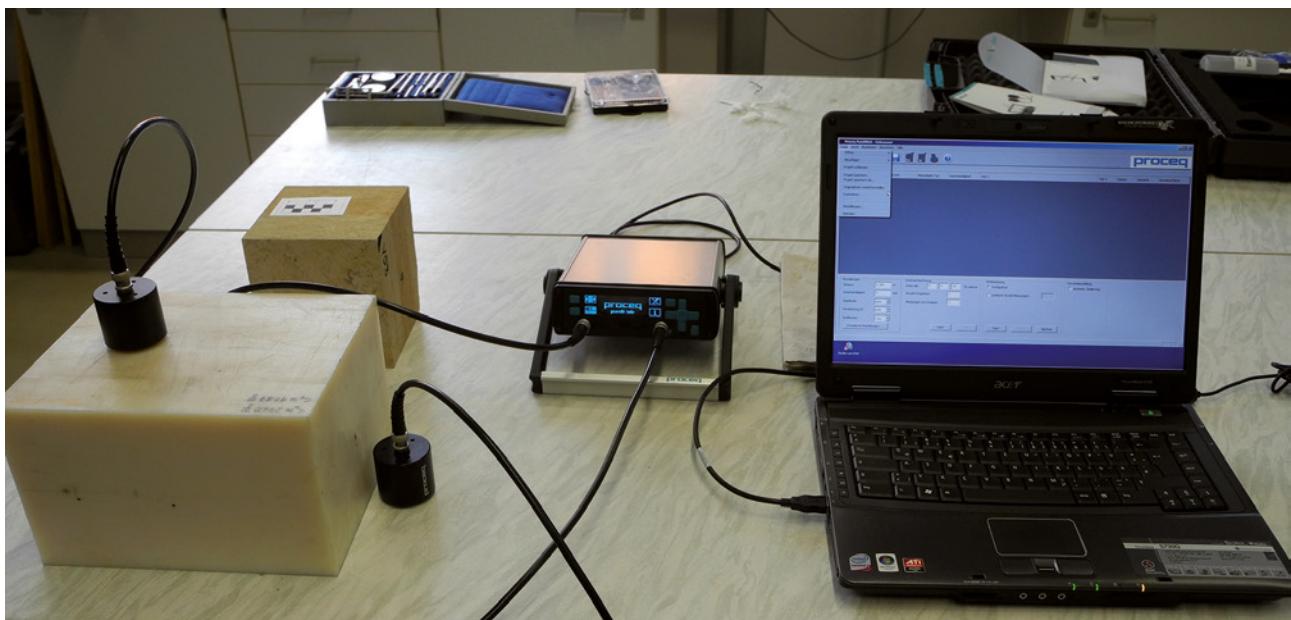


Abb. 5 Ultraschallprüfgerät PunditLab der Fa. Proceq

4.3 Einfluss der Gesteinsschichtung

An 30 Probekörpern wurde zunächst der Einfluss der Gesteinsschichtung untersucht. Die an den 15 Messstellen ermittelten Geschwindigkeiten eines Probe-körpers wurden dabei nach ihrer Schallimpulsausbreitungsrichtung bezogen auf die Gesteinsschichtung unterschieden. Die Auswertung zeigt einen Mittelwert der Ultraschallgeschwindigkeit parallel zur Schichtung von 2778 m/s mit einer Standardabweichung von ± 75 m/s sowie senkrecht zur Schichtung 2564 m/s mit einer Standardabweichung von ± 55 m/s (Abb. 6 und Tab. 1). Der Unterschied zwischen den beiden Messrichtungen beträgt ca. 200 m/s. GRUNERT [4] hatte am Cottaer Sandstein eine vergleichbare Tendenz, wenngleich auch weniger signifikant, festgestellt.

Der signifikante Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeiten unterstreicht die Sensitivität des Ultraschallverfahrens. Bei einer Schallausbreitung senkrecht zur Gefügeschichtung ist anzunehmen, dass der Schall häufiger Materialwechsel durchlaufen muss. Hier wird er durch Divergenz und Absorption geschwächt. Daraus ergeben sich längere Laufzeiten. Generell ist bei einer Anwendung des Verfahrens

die Ausbreitungsrichtung zur Gesteinsschichtungen zu berücksichtigen.

4.4 Einfluss von Gefügeschädigung

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie sich die Ultraschallgeschwindigkeit verändert, wenn das Gesteinsmaterial geschädigt ist. Für den Versuch wurde die Schädigung durch Aufbringen der Bruchspannung σ_c erreicht. Es zeigte sich, dass lediglich bei der mittigen Positionierung Messergebnisse erzielt werden können. Im äußeren Bereich war der Würfel meist so stark geschädigt, dass der Schall nicht ausreichend übertragen werden konnte. Die mittige Messstelle wurde in Abhängigkeit zur Lastrichtung und zur Schallausbreitungsrichtung bezogen auf die Gesteinsschichtung ausgewertet.

Orthogonal zur Last ist eine deutlich geringer Ultraschallgeschwindigkeit anzunehmen, da der Würfel aufgrund von Querzugbeanspruchung versagt. Diese Annahme wurde durch die Ergebnisse bestätigt. Die Geschwindigkeit bei einer Schallausbreitungsrichtung parallel zur Lastrichtung reduzierte sich um 5 (± 1) %. In der orthogonalen Richtung zur Last

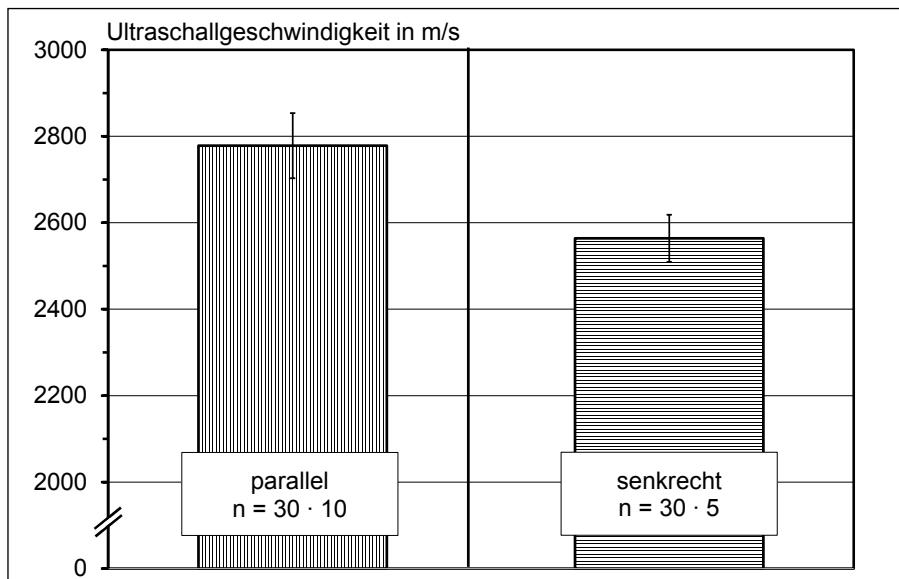


Abb. 6
Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung bezogen auf die Gesteinsschichtung

Tab. 1 Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung zur Schichtung [4]

Messung	Ausbreitungsrichtung zur Schichtung	Mittelwert	Standardabweichung
-	-	m/s	
1	parallel	3	4
Hutt		2778	75
Grunert	senkrecht	2766	231
Hutt		2564	55
Grunert		2689	134

wurde eine um 23 (± 8) % reduzierte Geschwindigkeit ermittelt (Abb. 7). Die bruchmechanischen Prozesse mit der Ausbildung eines Bruchkegels und das Versagen auf Querzug werden durch die Ergebnisse bestätigt.

4.5 Korrelation zur Druckfestigkeit?

Der Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit wurde in Forschungsergebnissen unterschiedlich dargestellt. [5]

An dem zur Verfügung gestellten Probenmaterial sollte empirisch festgestellt werden, inwieweit Korrelationen der beiden Eigenschaften zu erzielen sind.

Hierzu wurden am ungestörten Probekörper die Ultraschallgeschwindigkeit ermittelt und die Werte der fünf Messstellen je Probekörperseite gemittelt. Jede Messstelle wurde durch Zehnfachbestimmung mit jeweils neu angekoppelten Prüfköpfen ermittelt.

Im Anschluss wurde die einachsige Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 1926:2007 bestimmt. Die Auswertung erfolgte in Abhängigkeit der Impulsausbreitungsrichtung zur Schichtung und zur Drucklast. Abbildung 8 dokumentiert die Ergebnisse. Eine Korrelation zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit ist nicht zu erkennen. Das maximale Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei nicht nennenswerten 0,25. Es ist jedoch anzumerken, dass sich die Messergebnisse im gesamten auf einen ca. 1 m³ großen Probekörper aus Cottaer Sandstein beziehen.

Bei Probekörpern mit deutlich streuenden Festigkeiten sind durchaus Korrelationen bekannt. Eine Grundvoraussetzung um Ergebnisse korrelieren zu können sind ein vergleichbarer Feuchtegehalt, Verwitterungszustand, Ankopplungsbedingungen, Prüffrequenz und eine gleiche Ausbreitungsrichtung des Schalls zur Gesteinsschichtung.

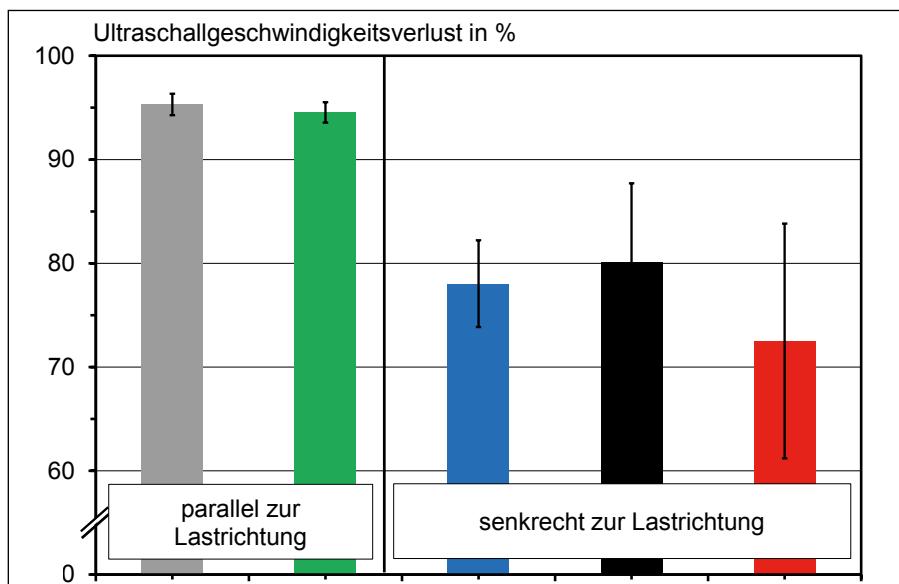


Abb. 7
Prozentualer Verlust der Ultraschallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit Lastrichtung

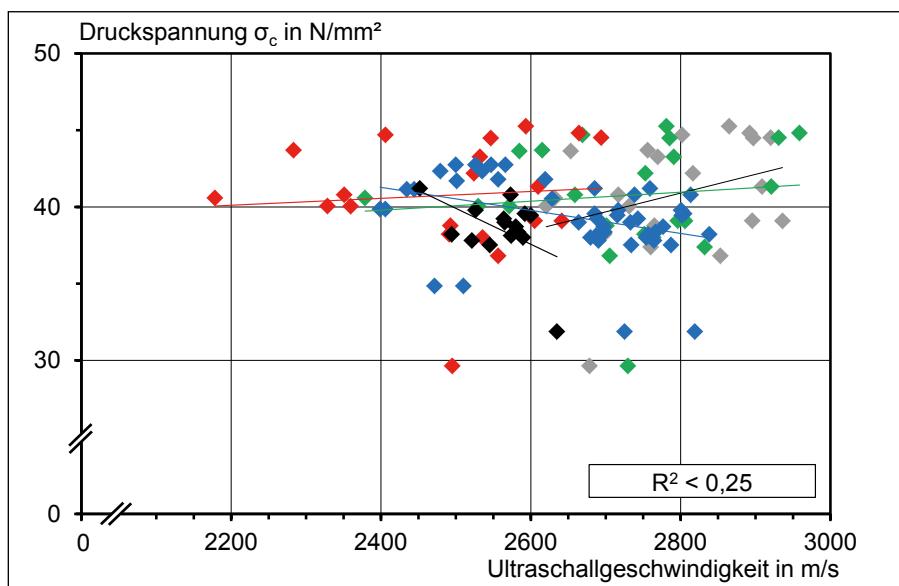


Abb. 8
Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Ultraschallgeschwindigkeit



Abb. 9 Prüfkörper innerhalb der Druckzylinderplatten (ohne Last) mit Stützkorsett und Prüfköpfen



Abb. 10 Prüfkörper mit zweiachsig angekoppelten Ultraschallprüfköpfen

4.6 Ultraschallgeschwindigkeit und wechselnde Druckspannung

Die bisherigen Ergebnisse lassen vermuten, dass sich die charakteristische Ultraschallgeschwindigkeit verändert, wenn ein Bauteil unter wechselnder Druckspannung steht. Es wurde daher gezielt dieser Fragestellung an 13 Probekörpern nachgegangen.

Der Versuchsaufbau sah die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit während eines unter wechselnder Druckspannung stehenden Sandsteins vor. Ein hölzernes Stützkorsett und ein elastisches Gummiband sorgten für eine konstante Positionierung und Ankopplung der Prüfköpfe (Abb. 9 und 10). Um zwei Durchschallungsrichtungen zu nutzen, wurden zwei vergleichbare Ultraschallgeräte angewendet.

4.6.1 Abhängigkeiten zu Be- und Entlastungen

Um die Abhängigkeiten der Ultraschallgeschwindigkeit von variierenden Druckspannungen zu erforschen, wurde ein zwei Stunden dauernder Versuch mit 42 wechselnden Belastungen gefahren.

Die Last wurde dabei kraftgeregt mit 2000 N/s gesteigert, siehe graue Säulen im Diagramm (Abb. 11) und jede Laststufe 30 s gehalten. In einer ersten Phase wurde als maximale Laststufe ca. 26 % (10 N/mm^2) der zu erwartenden Druckfestigkeit (39 N/mm^2) angefahren. Die erste maximale Last entspricht einer typischen Gebrauchslast eines verbauten Sandsteins. Es ist davon auszugehen, dass es sich hier um einen bisher noch vorhandenen Druckspannungszustand handelt (=Erstbelastung). Nach Erreichen dieser Erstspannung wurde der Probekörper auf ein Minimum von $0,05 \text{ N/mm}^2$ entlastet (=Entlastungsprozess). In einer zweiten Phase wurde eine Grenzspannung von 73 % (29 N/mm^2) bezogen auf die zu erwartende Bruchspannung beaufschlagt. Es handelt sich damit zunächst um eine Wiederbelastung, die dann in eine weitere Erstbelastung übergeht. Nach Erreichen die-

ser Grenzspannung erfolgte erneut eine Entlastung auf $0,05 \text{ N/mm}^2$. Die dritte Phase wiederholt die erste Phase und stellt somit eine wiederkehrende Belastungsstufe im Bereich der Gebrauchslast mit einer abschließenden Entlastung dar.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Die relative Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit ist in Abhängigkeit der zu erwartenden Bruchspannung aufgetragen. In der ersten Phase sinkt die Ultraschallgeschwindigkeit sowohl während der Belastungs- als auch der Entlastungsphase und erreicht bei der Entlastung auf $0,05 \text{ N/mm}^2$ eine um 3 % reduzierte Ultraschallgeschwindigkeit. In der zweiten Phase ist zunächst ein kurzer Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit zu erkennen. Der Anstieg der Geschwindigkeit reicht bis zur Höchstlast der ersten Phase (26 % der zu erwartenden Bruchspannung). Wird der Probekörper mit einer höheren Last (27–73 % der zu erwartenden Bruchspannung) belastet, demnach mit einer Erstbelastung, ist erneut eine Reduzierung der Ultraschallgeschwindigkeit um 7 Prozentwerte festzustellen. Der daran anschließende Entlastungsprozess lässt die Ultraschallgeschwindigkeit bis zu 10 Prozentwerte reduzieren. In der dritten Phase wird der Probekörper erneut mit einer Gebrauchslast beaufschlagt. Die Ultraschallgeschwindigkeit steigt während der Wiederbelastung um 2 % an, um bei einer wiederkehrenden Belastung wieder um den gleichen Wert zu sinken.

Die Ergebnisse lassen annehmen, dass mit dem Verfahren der Ultraschalltransmission sehr sensitiv die Veränderung des Gefüges bei Be- und Entlastungen detektiert werden kann. Eine Geschwindigkeitsveränderung von –10 % entspricht einer Verlängerung der Schalllaufzeit von 54 auf 59,6 μs . Nimmt man die Schallgeschwindigkeit als Materialkonstante an, verlängert sich die Wegstrecke. Demnach erhöht sich die Schallwegstrecke von 140 auf ca. 154 mm.

Als Ursache sind Mikrorisse und Gefügestörungen anzunehmen. Der Effekt einer sinkenden Ultraschallgeschwindigkeit bei Entlastung deutet wohl weniger auf eine Verstärkung der Gefügestörung hin, sondern wohl auf eine Aufweitung der Mikrorisse durch den Entspannungsprozess.

Die Zusammenhänge zwischen Erst-, Ent- und Wiederbelastung, werden deutlicher, wenn die Informationen in Anlehnung an ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm auftragen werden (Abb. 12). Gradientenwechsel geben eindeutige Hinweise auf die Belastungsgeschichte.

4.6.2 Einfluss der Querdehnungsbehinderung

Bei dieser Versuchsreihe galt es, den Einfluss der Querdehnungsbehinderung zu untersuchen. Anstatt des Würfels wurde der Versuch an sechs stehenden Prismen $14 \times 14 \times 21 \text{ cm}^3$ durchgeführt. Eine Mess-

strecke wurde wie gewohnt im Bereich der Querdehnungsbehinderung auf 7 cm Höhe positioniert. Die zweite darüber in einer Höhe von 12 cm. Hier wird der Probekörper bei Druckbeanspruchung nicht in seiner Querdehnung behindert. In diesem Bereich ist zu erwarten, dass sich Hauptspannungsrisse stärker ausbilden.

Die Ergebnisse für eine Schallausbreitung senkrecht zum Gefüge sind im Spannungs-Geschwindigkeitsdiagramm (Abb. 13) festgehalten. Durchgezogene Linien beziehen sich auf Messungen im querdehnungsbehinderten Bereich. Die gestrichelten Linien sind die Messergebnisse einer Durchschallung in einer Höhe von 12 cm.

Die Geschwindigkeit der Messungen im nicht querdehnungsbehinderten Bereich fällt um 4 Prozentwerte mehr als im querdehnungsbehinderten Bereich.

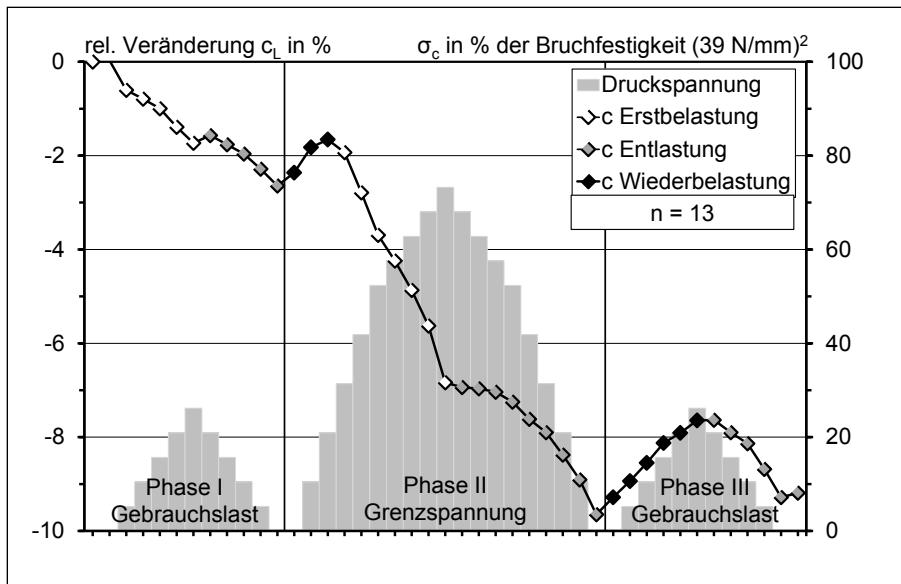


Abb. 11
relative Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Druckspannung

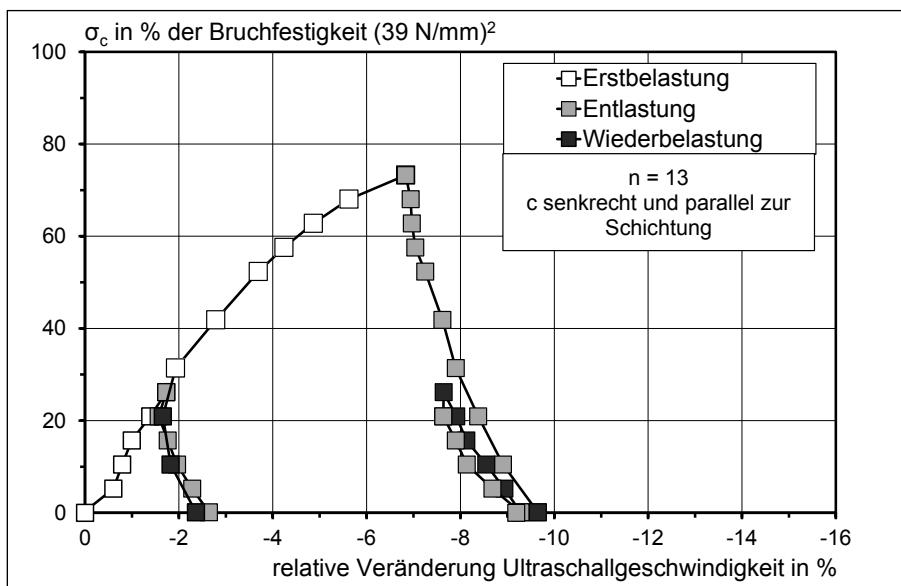


Abb. 12
Spannungs-Geschwindigkeitsdiagramm

Bereiche der ungehinderten Querdehnung zeigen erwartungsgemäß eine stärker fallende Schallgeschwindigkeit und somit eine stärkere Gefügeschädigung als im behinderten Bereich. Damit wird erneut bestätigt, dass das Messverfahren der Ultraschalltransmission sehr sensitiv auf eine Gefügeschädigung reagiert.

4.6.3 Wiederholung der Nachbruchspannung

Ein dritter Versuch untersuchte die Frage nach einer Gefügeveränderungen bei einer mehrmaligen Belastung im Nahbereich der Bruchlast exemplarisch an einem Probekörper. Hierzu erfolgte eine Prüfung gemäß der ersten Versuchsreihe mit 42 Laststufen und drei Lastzyklen. Im direkten Anschluss wurde erneut der zweite Lastzyklus mit einer Maximalspannung von 73 % der zu erwarten Bruchspannung zweimalig gefahren.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 festgehalten. Die Ultraschallgeschwindigkeit steigt bei einer wiederholenden Belastung wie gewohnt reziprok zur Entlastung. Wird die Wiederbelastung jedoch bis zu 73 % der zu erwartenden Bruchfestigkeit gesteigert, verändert sich der Kurvenverlauf bei Wiederbelastung. Ab ca. 50 % der Bruchspannung reduziert sich die Ultraschallgeschwindigkeit. Bei einer dritten Belastung im Grenzspannungsbereich ist ab 60 % bezogen auf die ansteigende Bruchspannung ein Gradientenwechsel zu erkennen. Es ist anzunehmen, dass ab diesen Belastungen weiterführende Gefügeschädigungen auftreten.

4.6.4 Ausblick

Die Ergebnisse ermöglichen einen neuen Anwendungsbereich der Ultraschalltransmission: Die hohe Sensitivität gegenüber Gefüge- und Spannungsver-

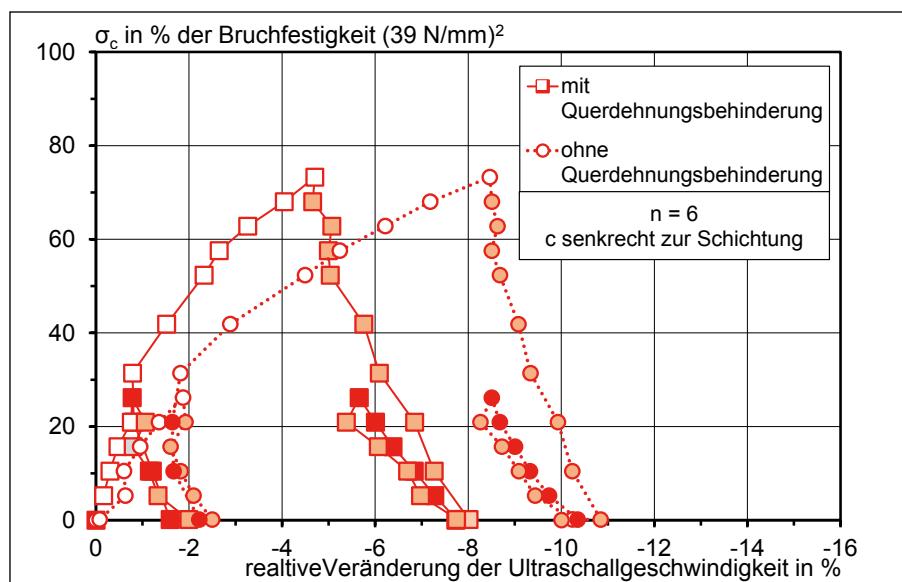


Abb. 13
Spannungs-Geschwindigkeitsdiagramm in Abhängigkeit der Querdehnungsbehinderung

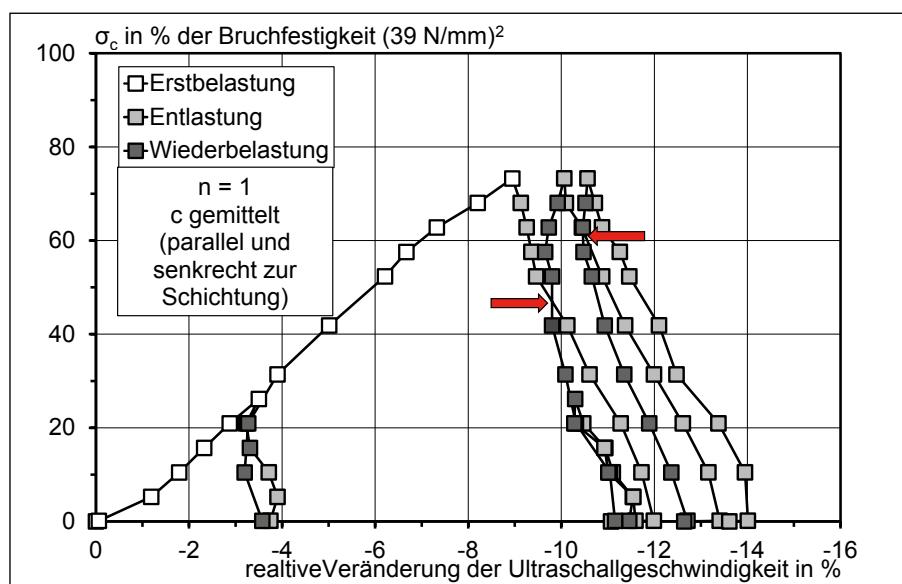


Abb. 14
Spannungs-Geschwindigkeitsdiagramm in Abhängigkeit wiederholender Belastungen im Grenzspannungsbereich

änderungen kann für Strukturuntersuchungen, zur Abschätzung der Materialgüte, zur Detektion des Gefügezustands, bei experimentellen Traglastversuchen und zur Untersuchung der Belastungsgeschichte vorteilhaft genutzt werden. Es ist durchaus anzunehmen, dass mit der Ultraschalltransmissionsanalyse das elastische und plastische Materialverhalten präzise beschrieben werden kann. Weiterführende Untersuchungen zum viskoelastischem Materialverhalten wären wünschenswert.

5 Zusammenfassung

Um mittels Ultraschalltransmissionsmessung tragvermögensrelevante Kennwerte an Sandsteinen zu ermitteln, sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen.

Ein eindeutiger Rückschluss der Ultraschallgeschwindigkeit auf mechanische Materialkennwerte, wie der der Druckfestigkeit, ist nach den gewonnenen Ergebnissen nicht möglich. Verringerte Geschwindigkeiten geben einen Hinweis auch auf geringe Gefügeveränderungen, allerdings ohne diese zu lokalisieren. So weisen bis zum Bruch belastete Gesteine bei einer Durchschallungsrichtung parallel zur Lastrichtung eine um 5 % geringere und orthogonal zur Lastrichtung um 25 % geringere Geschwindigkeit auf.

Die Ultraschallgeschwindigkeit reagiert sehr sensiv auf Veränderungen der Druckspannung. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um die vergangene maximale Belastung eines Bauteils durch experimentelle Belastungsversuche zu ermitteln. Dabei geben Gradientenwechsel in Spannungs-Geschwindigkeitsdiagrammen eindeutige Hinweise auf einen bisher noch nicht vorhandenen Druckspannungszustand.

6 Danksagung

Ein besonderer Dank für ihre Unterstützung gilt Prof. Dr. Ing. Alexander Taffe und Dipl.-Ing. Andreas Schultz. Für die freundliche Schenkung des Probenmaterials sei der Stiftung Preußischer Schlösser und Gärten herzlich gedankt.

Literatur

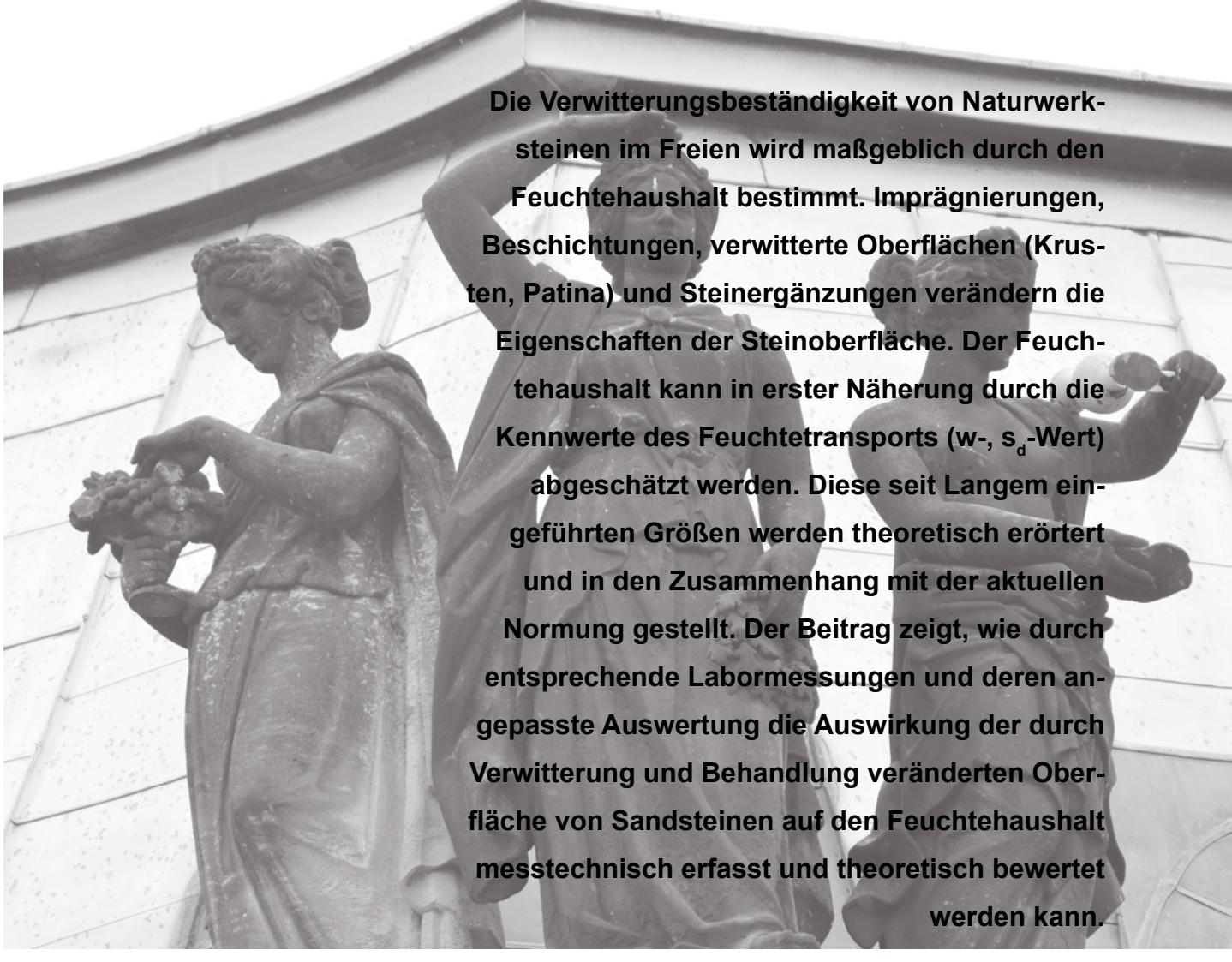
- [1] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1986.
- [2] Deutsch, V.; Platte, M.; Deutsch, W., et al: Die Ultraschallprüfung. Informationsschriften zur Zerstörungsfreien Prüfung. ZfP kompakt und verständlich. Band 1, Wuppertal, Castell-Verlag, 2010.
- [3] Siedel, H; Götze, J.; Kleenberg, K.; et al: „Sachsen“. In: Bausandsteine in Deutschland. Sachsen-Anhalt, Sachsen und Schlesien (Polen), Stuttgart, Verlag Schweizerbart, 2011, S. 162–272.
- [4] Grunert, S.: Der Elbsandstein. Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften. Dresden, Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, 2007.
- [5] Aibado, A.; Emilotay, A.: Reliability of using nondestructive tests to estimate compressive strength of building stones and bricks. Alexandria Engineering Journal, Bd. 51, Nr. 2012, 2012, S. 193–203.

Abbildungen

Abb. 1–14: Sarah Hutt

Anwendung der Feuchtekennwerte zur Beurteilung von Natursteinoberflächen

von Christoph Herm



The image shows several classical stone statues, possibly of figures like Cupids or putti, mounted on a building's cornice. They are weathered and show signs of age. The background consists of the building's architectural details.

Die Verwitterungsbeständigkeit von Naturwerksteinen im Freien wird maßgeblich durch den Feuchtehaushalt bestimmt. Imprägnierungen, Beschichtungen, verwitterte Oberflächen (Krusten, Patina) und Steinergänzungen verändern die Eigenschaften der Steinoberfläche. Der Feuchtehaushalt kann in erster Näherung durch die Kennwerte des Feuchtetransports (w -, s_d -Wert) abgeschätzt werden. Diese seit Langem eingeführten Größen werden theoretisch erörtert und in den Zusammenhang mit der aktuellen Normung gestellt. Der Beitrag zeigt, wie durch entsprechende Labormessungen und deren angepasste Auswertung die Auswirkung der durch Verwitterung und Behandlung veränderten Oberfläche von Sandsteinen auf den Feuchtehaushalt messtechnisch erfasst und theoretisch bewertet werden kann.

1 Grundlagen

1.1 Feuchtehaushalt von behandeltem Naturstein

Der Bewertung des Feuchtehaushalts eines Bauteils kann seit längerem nach der „Fassadentheorie“ von H. KÜNZEL in vereinfachter Weise bewertet werden [1, 2]. Hierbei werden die Transportmechanismen für flüssiges Wasser (Feuchteaufnahme durch Kapillarität) und stationäre Dampfdiffusion (Trocknung) berücksichtigt und in eine mathematische Beziehung zueinander gesetzt. Wie diese und andere Transportmechanismen auf den Sonderfall beschichteter Natursteinteile einwirken, zeigt schematisch Abbildung 1. Hier sind grundsätzlich Schadensbilder des Untergrundes (Steinschäden) und Schäden an der Beschichtung („Anstrichschäden“) zu unterscheiden. Auch wenn erstere von größerer Bedeutung sind und gerade auch durch die Anwendung einer Behandlung oder Beschichtung vermieden werden sollen, können doch Anstrichschäden in manchen Fällen die Steinschäden auch beschleunigen. Dies ist möglich, wenn durch Fehlstellen oder eine nicht beschichtete oder isolierte Standfläche flüssiges Wasser in den Natursteinuntergrund eindringen kann, aber durch einen dampfdichten Anstrich (z.B. Dispersion- oder Ölfarbe) am Abtrocknen gehindert wird. Die besonders ungünstige Wirkung von kleinen Fehlstellen in der Beschichtung liegt darin, dass sich die Feuchtefront räumlich in den Baustoff ausbreitet und damit die aktuelle Saugfläche zunimmt [3]. Dies kann in ungünstigen Fällen zu Frost- oder Salzkristallisationsschäden am Naturstein führen.

Es ist bekannt, dass herkömmlichen Verfahren, die nur auf stationären Randbedingungen beruhen, nicht in jedem Fall zur Beschreibung der sich in der Realität eines Bauteils einstellenden Verhältnisse geeignet sind [4]. Seit längerem sind deshalb verschiedene rechnergestützte Simulationsverfahren zur Beschreibung des Feuchtehaushalts eingeführt und genutzt worden, [5, 6] die sich neben den Feuchtespeicherfunktionen auch auf die Feuchtespeicherfunktion sowie thermische Kennwerte stützen. Unter

praktischen Gesichtspunkten erscheint es für die erste feuchtetechnische Bewertung von Natursteinteilen ausreichend, die oben genannten Transportfunktionen zu betrachten. Hierfür haben die klassischen Messverfahren ihre Bedeutung behalten, die in letzter Zeit wieder durch entsprechende Normen bekräftigt worden ist (DIN EN 15801, DIN EN 15803, WTA-Merkblatt 2-12). Immerhin stützen sich auch die numerischen Verfahren unter anderem auf diese Standardkennwerte, so beispielsweise das Programm WUFI auf die Diffusionswiderstandszahl μ und auf den Absorptionskoeffizienten AC zur Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten [7].

1.2 Wasserabsorption durch Kapillarität

Es wurde in der Literatur gezeigt, dass die Wasseraufnahme auch von beschichteten, porösen Stoffen dem empirischen „Wurzel-Zeit-Gesetz“ folgt [8]. Darauf gründet die genormte Bestimmung der „Wasserdurchlässigkeit“ von Beschichtungen nach DIN EN 1062-3. [9] Allerdings sind hier 24 Stunden Messzeit vorgeschrieben, die in der Praxis den hier besprochenen Fällen wegen geringer Größe der Prüfkörper bzw. Veränderung der Beschichtung während der Messung nicht immer angemessen sind. [10, 11]. Dem wurde in der neueren Norm zur Erhaltung des kulturellen Erbes (DIN EN 15801) Rechnung getragen, die nun zur Auswertung den tatsächlichen linearen Abschnitt der Auftragung über der Wurzel-Zeit vorsieht. [12] Man erhält einen „Koeffizienten der Kapillarwasserabsorption“ AC.

Die experimentell bestimmbarer Wasserdurchlässigkeit einer Beschichtung ist – ähnlich wie die Dampfdurchlässigkeit – vom Untergrund abhängig, da ein hoher saugfähiger Untergrund die Wasseraufnahme einer Beschichtung erhöht. [13] Daher empfiehlt es sich, zur Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit eines bestimmten Anstrichs die Prüfung des Anstriches auf dem betreffenden Untergrund auszuführen.

Grundsätzlich lässt sich die kapillare Wasseraufnahme einer senkrechten Fassadenfläche auch ohne Probenahme mit dem „Wassereindringprüfer

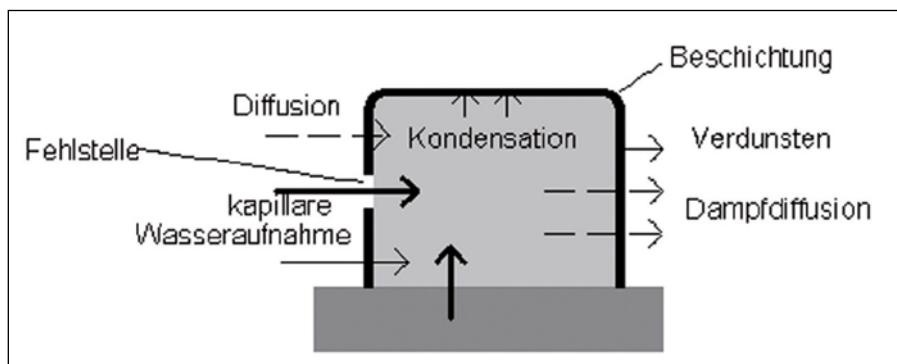


Abb. 1
Feuchtehaushalt von beschichteten Natursteinteilen.

nach KARSTEN“ bestimmen. [14] Der Anwendung auf beschichteten Flächen stehen in der Praxis erfahrungsgemäß Einschränkungen entgegen: Unter anderem kann die notwendige Fixierung des Karsten-Röhrchens mit Dichtmasse bei geringerer Haf- tung des Anstrichs zu dessen Ablösung führen und die ermittelbaren Messwerte sind zu gering für das Verfahren. Eine viel versprechende Weiterentwicklung zur Abschätzung der Wasseraufnahme von beschich- teten Flächen ist das ohne Fixierung auskommende Prüfröhrchen nach LEHMANN [15]. Eine umfassende Erprobung dieser Technik auf beschichteten oder anderweitig behandelten Natursteinflächen steht aber noch aus. Ersatzweise kann der bei der Dampfdif- fusion erwähnte „Luftpermeationswiderstand“ auch zur Abschätzung der Durchlässigkeit einer Fassa- denbeschichtung für flüssiges Wasser herangezogen werden. Schließlich lässt sich auch mit der „inversen Wet-Cup-Methode“ ein Überblick über die Größen- ordnung der Wasserdurchlässigkeit von Beschichtun- gen gewinnen. [16]

1.3 Wasserdampfdiffusion

Die Trocknungsfähigkeit eines durchfeuchteten, be- schichteten Natursteinuntergrundes wird in der Regel aus der Durchlässigkeit der Beschichtung für Wasser- dampf („Wasserdampfdiffusion“) abgeleitet. Die „Dif- fusionäquivalente Luftschichtdicke s_d “ ist ein anschau- liches Maß für den Widerstand, den Wasserdampf in einer beliebigen Schicht überwinden muss. Sie hat als „Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl einer Luftschicht“ Eingang in die internationale Normung gefunden (DIN EN 15803). [17] Der Zusammenhang mit dem Materialkennwert „Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl“ μ ist über die Schichtdicke d gege- ben: $s_d = \mu \cdot d$. Es ist zu beachten, dass der μ -Wert ein intensiver Materialkennwert ist und nicht für unter- schiedlich geschichtete Systeme angegeben werden kann. Die s_d -Werte zusammengesetzter Schichten addieren sich grundsätzlich im Sinne einer Serien- schaltung. Dieses Prinzip wird auch im bekannten „Glaser-Verfahren“ angewendet. [5] Die tatsächliche Behinderung der Dampfdiffusion eines Anstriches sollte nach wiederholten Messungen als Differenz der s_d -Werte des beschichteten zum nicht beschichteten Probekörper bzw. einer Vergleichsprobe angegeben werden. [18]

Ausführlichen Messreihen verschiedener Auto- ren haben nachgewiesen, dass der experimentell bestimmte s_d -Wert einer Beschichtung von der Art des Untergrundes abhängt, auf dem sie aufgetragen ist. [18, 19] Außerdem verringert ein merklicher s_d - Wert des Untergrundes den Wasserdampfpartialdruck

in der Grenzschicht, was die Dampfdiffusionsdurch- lässigkeit der Beschichtung verringern kann. [20] Grundsätzlich sollte also der Träger für die Prüfung ei- nes Anstrichs so dünn wie praktisch möglich gehalten werden. Die Hersteller der Anstrichstoffe ziehen Glas- fritte als Träger vor, um vergleichbare und vom Un- tergrund unabhängige s_d -Werte anzubieten. Für den Einfluss des Trägers ist die Ausbildung der Kontakt- schicht zwischen Träger und Anstrich entscheidend, besonders ausgeprägt bei groben, stark porösen Sandsteinen und Anstrichen mit hohem μ -Wert (z.B. Ölfarbe). Zur Beurteilung der Wasserdampfdiffusion eines bestimmten Anstrichs wird also die Prüfung des Anstriches auf dem betreffenden Untergrund empfohlen. [18] SNETHLAGE und PFANNER [21] schlagen vor, je nach Größenordnung der Wasserabsorption auch unterschiedliche Dicken des Natursteins für die Be- stimmung des s_d -Wertes zu wählen. Dieses Konzept widerspricht dem Prinzip, die Dampfdruckdifferenz in der Diffusionsmessung möglichst wenig zu verändern und sollte nicht angewendet werden.

Von BAGDA [22] wurde gezeigt, dass streng ge- nommen:

1. die Wasserdampf-Diffusionseigenschaften einer Beschichtung von der Feuchtespeicherung des Untergrundes (Sorptionsisotherme) abhängt und
2. die Dampfdiffusion beschichteter Materialien nicht nach dem Glaser-Verfahren behandelt werden sollte.

Dennoch können in erster Näherung die s_d -Werte geschichteter Systeme additiv – also nach dem Gla- ser-Verfahren – ermittelt werden, wenn sie auf iden- tischem Untergrund konsekutiv ermittelt worden sind. Sie eignen sich für den relativen Vergleich der Dampfdurchlässigkeiten untereinander. [3] Jede Veränderung in der Oberfläche eines Natursteins wie eine Beschichtung, aber auch Alterungsprodukte oder andere Behandlungen kann man als „Schicht“ auffas- sen und für diese einen s_d -Wert bestimmen. Somit kann man in erster Näherung durch Subtrahieren der s_d -Werte den Einfluss der einzelnen Schichten auf die Dampfdiffusion ermitteln. Dazu muss man die Was- serdampffusion wiederholt an identischen Probenkö- pern messen. Als Anwendungsbeispiel wird in diesem Beitrag die Behandlung von verwitterten, schwarz „patiniertem“ Elbsandstein vorgestellt, der anschlie- ßend gereinigt und dann beschichtet wurde.

Das WTA-Merkblatt 2-12 [23] weist auf zwei wei- tere wichtige Gesichtspunkte bei der Bewertung der Wasserdampfdiffusion hin: Zum Einen nimmt die tat- sächlich abgegebene Wassermenge (Wasserdampf- Diffusionsstrom G) umgekehrt proportional mit der

Erhöhung des s_d -Wertes ab. Das heißt, eine starke Erhöhung des s_d -Wertes wirkt sich besonders ungünstig auf die Trocknung aus. Zum Anderen ist G der Sättigungsfeuchte der Luft proportional und damit stark von der Temperatur abhängig. Das bedeutet, dass im Winter die Austrocknung deutlich erschwert ist (beispielsweise bei 3 °C auf 27 % vermindert, gegenüber dem nach Norm bei 23 °C bestimmten Wert).

Die oben beschriebene Messung der Dampfdiffusion originaler Oberflächen ist nur an entnommenen Proben im Labor möglich. Als alternative Technik wurde der „Luftpermeationswiderstand“ im Druckgefäß vorgeschlagen [24, 25]. Auch wenn eine gewisse Korrelation zur Dampfdiffusion gezeigt werden konnte, kann dies nur für einen intakten Anstrich gelten. Fehlstellen würden zu Druckströmung führen und damit scheinbar höhere Werte ergeben. Eine indirekte Methode zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusion ist das Trocknungsverhalten [20]. Durch die Beschichtung sollte sich die Zeit für das Austrocknen auf höchstens 120 % des Wertes für den unbeschichteten Untergrund erhöhen. Eine Begründung für diesen Grenzwert wird nicht angegeben. [21]



Abb. 2 „Patinierter“ Elbsandstein (Varietät Cotta), Material für die Laboruntersuchungen

2 Anwendungsbeispiel

2.1 Fragestellung

Im Zuge der Voruntersuchungen für die Neufassung der Sandsteinskulpturen am Dresdner Zwinger sollten exemplarisch die Kenngrößen des Feuchtetransports für gealterten und beschichteten Elbsandstein bestimmt werden. Die Verwitterung von Elbsandstein-Varietäten ist durch die Ausbildung einer schwarzen, stabilen Oberfläche gekennzeichnet, für die sich der Begriff „Patina“ eingebürgert hat. Sie besteht im Wesentlichen aus der Anreicherung von Eisenverbindungen, die sich tiefer in das Steingefüge hineinziehen und nicht ohne Schäden entfernt werden können. [26]

2.2 Materialien

Zur Untersuchung kamen Elbsandsteine zweier verschiedener Varietäten:

- Elbsandstein, Varietät Cotta (Kirchleithe): Oberfläche geglättet mit schwarzer Patina (Abb. 2),
- Elbsandstein, Varietät Posta: Oberflächen scharriert (vermutlich maschinell) mit schwarzer Patina (vgl. Abb. 3).



Abb. 3 „Patinierter“ Elbsandstein (Varietät Posta), Material für die Laboruntersuchungen



Abb. 4 „Patinierter“ Elbsandstein (Varietät Cotta), nach zweimaligem Anstrich mit Siliconharzlasur (Prüfkörper Wasserabsorption)



Abb. 5 „Patinierter“ Elbsandstein (Varietät Posta), nach zweimaligem Anstrich mit Siliconharzlasur (Prüfkörper Wasserabsorption)

Die patinierten Oberflächen der Prüfkörper wurden vor der Beschichtung mittels Dampfstrahler gereinigt.

Beschichtung Siliconharzfarbe-Lasur, Rezeptur: [27] 40% Remmers Funcosil LA farblos (Siliconfarbe), 10% Remmers Funcosil LA weiß (Siliconfarbe), 2–3% Remmers Funcosil Farbton (ocker, rot, ...), 1–2% Antipilz (Fa. Gustav Schmidt & Co NFL, Hamburg), 45% Wasser. Auftrag flächig in zwei Schichten, 38 g/m² (Cotta) bzw. 50 g/m² (Posta).

2.3 Methoden

2.3.1 Wasseraufnahme durch Kapillarität

Die Wasseraufnahme wurde durch kapillares Saugen in Anlehnung an DIN EN 15801 [12] bestimmt. Zur Anwendung kamen je Varietät zwei frisch gesägte Bohrkerne (Durchmesser ≈ 70 mm, identisch mit den Prüfkörpern für die Wasserdampfdiffusion) bzw. je Varietät zwei gesägte Prüfkörper mit rechteckigen Saugflächen, die wie die Prüfkörper für die Dampfdiffusion gereinigt und zweimal beschichtet wurden (nicht identisch diesen Prüfkörpern) (Abb. 4 und Abb. 5). Vor der Messung wurden die Proben jeweils bei 75 % r.F. konditioniert. Im Gegensatz zur früheren Norm (DIN 52615) wird der „Koeffizient der Kapillarwasserabsorption“ AC aus der Auftragung über der Wurzel Zeit in Sekunden ermittelt. Damit unterscheidet er sich vom früher gebräuchlichen „Wasseraufnahmekoeffizienten“ w nach DIN 52615 um den Faktor $\sqrt{3600} = 60$.

$$AC = Q_i / \sqrt{t} \quad \text{mit } Q_i = (m_i - m_0) / A$$

(Q_i = Masse absorbiertes Wasser je Flächeneinheit (durch lineare Regression aus mindestens fünf aufeinander folgenden Punkten im linearen Abschnitt der Kurve $Q_i = f(\sqrt{t})$ ermittelt), in kg/√s; t = die seit Prüfbeginn vergangene Zeit, in s; m_0 = Trockenmasse des Probekörpers, in kg; m_i = Masse des Probekörpers zum Zeitpunkt t_i , in kg; A = Fläche des Probekörpers in Kontakt mit Wasser, in m²).

Aus Gründen der Anschaulichkeit wird in diesem Beitrag der frühere w-Wert in kg/(m²·h) (Wurzel Stunden) angegeben, zumal er auch noch für die Berechnung und Bewertung der „Künzel-Zahl“ erforderlich ist.

2.3.2 Wasserdampfdiffusion

Das Material wurde in Form von Bohrkernscheiben (Durchmesser ≈ 70 mm) präpariert. Je Varietät wurden zwei Scheiben gemessen. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl einer Luftsicht „ s_d “ der Bohrkernscheiben wurde in Anlehnung an DIN EN 18503 [17] bestimmt. Abweichend wurde bei 23 °C eine Feuchtedifferenz von (100–50) % r.F. („wet

cup II“) angewendet, weil dies der Trocknung eines durchfeuchteten Untergrundes am nächsten kommt. Zum Einsatz kam eine Prüfeinrichtung mit abnehmbaren Deckel [13] („Schalensystem Typ 2“ nach DIN EN 15803) (Abb. 6), in die die Probekörper wiederholt eingesetzt werden konnten. Der s_d -Wert wurde nach Punkt 3.8ii der DIN EN 15803 direkt aus der Wasserdampfdurchlässigkeit der Luft δ_a und dem experimentell bestimmten Wasserdampf-Diffusionsdurchlasskoeffizienten W_p des Probekörpers berechnet. Zur Berechnung von δ_a (in kg/(m · s · Pa)) wurde vereinfachend ein Luftdruck von $p = p_0$ (Normalluftdruck) angenommen.

$$s_d = \delta_a / W_p \quad \text{mit } W_p = G / (A \cdot \Delta p_v) \quad \text{mit } G = \Delta m_i / t$$

(W_p = Wasserdampf-Diffusionsdurchlasskoeffizient, in kg/(m² · s · Pa); G = Wasserdampf-Diffusionsstrom (durch lineare Regression aus mindestens fünf aufeinander folgenden, in gerader Linie angeordneten Punkten der Kurve $G = f(t)$ ermittelt), in kg/s; A = Fläche der Prüfoberfläche, in m²; Δp_v = Wasserdampf-Druckdifferenz quer durch den Probekörper, in Pa; Δm_i = kumulative Massenänderung, in kg; t = Zeit, in s).

Die Abfolge der Messungen und Auswertung ist in Abbildung 7 dargestellt. Als erstes wurde an einer Scheibe aus der nicht gealterten Rückseite des Bohrkerns die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl des unverwitterten Steins $\mu(T2)$ experimentell bestimmt. Für die Elbsandstein-Varietät „Cotta“ wurde in dieser Untersuchung ein Wert $\mu = 15$ ermittelt; für die Varietät „Posta“ $\mu = 16$. Mit der Dicke der obersten („patinierten“) Scheibe d wurde daraus der für diese Scheibe zu erwartende s_d -Wert ohne Patina berechnet: $s_d(T) = \mu(T2) \cdot d$. Der Patina kommt in diesem Fall keine eigene Dicke zu, da sie eher ein Phänomen

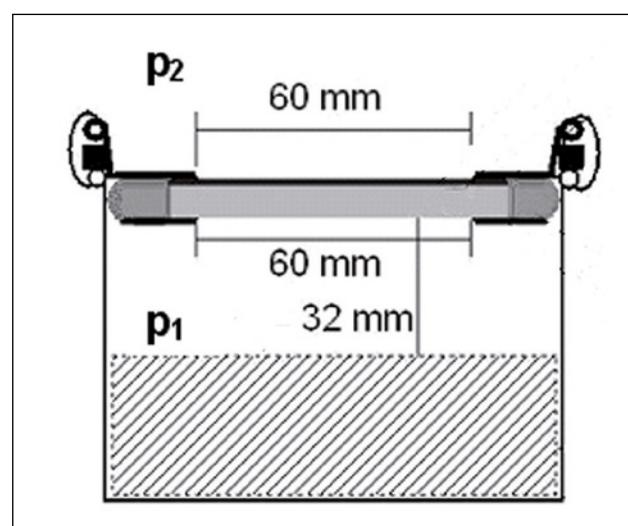


Abb. 6 Prüfeinrichtung zur Messung der Wasserdampfdiffusion

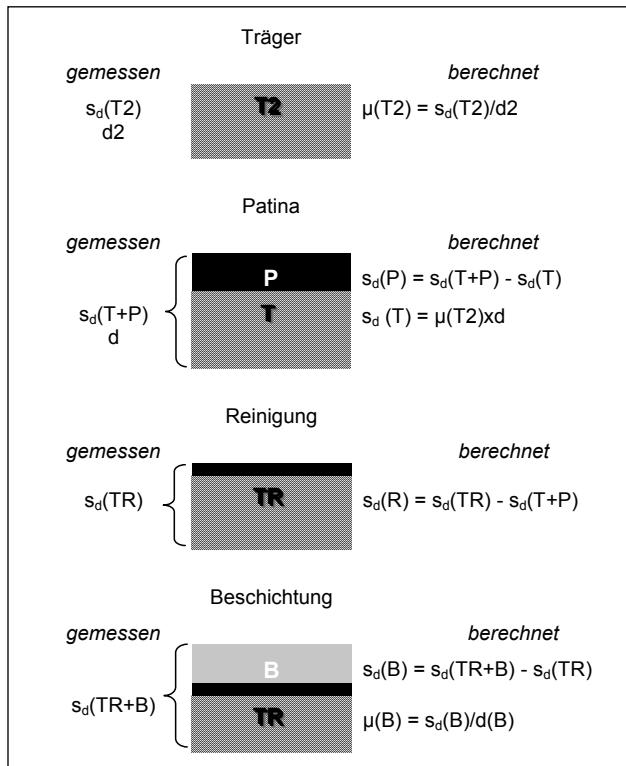


Abb. 7 Bestimmung der „Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen“ einer Luftschicht^a s_d von geschichteten Naturstein-Prüfkörpern. (d = Schichtdicke, T = Träger, P= Patina, R = gereinigt, B = Beschichtung)

in den obersten Kornlagen des Steins ist. Sodann wurde der s_d -Wert der patinierten Scheibe $s_d(T + P)$ experimentell bestimmt und durch Subtrahieren der Einfluss der Patina $s_d(P)$ berechnet. Anschließend wurde mittels Dampfstrahl gereinigt und wieder der s_d -Wert bestimmt. Analog zu oben wurde durch Subtrahieren der Einfluss der Reinigung $s_d(R)$ berechnet. Schließlich wurde die patinierte und gereinigte Scheibe beschichtet und wieder der s_d -Wert bestimmt. Den s_d -Wert des Anstriches $s_d(B)$ erhielt man wieder durch Subtrahieren.

2.4 Ergebnisse und Diskussion

2.4.1 Wasserabsorption durch Kapillarität

Die Sandstein-Varietät Cotta zeigt mit patinierter Oberfläche eine relativ geringe kapillare Wasseraufnahme ($w \approx 1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), die gegenüber der sägefrischen Oberfläche auf ca. die Hälfte erniedrigt ist ($w = 1,7 \dots 2,9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Nach der Reinigung ist die Wasseraufnahme der patinierten Oberfläche (identische Probe) im Rahmen der Messgenauigkeit gleich geblieben ($w = 0,9 \dots 1,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Die Kurvenverläufe der Wasserabsorption aller beschichteter Probenkörper zeigen einen ansteigenden Verlauf in der Auftragung gegen Wurzel-t. Mit längerer Zeitdauer (ca. 0,5 ... 1 Stunde) lässt die wasserabweisende Wirkung des Anstrichs nach. Daher wurde nur der erste Abschnitt der Kurve ($\sqrt{t} \leq 40 \text{ min}$) hinsichtlich des w -Werts ausgewertet. Die Siliconharz-Lasur vermindert die kapillare Wasserabsorption der Varietät Cotta in die Anfangsphase deutlich gegenüber dem Vierzustand (patiniert, gereinigt) auf $w = 0,09 \dots 0,18 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (etwa ein Zehntel). Die Wasserdurchlässigkeit der Oberfläche ist damit gering bis mittel wasserabweisend zu bezeichnen. [9]

Die Sandstein-Varietät Posta hat im sägefrischen Zustand eine relativ hohe kapillare Wasseraufnahme ($w \approx 12 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, etwa das Sechsfache der Varietät Cotta. Dagegen bewirkt die Patina eine starke Verringerung der Wasseraufnahme auf etwa ein Achtel ($w = 1,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Durch die Reinigung wird die Wasseraufnahme der patinierten Oberfläche (identische Probe) deutlich auf etwa den vierfachen Wert angehoben, der aber nur etwa die Hälfte des sägefrischen Materials beträgt ($w \approx 6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Die Siliconharz-Lasur verminderte die kapillare Wasseraufnahme der Varietät Posta in der Anfangsphase ($t \leq 40 \text{ min}$) deutlich gegenüber dem Vierzustand (patiniert, gereinigt) auf $w \approx 1,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (etwa ein

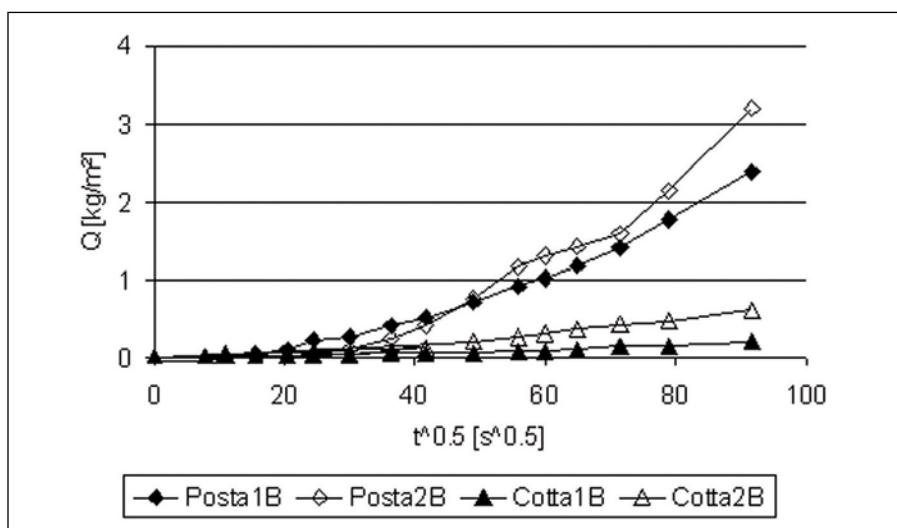


Abb. 8

Zeitlicher Verlauf der Wasserabsorption durch Kapillarität von Elbsandsteinen beschichtet mit Siliconharz-Lasur

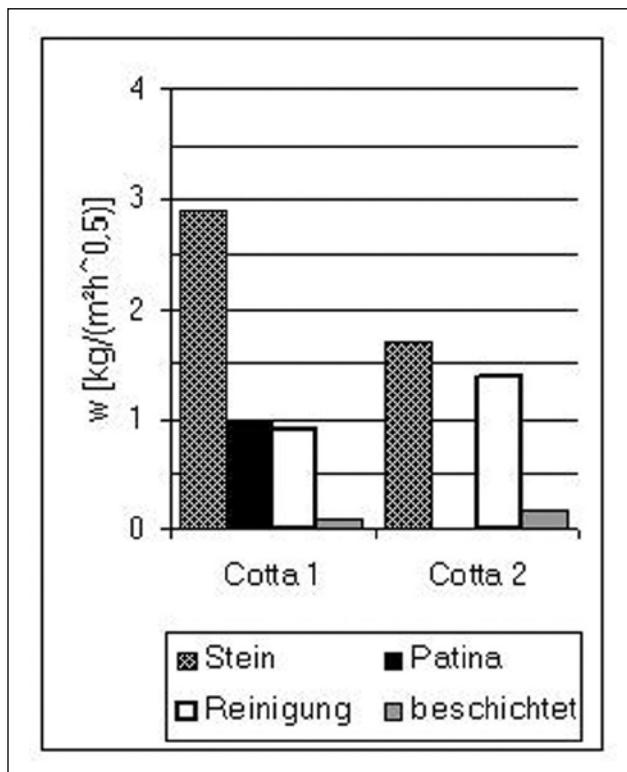


Abb. 9 Wasserabsorption durch Kapillarität von Elbsandsteinen (Varietät Cotta)

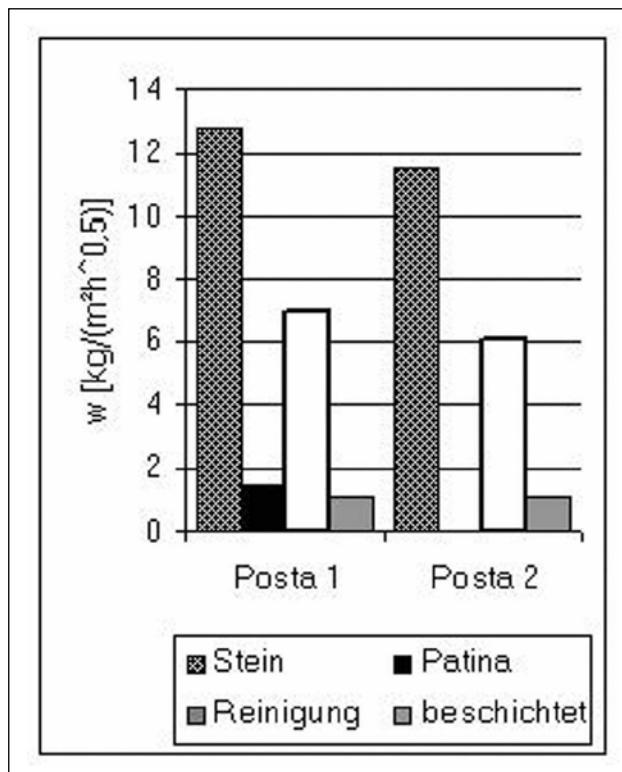


Abb. 10 Wasserabsorption durch Kapillarität von Elbsandsteinen (Varietät Posta)

Sechstel). Die Wasserdurchlässigkeit der Oberfläche ist damit immer noch als hoch zu bezeichnen. [9]

2.4.2 Wasserdampfdiffusion

Die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit auf die Wasserdampfdiffusion der untersuchten Elbsandstein-Varietäten wird durch die Betrachtung der s_d -Werte deutlich: Die Patina bewirkt bei der Varietät Cotta eine deutliche Abdichtung der Oberfläche ($s_d(P) = 10,0 \dots 11,4 \text{ cm}$). Dies entspricht in etwa einer Steinschicht von 0,7 cm Dicke. Bei der größeren Varietät Posta dagegen bewirkt die Patina nur eine

sehr geringfügige Abdichtung ($s_d(P) = 0,8 \dots 2,3 \text{ cm}$). Diesen Unterschied kann man möglicherweise auf die unterschiedliche Porengemometrie der beiden Varietäten zurückführen, wobei die Patina die feineren Poren der Varietät Cotta eher „verstopft“. Die Reinigung mittels Dampfstrahl führt bei der Varietät Cotta zu einer gewissen Verdichtung ($s_d(R) = 0,5 \dots 2,3 \text{ cm}$). Bei der Varietät Posta ist im Rahmen der Messgenauigkeit ($s_d = \pm 0,4 \text{ cm}$) keine Änderung feststellbar.

Die Siliconharzlasur erhöht den Diffusionswiderstand bei beiden Varietäten deutlich: Bei der Varietät Cotta um $s_d(B) \approx 27 \text{ cm}$; bei der Varietät Posta um

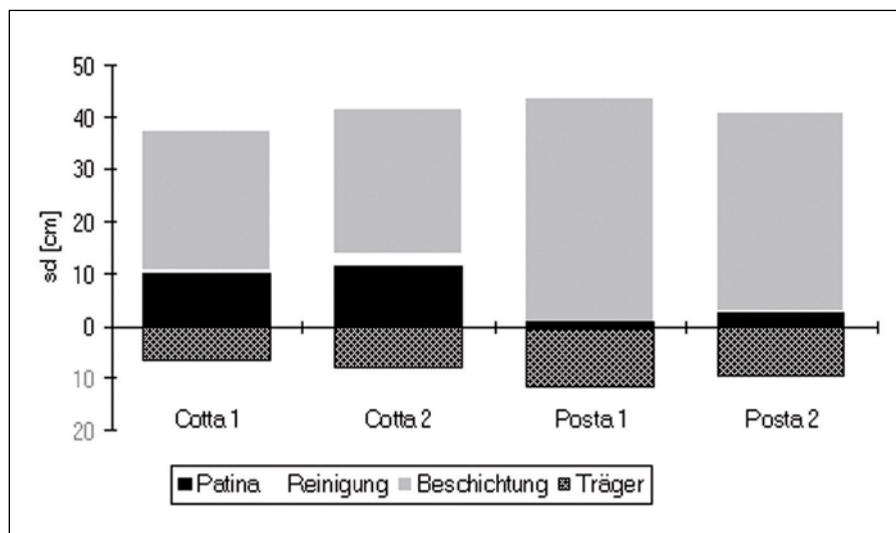


Abb. 11 Dampfdiffusion von Elbsandsteinen (= Träger) mit veränderten Oberflächen

$s_d(B) = 38 \dots 43\text{ cm}$. Diese erhöhten Werte können teilweise durch die größere Auftragsmenge infolge größerer Porosität erklärt werden. Die Dampfdurchlässigkeit der untersuchten Siliconharzlasur ist als mittel zu bewerten. [9]

3 Schlussfolgerungen

3.1 Methodik

Die herkömmliche Bestimmung der Wasserabsorption durch Kapillarität nach DIN EN 18501 [12] der Elbsandstein-Varietäten mit unterschiedlichen Oberflächen und Beschichtungen lassen ein differenziertes Bild erkennen. Die Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen s_d nach DIN EN 18503 [17] der unterschiedlichen Oberflächen und Beschichtungen mit anschließender Subtraktion erlauben den Vergleich und die Bewertung nicht nur der aufgebrachten Beschichtung, sondern auch von Verwitterungskrusten („Patina“) und deren Abreinigung. Es können deutliche Unterschiede zwischen den zwei untersuchten Sandstein-Varietäten sowohl in der Wasserabsorption als auch in der Dampfdiffusion deutlich gemacht werden, und zwar nicht nur für die untersuchte Beschichtung, sondern auch für die Verwitterungskruste („Patina“) und deren Abreinigung.

Die Verknüpfung dieser durch einfache Laborversuche zugänglichen Kenngrößen des Feuchtetransports nach der Künzel-Theorie erlauben die differenzierte Bewertung und dienen der Abschätzung des Feuchtehaushalts nach der Fassadentheorie. Auch hier werden die Unterschiede zwischen den untersuchten Gesteinen deutlich.

3.2 Feuchtehaushalt am Anwendungsbeispiel

Nach SNETHLAGE und PFANNER [21] sollte die Wasserabsorption durch Kapillarität nach der Beschichtung nicht steigen, sondern eher geringer werden. Dies wird an beiden untersuchten Elbsandsteinen nicht nur durch die Siliconharz-Lasur erreicht, sondern auch schon durch die Verwitterungskruste („Patina“), der man also eine schützenden Effekt im Sinne der Wasserabsorption zuschreiben kann. Der s_d -Wert eines Natursteins soll durch eine Beschichtung möglichst wenig steigen [21]. Die hier untersuchte Siliconharzlasur erhöht jedoch den Diffusionswiderstand bei beiden Elbsandstein-Varietäten deutlich. Dies entspricht einem Anstrich mit Dispersionsfarbe und liegt deutlich über den s_d -Werten moderner, hoch dampfdurchlässiger Anstriche. [18] Der gegenüber nicht modifizierten, handelsüblichen Siliconharzfarben deutlich erhöhte Diffusionswiderstand der hier untersuchten „Sili-

conharzlasur“ ist auf die Zumischung von farblosem Bindemittel zurückzuführen. Der gleiche Effekt wurde bei der Erprobung von Siliconharzanstrichen und „Siliconharz-Streichputzen“ auf verschiedenen Kalksteinvarietäten und auf Trachyt am Kölner Dom in den Jahren 1994–98 mittels Laboruntersuchungen gefunden. [28] Neben der wasserabweisenden Wirkung ($w < 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$) ergaben sich hier teils erhebliche Dampfdiffusionswiderstände bis zu $s_d = 190\text{ cm}$. Diese Beispiele zeigen die Gefahr, dass durch Veränderung der Rezeptur die Diffusionsoffenheit einer Siliconharzfarbe bedenklich herabgesetzt werden kann. Es sind grundsätzlich die Herstellerangaben zur Modifizierung einzuhalten und die sich tatsächlich einstellenden Feuchtetransporteigenschaften (w -, s_d -Werte) möglichst auf dem zu behandelnden Untergrund zu überprüfen.

In Hinblick auf den Feuchtehaushalt von Beschichtungen auf Naturstein werden in der Literatur die Grenzwerte für „wetterbeständige“ Beschichtungen nach DIN EN 1062-1 gefordert: [21, 30]

$$\begin{aligned}s_d &\leq 2\text{ m} \\ w &\leq 0,5\text{ kg}(\text{m}^2\sqrt{\text{h}}) \\ s_d \times w &\leq 0,1\text{ kg}/(\text{m}\sqrt{\text{h}}) (\text{„Künzel-Zahl“})\end{aligned}$$

Eine für den Feuchtehaushalt günstige Beschichtung hat die (schärferen) Grenzwerte $s_d \leq 0,14\text{ m}$ und $w \leq 0,1\text{ kg}(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$, ist also hoch dampfdurchlässig und gering wasserdurchlässig. [31]

Für den Vergleich von beschichtetem mit unbeschichtetem Naturstein schlagen SNETHLAGE und PFANNER den s_d -Wert des Gesteins vor, der sich aus der Schichtdicke der „von kurzfristigen Feuchteschwankungen erfassten Oberflächenzone“ ergibt. [21] Das dieser mit steigendem w -Wert steigt, ergibt sich daraus das Paradoxon, dass eine höhere Wasserabsorption (w -Wert) des Gesteins auch einen höheren Diffusionswiderstand der Beschichtung erlaubt. Dies steht im Widerspruch zu einem ausgeglichenen Feuchtehaushalt. Es erscheint daher nicht sinnvoll, die rechnerisch ermittelten Künzel-Zahlen für den nicht beschichteten Natureinuntergrund anzugeben. Hier sollen lediglich die verwitterten und behandelten Sandstein-Oberflächen anhand der experimentell ermittelten Kennwerte des Feuchtetransports bewertet werden. Da die Kennwerte an verschiedenen Prüfkörpern gemessen wurden, werden nun die Mittelwerte der jeweiligen Kennwerte zur Auswertung herangezogen (Tab. 1).

Grundsätzlich ist festzustellen, dass alle gealterten („patinierten“), unbeschichteten Oberflächen beider Sandsteine sowie die beschichtete Varietät

Tab. 1 Mittelwerte der Transportkennwerte nach Behandlung der Steinoberflächen und daraus berechnete „Künzel-Zahlen“

Gestein	Oberfläche Oberfläche	w [kg/(m ² ·h)]	s _d [cm]	s _d · w [kg/(m ² ·h)]
Cotta	frisch	2.30	-	-
Cotta	Patina	1.00	10.7	0.107
Cotta	Reinigung	1.15	1.2	0.0137
Cotta	Beschichtung	0.14	27.3	0.0369
Posta	frisch	12.5	-	-
Posta	Patina	1.50	1.6	0.0232
Posta	Reinigung	5.95	0.07	0.0039
Posta	Beschichtung	1.09	40.2	0.447

Posta die geforderte Grenze der Wasserabsorption von $w < 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ überschreiten. Die untersuchte Siliconharz-Lasur erreicht für dieses Gestein mit $s_d \cdot w = 0,45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ nicht den geforderten Feuchteschutz nach Künzel, was auf dessen hohe Saugfähigkeit in Verbindung mit dem deutlichen s_d -Wert der Beschichtung zurück geführt werden kann und sich in der zu hohen Künzel-Zahl äußert. Bei der Sandstein-Varietät Cotta wird ein ähnlich hoher s_d -Wert durch die geringere Wasserabsorption kompensiert und der Wert $s_d \cdot w = 0,04 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ist noch unkritisch. Dennoch kann man der Siliconharz-Lasur eine schützende Wirkung aufgrund der stark erniedrigten Wasserabsorption von beiden beschichteten Sandstein-Varietäten zubilligen.

Aufgrund der sehr geringen s_d -Werte ist der Einfluss von Patina und Reinigung auf den Feuchthaushalt der Varietät Posta verschwindend. Bei der Varietät Cotta zeigt jedoch der deutliche s_d -Wert der Patina gegenüber der frischen Steinoberfläche eine gewisse Verdichtung, die im Verein mit der geringen Wasserabsorption jedoch noch unkritisch erscheint ($s_d \cdot w = 0,11 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).

Danksagung

Herrn Dipl.-Rest. (FH) Frank Hoferick wird für die Bereitstellung des Probenmaterials und die begleitende restauratorische Behandlung der Prüfkörper gedankt.

Literatur

- [1] Künzel, H.: Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an Außenputzen. Zement Kalk Gips 17:6 (1964), S. 237–251.
- [2] Künzel, H.: Mechanismen der Steinschädigung bei Krustenbildung. Bautenschutz Bausanierung 11 (1988), S. 61–68.
- [3] Bagda, E.: Neues zur Bestimmung des Feuchthaushalts von Beschichtungen. Bautenschutz Bausanierung 13, 1990, [26–30].
- [4] Einführungsbeitrag zu DIN 4108-3:2014-11 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. <http://www.nabau.din.de/cmd?artid=222022641&bcrumblevel=1&contextid=nabau&subcommitteeid=54750300&level=tpl-art-detailansicht&committeeid=54738847&languageid=de> (Zugriff: 02.01.2015).
- [5] DIN EN ISO 13788:2013-05 (D) Wärme- und feuchtephysikalisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnenraum – Berechnungsverfahren.
- [6] EN 15026:2007-04 (D) Wärme- und feuchtephysikalisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [7] www.wufi.de (Zugriff: 02.01.2015).
- [8] Anonym: Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit von Beschichtungen. farbe + lack 97:6 (1991), S. 481–484.
- [9] DIN EN 1062-3:2008-04 (D) Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich – Teil 3: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.

- [10] Brandes, C.; Stadlbauer, E.: Capillary water absorption of painted stone. In: Delgado Rodrigues, J. et al. (Hrsg.): Proceedings 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Portugal, 15–18 June 1992, Lisboa 1992, S. 591–600.
- [11] Herm, C.; Warscheid, T.: Freibewitterung von Anstrichen auf Gotlandsandstein – Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Mikrobiologie. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung 3 (1993), Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1995, S. 159–173.
- [12] DIN EN 15801:2010-04 (D) Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Bestimmung der Wasserabsorption durch Kapillarität.
- [13] Bagda, E.: Zum Feuchtehaushalt von Beschichtungen Teil 4 – Wechselwirkung mit flüssigem Wasser. farbe + lack 95 (1989), S. 176–178.
- [14] Wendler, E.: Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte, Bautenschutz Bausanierung 12 (1989), S. 110–115.
- [15] Lehmann, M.: Langfristige Schädigung von Wandmalerei durch die Wirkung eingebrachter Kunststoffe – Am Beispiel der Gewölbemalereien in der Krypta der Quedlinburger Stiftskirche St. Servatius. Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 18 (2004), S. 71–92
- [16] Herm, C.: Anstriche auf Naturstein – Untersuchungen zur Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarbe und Bauphysik. Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München, 1997.
- [17] DIN EN 15803:2010-04 (D) Erhaltung des kulturellen Erbes – Prüfverfahren – Bestimmung des Wasserdampfleitkoeffizienten (δ_p).
- [18] Herm, C.: Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Anstrichen auf Naturstein. In: Snethlage, R. (Hrsg.): Jahresbericht aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall – Steinkonservierung 2 (1990), Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1992, S. 169–177.
- [19] Brandes, C.: Natursteinkonservierung durch Beschichtung. Dissertation Universität Hannover, 1995.
- [20] Bagda, E.: Der Feuchtehaushalt von Fassadenbeschichtungen. farbe + lack 87 (1981), S. 8–12.
- [21] Snethlage, R.; Pfanner, M.: Leitfaden Steinkonservierung (4. Aufl.). Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2013, S. 165–168.
- [22] Bagda, E.: Zur Wasserdampfdiffusion in Be- schichtungsstoffen. farbe + lack 92:4 (1986), S. 276–279.
- [23] WTA Merkblatt 2-12:2013/D Fassadenanstriche für mineralische Untergründe in der Bauwerkserhaltung und Baudenkmalpflege.
- [24] Wendler, E.: Entwicklung und Eigenschaften moderner silikatgebundener Systeme. In: Boué, A. (Hrsg.), Farbe in der Steinrestaurierung – Fassung und Schutz. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2000, S. 41–48.
- [25] Plehwe-Leisen, E.: Schutz des Chorstrebewerkes am Dom zu Köln durch Siliconharzanstrich – Untersuchungen und erste Erfahrungen. In: Boué, A. (Hrsg.): Farbe in der Steinrestaurierung – Fassung und Schutz. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag (2000), S. 163–169.
- [26] Kiesewetter, A.: Zur Reinigung „patinierter“ Fassaden aus Elbsandstein, in: Siedel, H. et al. (Hrsg.): Elbsandstein – Beiträge zur Tagung des Arbeitskreises zur Erhaltung von Kulturgütern aus Stein (ARKUS), Dresden 14./15.06.2007, Dresden, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e. V., 2007, S. 121–128.
- [27] Rezeptur und Herstellung: Dr. Christoph Hellbrügge (Lüdinghausen), Schreiben vom 27.12.1993.
- [28] von Plehwe-Leisen, E.; Leisen, H.: Die Erhaltung des Chorstrebewerks am Dom zu Köln. In: Donath, G.: Siliconharzschlämmen als Oberflächenschutz für Sandstein am Beispiel der St. Bennokirche in Meißen, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2005, S. 54–59.
- [29] DIN EN 1062-1:2004-08 (D) Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Substrate und Beton im Außenbereich – Teil 1: Einteilung.
- [30] Brandes, C.: Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein – Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendung. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1999.
- [31] Künzel, H.: Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunsthärzdispersionen. Kunststoffe im Bau Themenheft 12, Heidelberg, Verlag Straßenbau Chemie und Technik, 1968.

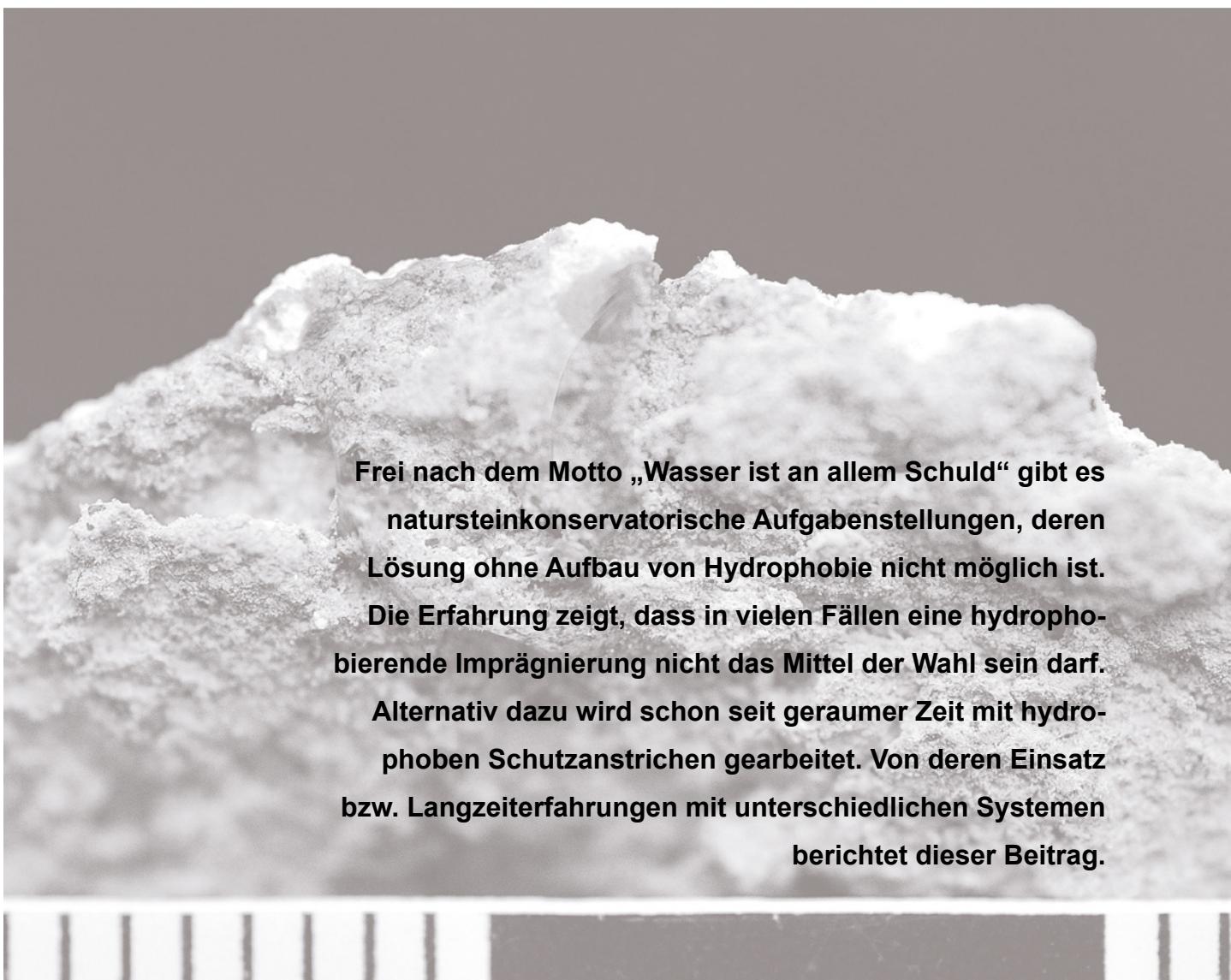
Abbildungen

Alle Abbildungen stammen vom Verfasser.

Hydrophobie an Natursteinoberflächen – Fluch oder Segen?

**Praxiserfahrungen mit hydrophoben Farbsystemen
auf verwitterungsanfälligen Natursteinvarietäten**

von Georg Hilbert



Frei nach dem Motto „Wasser ist an allem Schuld“ gibt es natursteinkonservatorische Aufgabenstellungen, deren Lösung ohne Aufbau von Hydrophobie nicht möglich ist. Die Erfahrung zeigt, dass in vielen Fällen eine hydrophobierende Imprägnierung nicht das Mittel der Wahl sein darf. Alternativ dazu wird schon seit geraumer Zeit mit hydrophoben Schutzanstrichen gearbeitet. Von deren Einsatz bzw. Langzeiterfahrungen mit unterschiedlichen Systemen berichtet dieser Beitrag.

1 Einleitung

Da seit Jahren eine sehr emotionale Diskussion um die Hydrophobierung geführt wird, hier einige technische Aspekte zu: Wasser ist an allem Schuld, oder löst Hydrophobierung alle wesentlichen Probleme der Natursteinkonservierung?

Zwischen diesen beiden polarisierenden, schwarz-weiß malenden Haltungen wurde/wird manch Objekt in der Vergangenheit und heute „zerrissen“, d.h. die Findung eines objektiv ermittelten Restaurierungs-/Konservierungskonzeptes wurde/wird einem Gläubersstandpunkt geopfert.

Seit dem Erscheinen des WTA-Merkblattes „Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen (2010)“ [1] liegt für diejenigen, die eine planerische Aufgabe zu lösen haben, ein Werkzeug vor, mit dessen Hilfe man sich der Materie auf rein rationaler Ebene nähern kann. Darüber hinaus ist nichts so wertvoll, wie Langzeiterfahrung mit gut dokumentierten Lösungsansätzen. In diesem Bereich soll diese Arbeit, neben der Zusammenfassung bekannter Fakten, für einen bekanntermaßen sehr witterungsanfälligen Untergrund, den rheinischen Tuff, einen Beitrag leisten.

2 Wasser ist an allem Schuld – ist das wirklich so?

Kurz geantwortet: In diesem pauschalen Satz, geprägt in den „wilden“ 70er Jahren der Steinkonservierung, in dem nahezu jede konservierende Maßnahme mit einer hydrophobierenden Imprägnierung abgeschlossen wurde, steckt sehr viel Wahrheit. Die wesentlichen Schadensmechanismen für Naturstein in unseren Breiten sind

- Frostauswirkungen (z.B. primäre Schadensquelle des kretazischen Soester Grünsandsteins des südlichen Münsterländer Beckens oder des Roggensteins [oolithischer Kalkstein des Unt. Buntsandsteins] aus dem südlichen Sachsen-Anhalt; bei beiden Natursteintypen ist ein hoher Anteil an Feinporen die Ursache für die ausgeprägte Frostempfindlichkeit) und
- hygrisches Quellen (z.B. primäre Schadensquelle bei den unterschiedlichen Typen des süddeutschen Schilfsandsteins aus dem mittleren Keuper; der hohe Anteil quellfähiger Tonminerale ist die Ursache für den rissbildenden Quellvorgang). Beide resultieren direkt aus der Auswirkung von Wasser.
- Und auch die dritte Hauptschadensursache für die Verwitterung der uns umgebenden Natursteine und anderen mineralischen Baustoffe, die Auswirkung von Salzkristallisation, würde ohne die

Anwesenheit von Wasser (in diesem Fall reicht Luftfeuchte aus) keine Schäden hervorrufen können. Nur die Temperaturverwitterung, der auch der ansonsten extrem witterungsresistente Granit nicht gewachsen ist (typische Verwitterungsform ist die Wollsackverwitterung), kommt ohne Wasser aus. Allerdings sind die für diesen Verwitterungstypus notwendigen Temperaturunterschiede so hoch, dass dieser Mechanismus überwiegend auf aride Klimazonen beschränkt ist.

Auch beim Rheinischen Tuff, der als witterungsanfälliges Substrat einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, spielt bei dessen Verwitterung die Anwesenheit von Wasser eine wesentliche Rolle. Bei aller Varianz, die der Tuff in seiner Zusammensetzung aufweist, können folgende feuchtetechnischen Kennwerte zusammenfassend genannt werden:

1. Der Tuff zeigt eine sehr hohe Porosität von ca. 35 Vol.-% (Ettringer Tuff) bis 40 Vol.-% (Weiberner Tuff).
2. Die Wasseraufnahme von > 20 M.-%, vor allem aber die Wasseraufnahmegergeschwindigkeit ist mit einem w-Wert von > 20 kg/m²/t an der oberen Grenze der für diesen Kennwert bei Naturstein bekannten Größen. Praktische Konsequenz dieser Tatsache ist, dass bei Schlagregenbelastung Wasser sehr schnell bis in große Tiefen des Werksteins eindringt.
3. Ein hoher Anteil der der Zeolithfamilie zugehörigen Mineralien und magmatische Gläser in der feinkörnigen Matrix der Tuffe, die als Charakteristikum eine sehr hohe spezifisch innere Oberfläche aufweisen, bewirken eine sehr lange Verweildauer für die einmal in das Gestein eingedrungene Feuchtigkeit.
4. Darüber hinaus bewirkt die Anwesenheit quellfähiger Tonminerale schadensrelevante Quellmaße bei Feuchtezutritt.

Vordergründig spricht also viel dafür, diese Phänomene mit Hilfe einer Hydrophobierung in ihrem Umfang einzudämmen. Dies wurde auch an etlichen Objekten vielerorts durchgeführt, unter anderem am Charlottenburger Tor in Berlin. Der Begriff der Hydrophobierung wurde klassischerweise mit einer hydrophobierenden Imprägnierung gleichgesetzt. D.h. wir sprechen bei einer Vielzahl, der wie beispielhaft am Charlottenburger Tor durchgeföhrten Maßnahmen von einem Fluten (imprägnare lat. = durchtränken) des Werkstückes/Fassade mit einer hydrophob wirkenden, farblosen Flüssigkeit.

Dieser Konzeptansatz hat an vielen Objekten nach entsprechender Standzeit zu Schalenbildung



Abb. 1 Schalenbildung in großem Maßstab, ausgelöst durch Eintrag einer hydrophoben Imprägnierung am Beispiel des Charlottenburger Tors Berlin (siehe REISSIG 2008 [2])

der Oberfläche und damit zu unbefriedigenden bis ungenügenden Ergebnissen geführt (Abb. 1). Es stellt sich die Frage nach den Gründen, insbesondere aber nach den Alternativen, die an Stelle einer hydrophobierenden Imprägnierung zur Verfügung stehen.

3 Grenzen der Anwendbarkeit einer hydrophobierenden Imprägnierung

Das Themenfeld für die Gründe des Versagens der hydrophobierenden Imprägnierung ist sehr komplex. Aus eigenen Erfahrungen und der Literatur (hier sei insbesondere auf die Arbeiten von REISSIG 2008 [2] hingewiesen) seien folgende Punkte genannt.

1. Struktur der Oberfläche: Hydrophobierende Imprägnierungen sind in der Lage, Rissbreiten von bis zu 0,3 mm gegen eindringendes Wasser zu überbrücken. Sind die Fehlstellen der Oberfläche größer besteht deutliche Gefahr der Hinterfeuchtung der hydrophoben Oberfläche. Tuffe, aber natürlich auch andere Natursteintypen, weisen häufig deutlich größere „Öffnungen“ an ihrer Werksteinoberfläche auf (Abb. 2), daraus leitet sich eine deutliche Gefahr der Feuchtehinterwanderung ab.
2. Geringe Eindringtiefe des Imprägnates: aus SNETHLAGE 2008 [3] leitet sich für den hohen w-Wert des Tuffes eine Mindesteindringtiefe eines hydrophob wirkenden Imprägnates von ≥ 6 cm ab. Dieser zur Vermeidung von Hinterfeuchtung notwendige Wert wird an vielen Objekten nicht näherungsweise erreicht (siehe REISSIG 2008 [2]).
3. Schadensquelle wird vergrößert: Eva Möhlenkamp zeigte Anfang der 90er Jahre im Rahmen einer Facharbeit an der FH Köln, dass das hygrische Quellen einiger Varietäten des Rheinischen Tuffs nach Eintrag einer hydrophobierenden Imprägnierung in ihren Quellwerten ansteigen können. Die



Abb. 2 Mögliche Struktur einer Tuffoberfläche. „Öffnungen“ $> 0,3$ mm, die nicht von einer hydrophoben Imprägnierung überbrückt werden können, sind häufig zu beobachten.

Maßnahme kann somit direkt eine contra produktive Auswirkung aufweisen.

4 Die Entwicklungsgeschichte hin zu einer Alternative

Für Aufgabenstellungen wie diese wird im Bereich der Natursteinkonservierung schon seit geraumer Zeit mit der Möglichkeit gearbeitet, anstelle der in den Untergrund eindringenden Form der Hydrophobierung eine rein oberflächlich wirkende Variante der gewünschten Wasserabweisung einzusetzen. Dem Autor sind hierzu Objekte aus dem ebenfalls witterungsanfälligen und gleichfalls imprägnationsensiblen Baumberger Sandstein des Münsterlands aus den 80ern bekannt. Zusammen mit Herrn Leuschner als ehemaligem Hüttenmeister der Freiburger Münsterbauhütte wurden in der Mitte der 90er Jahre Musterflächen auf der Nordseite des Freiburger Münsters angelegt. Ebenfalls sehr intensiv bemustert und diskutiert wurde mit der Zwingerbauhütte in Dresden und dem verantwortlichen Amtsrestaurator A. Kiesewetter. Hier war es der Restaurierungsansatz für ca. 150 Vasen und Putten der Balustrade des Dresdner Zwingers, um den vor Beginn der Arbeiten ca. 15 Jahre gerungen wurde. In all diesen Fällen war das zur Umsetzung des Konzeptansatzes anfänglich eingesetzte Material ein handelsüblicher, d.h. TiO_2 -haltiger und damit hoch deckender Anstrich auf Siliconharzbasis. Um dessen dominantes optisches Erscheinungsbild etwas in den Hintergrund zu drängen, wurde in der Regel „verdünnnt“, in den für das Objekt positiven Fällen mit Wasser, in anderen Fällen auch mit dem Bindemittel der Farbe, was unweigerlich eine deutliche Verschlechterung der feuchtetechnischen Eigenschaften (deutliche Erhöhung des Dampfdiffusionswiderstandes) mit sich brachte. Ein Meilenstein auf diesem Weg stellte



Abb. 3 TiO₂-freie Variante eines verschlämmbenden Anstrichs auf Siliconharzbasis, angewandt 1998 am Kölner Dom
(Foto von den Arbeiten im Jahr 1998)



Abb. 4 Grobporöse Oberfläche eines Muschelkalkes, die aufgrund ihrer Struktur für eine Hydrophobierung mittels Imprägnierung völlig ungeeignet ist.

die Entwicklung eines TiO₂-freien Anstrichsystems Ende der 90er Jahre für Aufgaben am Kölner Dom dar (Abb. 3). Auch hier war wieder ein Untergrund, der einerseits aufgrund seiner Materialcharakteristik am Standort ungenügende Haltbarkeit wegen Wassereinwirkung aufwies (Muschelkalk), andererseits aufgrund seiner Oberflächenstruktur (Abb. 4) sich in langjährigen Bemusterungen die Anwendung einer hydrophobierenden Imprägnierung ebenfalls als kontraproduktiv herausgestellt hatte.

Objektbeispiel St. Stephanus/Meerbusch

Auf diese Entwicklung aufmerksam geworden, beschloss das Bauamt der Diözese Aachen, Herr Scholz, Anfang der 2000er Jahre, für einen romanischen Kirchturm in Meerbusch diesen Konzeptansatz aufzugreifen, um die noch vorhandene Originalsubstanz, bestehend aus Ettringer Tuff, so gut als möglich vor der weiteren Verwitterung zu schützen. Das seinerzeit ausgeführte Konzept beinhaltete aufgrund der damals vorliegenden Erfahrungen folgende Elemente:

1. Materialbasis des Anstrichsystems: Siliconharzsystem TiO₂-frei
2. Schichtdicke des Systems/Lasurgrad: zu Gunsten eines möglichst intensiven Durchscheinens des Untergrundes Reduktion der Trockenschichtdicke auf < 150 µm.

3. Lage der hydrophoben Zone: auf der Oberfläche; d.h. es wurde bewusst auf den Einsatz einer hydrophoben Grundierung verzichtet, um bei eventuell auftretender Belastung des Anstrichsystems dieses ohne Substratverlust als Opferschicht zu verlieren. Damit wurde auf die Erfahrungen/Diskussionsergebnisse am Zwinger in Dresden zurückgegriffen. Mit dieser Entscheidung wird im Zweifelsfall eine geringere Haltbarkeit des Anstrichsystems bei gleichzeitiger Reduzierung der Gefahr eines ungewollten Verlustes an Originaloberfläche in Kauf genommen.

Das optische Ergebnis dieser Arbeit nach ca. 14 Jahren Standzeit wird in Abbildung 5 und 6 gezeigt.

Würde man die Betrachtung an dieser Stelle beenden, hätte dies eine ausnahmslos positive Bewertung des Zustandes zur Folge. Im Rahmen einer klein-dimensionierten Pflegemaßnahme wären die kleineräumig aufgetretenen Fehlstellen zu schließen, um das Objekt mit einem geringen Kostenaufwand wieder in einen sehr guten Zustand zu versetzen.

Ein Wechsel der Betrachtung auf die westwärts expo-nierte Fassade zeigt allerdings ein signifikant anderes Bild, das untergliedert nach Schadensursachen wie folgt dokumentiert werden kann:

1. Aufplatzen des Anstrichsystems über quellfähige Einzelkomponenten des Tuffs: Tuff als pyroklastisches Sediment kann in nicht unerheblichen Mengen Einschlüsse aus der Schlotumgebung aufweisen. Diese können im Falle des rheinischen Tuffe paläozoische Schiefer sein, die wiederum quellfähige Eigenschaften aufweisen können. Ein typisches Ergebnis dieses Sachverhaltes zeigt Abbildung 7.



Abb. 5 Dokumentiert wird das Ergebnis der Kombination aus TiO₂-freier Materialqualität der Siliconharzfarbe und geringer Trockenschichtdicke des verschlämmenden Anstrichsystems.

2. Bauwerksbedingte Bewegungen haben nach 14 Jahren Standzeit zu Rissen geführt, die aufgrund ihrer Rissbreite einen Wassereintrag in den sehr saugfähigen Untergrund durch die ansonsten wasserabweisende Fassadenoberfläche möglich macht.
3. Für das Objekt war schon aus dem Jahre 2000 eine praxisrelevante Schadsalzbelastung bekannt. Die Menge und Art dieser Belastung führt lokal zu einer Situation, in der der Umfang des Schadenspotentials den Grad der Inaktivierung durch Auftrag des wasserabweisenden Anstrichs übersteigt; Ergebnis ist ein beginnender Prozess des Abdrückens des Anstrichs aufgrund der vorherrschenden Salzkristallisationsdrücke.
4. Das Zusammenspiel der Punkte 1–3 und der sich daraus ergebende Anstieg in Menge und Fläche saugfähiger „Fenster“ in der ansonsten wasserabweisenden Fassade führt zu einer sich exponentiell entwickelnden Gesamtdynamik des Schadensprozesses (Abb. 8).

Was nun bedeuteten diese Beobachtungen für den weiteren Werdegang an dem diskutierten Objekt – zwei wesentliche Punkte können genannt werden:

1. Für die Westfassade ist aufgrund einer zu langen Zeitspanne seit der ursprünglichen Maßnahme eine umfangreichere Instandsetzung notwendig.
2. Diese Maßnahme muss durch eine qualifizierte (Fach)planung vorbereitet werden, um die
 - insgesamt einzusetzenden Finanzmittel möglichst effektiv zu nutzen und
 - ein adäquates optisches Ergebnis zu erzielen.

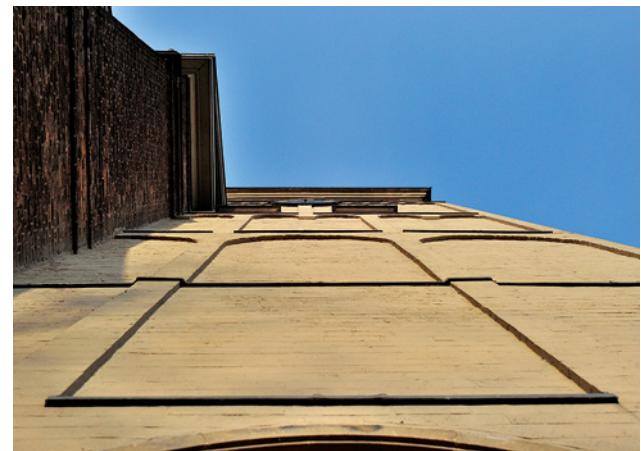


Abb. 6 Zustand des Anstrichsystems auf der Ostfassade von St. Stephanus im Gesamteinindruck; dieser stellt sich trotz punktueller Fehlstellen als überwiegend positiv dar.



Abb. 7 Abplatzzen des Anstrichsystems oberhalb einer paläozoischen, schiefrigen Komponente in dem Substrat Tuff



Abb. 8 Das Gesamtbild der besonders stark geschädigten erhöhten Sockelzone der Westfassade – der Schädigungsgrad der Westfassade ist signifikant höher als in der Ostfassade.

5 Objektuntersuchungen

5.1 Die Planung planen – das Schadensglossar

Die Objektverantwortlichen hätten an dieser Stelle das weitere Prozedere in die Hände eines Ausführenden geben können. Da hier eine komplizierte Planung erforderlich war, hat das Bauamt der Diözese Aachen die Planung zusätzlich in die Hand des Verfassers gelegt. (Einsparungen wären hier problematisch gewesen). Vor dem Hintergrund wurde zu diesem Zeitpunkt ein Schadensglossar in Auftrag gegeben. Im Rahmen dieses grundlegenden Planungsschrittes wurden folgende Inhalte erarbeitet (siehe auch HILBERT 2014 [4]):

1. Erfassen aller praxisrelevanter Schäden
2. Einteilung/Zusammenfassung in praxisrelevante Einheiten
3. Definierung möglicher Ausführungsvarianten
4. Definierung offener Fragestellungen/Planungsaufgaben
5. Definierung eines Untersuchungspaketes (Bauzustandsanalyse)

Aus diesem, im Rahmen einer umfangreichen Belehrung umgesetzten Arbeitspaket ergaben sich folgende typische Fragestellungen, die nicht ohne Durchführung einer hier zielgerichteten Bauzustandsanalytik hätten beantwortet werden können:

1. Schadsalzbelastung: Wieviel liegt von welchem Salz in welcher Tiefenverteilung vor? Mit diesem Untersuchungspaket wurde indirekt die Frage nach der Erfolgsschance einer Kompressenentsalzung beantwortet.
2. Festigkeitsprofil: Welchen Schädigungsgrad weisen die geschädigten (d. h. aufgelockerten) Natursteinoberflächen auf? Mit der Beantwortung dieser mittels Bohrhärte beantworteten Fragestellung in Kombination mit eigenen Erfahrungen in der Fes-

tigung/Konsolidierung rheinischer Tuffe wurde die Frage nach einem, den Untergrund stabilisierenden Festigersystem auf KSE-Basis beantwortet.

Die Ergebnisse aus diesen Untersuchungen stehen jetzt zur Erarbeitung eines fundierten Leistungsverzeichnisses zur Verfügung.

5.2 Beobachtungen zum Witterungsverhalten

Der grundsätzliche Konzeptansatz wurde bei beobachtetem Objektverhalten in keiner Weise in Frage gestellt. Allerdings wurden aus dem Verwitterungsbild folgende grundlegende Erkenntnisse für die Zukunft abgeleitet:

1. Der Lasurgrad des Erstanstrichs von vor 14 Jahren war in seiner Schichtdicke extrem ausgedünnt worden, um ein möglichst „lebendiges“ Erscheinungsbild zu erzielen (Abb. 5). Dieses extreme Ausdünnen führte in der bisherigen Standzeit auf der stärker belasteten Westseite zu einem vorzeitigen Versagen des wasserabweisenden Schutzanstriches.
2. Insbesondere die besonders belasteten Bereiche der Fassade wie z.B. die Flächen oberhalb von Gesimsen oder Gebäudecken zeigen eine nochmals verstärkte Belastung, so dass planerisch auch dieser Sachverhalt mit zu berücksichtigen ist.
3. Dem gewünschten Ergebnis entspricht der vor 14 Jahren ausgeführte Konzeptansatz, das Anstrichsystem ohne eine zuvor eingebrachte hydrophobe Grundierung zur Anwendung zu bringen. An keiner Stelle konnte abgängiger Anstrich mit anhängendem Substrat beobachtet werden.

5.3 ... wir Konservieren mit Farbe

Während die bisher aufgezeigte Arbeitsmethodik eigentlich auf jeder „Natursteinbaustelle“ Standard sein

sollte, lag die eigentlich technische Herausforderung in der Vorbereitung der technischen wie auch optischen Gestaltung des neu aufzubringenden Anstrichsystems unter Einbezug der in 5.2 dokumentierten Erfahrungen. Um auf die gemachten Erfahrungen zu reagieren wurde beschlossen, das System insgesamt dickschichtiger, d. h. mit reduziertem Lasurgrad aufzutragen. Diese Entscheidung war deckungsgleich mit der anwendungstechnischen Forderung, die gewünschte Lebendigkeit durch die Farbgebung selber zu erzielen. Einziger Weg, um hier zu einem Ergebnis zu kommen, war das „Probieren“ im Rahmen von Musterflächen.

Aus den gemachten Erfahrungen sollen folgende Punkte an dieser Stelle weitergegeben werden:

1. Für Wiederholungsanstriche sind „alte“ Farbnummern quasi wertlos, da sich jeder Anstrich über den Verlauf der Bewitterung soweit verändert, das eine aktuelle Farbabnahme zwingend ist.
2. Es ist bei qualitativ noch so hochwertiger Farbabnahme immer ein a) Nachmischen vor Ort wie auch b) ein Arbeiten mit unterschiedlichen Farbtönen in Lasurtechnologie notwendig, um einen gewünschten Eindruck, der sich immer
3. aus Farbigkeit des Untergrundes und dem Zusammenspiel leicht nuancierter Farbtonvarianten zwischen Grund- und Endanstrich ergibt, zu erzielen.

6 ... es ging auch anders

In den Anfängen (1990) der Oberflächenschutzsysteme auf witterungsempfindlichen Untergründen war in der Nachbargemeinde des bislang betrachteten Objektes ebenfalls ein Schutzanstrich aufgetragen worden. Hier nach dem Motto „... wenn Denkmalpflege Glaube ist ... dann sind mineralische Anstriche das Manna“ auf der Bindemittelbasis Kaliwasserglas (Dispersionssilikatfarbe). Während der Gesamteindruck hier aus der Ferne ebenfalls ein noch sehr guter war, ergaben die Arbeiten zum Schadenglossar folgendes differenziertere Bild:

1. Der Gesamteindruck erscheint aufgrund TiO₂-haltigem Anstrich und einer hohen Schichtdicke deutlich „zugeteigt“.
2. Während eine Wasserabweisung auf der Oberfläche nicht mehr nachweisbar war (Benetzungs- test) konnte im Falle intakter Oberflächen eine nach wie vor sehr gute Wasserabweisung nachgewiesen werden – kleinste Fehlstellen allerdings machen das Eindringen von flüssigem Wasser in Größenordnungen möglich.
3. Es ist jetzt der Zeitpunkt gekommen, wo von solch wasserführenden Fehlstellen ausgehend ein ex-



Abb. 9 Musterflächen zum Austesten unterschiedlicher Systemaufbauten



Abb. 10 Abgängiger Dispersionssilikatanstrich nach 24 Jahren Standzeit. Auffallend die Schalenbildung unterhalb des Anstrichs



Abb. 11 Hydrophober Charakter (erkennbar an der Tropfenbildung des applizierten Wassers) der, an den Anstrich anbindenden Lage des Originalsubstrats

- ponentiell fortschreitendes Abdrücken des Anstriches zu verzeichnen ist.
4. Im Gegensatz zu Meerbusch ist hier im Ablösungsprozess großflächig auch die erste Lage der Originalsubstanz mit betroffen (Abb. 10).
 5. Diese erste Lage des Untergrundes ist eindeutig hydrophob (Abb. 11); D. h. man hat seinerzeit vor Auftrag des Anstrichs mit einer hydrophob wirkenden Grundierung gearbeitet, deren Negativauswirkung sich heute deutlich abzeichnet.

7 Zusammenfassung und Fazit

„Hydrophobie – Fluch oder Segen“ – so ist der provokante Titel des Aufsatzes. In diesem Kapitel werden abschließend einige Fakten zusammengefasst, die dem Leser erlauben, sich seine eigene Meinung zu bilden:

1. Wasser/Feuchtigkeit spielt in unseren Breiten bei der Zerstörung der uns umgebenden Baustoffe eine wesentliche Rolle.
2. Die verschiedenen Werkzeuge der Hydrophobie bieten grundsätzlich eine Möglichkeit Wassereintrag in den Untergrund nachhaltig und dauerhaft zu minimieren.
3. Durch Hydrophobie wird nicht nur der Eintrag an flüssigem Wasser, sondern auch das Trocknungsverhalten des Baustoffes und Baukörpers nachhaltig verändert, respektive verlangsamt. Dieser Fakt muss bewusst in die Planung mit einbezogen werden – ansonsten kann es mittel- bis langfristig zu deutlichen Schäden kommen.
4. Die hydrophobierende Imprägnierung als unsichtbare „Wunderwaffe“ ist in Bezug auf einen erfolgreichen Einsatz, was die notwendigen Randbedingungen anbelangt, sehr sensibel (siehe auch HILBERT 2011 [5]). Da diese Randbedingungen häufig bauseits nicht einzuhalten sind, ist ein erfolgreicher Einsatz dieses „Medikaments“ in viel weniger Fällen möglich, als es dem Markt suggeriert wird.
5. Die Anwendung einer hydrophobierenden Imprägnierung ist konträr zu den Forderungen der Charta von Venedig definitiv irreversibel und – „macht süchtig“. Das heißt, ist dieser Weg einmal eingeschlagen, ist er bis zum bitteren Ende weiterzugehen, es sei denn, man nimmt massive Materialverluste in Kauf.
6. Für die Aufgabenstellungen (im natursteinkonservatorischen Bereich), für die eine deutliche Minimierung des Wassereintrags unerlässlich ist (was genau zu überlegen ist!), ist der Auftrag eines wasserabweisenden Oberflächenschutzsystems (Anstrich, anstrichartige Schlämme) ein gangbarer Weg, für den heute hinreichend positive Erfahrungen vorliegen (siehe auch REISSIG 2008 [2] und HILBERT 2010 [6]).
7. Um Schäden am Original/Substrat auch in ungünstige Situationen zu vermeiden, sollte solch ein Schutzanstrich, entgegen Herstellerempfehlung ohne hydrophobierende Grundierung eingesetzt werden.
8. Ein deutliches Ausdünnen der Schichtdicke, um den Anstrich möglichst „unsichtbar“ zu machen,

läuft signifikant gegen die Haltbarkeit des Schutzanstrichs.

9. Die Forderung nach dem Aufstellen und Durchführen eines Monitoringprozesses, schriftlich im neuen WTA Merkblatt Monitoring [7] fixiert, hat in dem Fall einer hydrophoben „Außenhaut“ besonders hohe Relevanz, um die heute getätigte Gebäudeinvestition auch unter dem monetären Aspekt „reizvoll“ erscheinen zu lassen. Das dies langfristig der Fall ist, bestätigt der Zwingerrestaurator Frank Hoferick in einer mündlichen Mitteilung Anfang 2015 zu dem von ihm betreuten Langzeitprojekt „Schutzanstriche am Zwinger“.
10. Wartung/Monitoring müssen, sollen sie erfolgreich sein, naturwissenschaftlich fachplanerisch begleitet werden.

Literatur

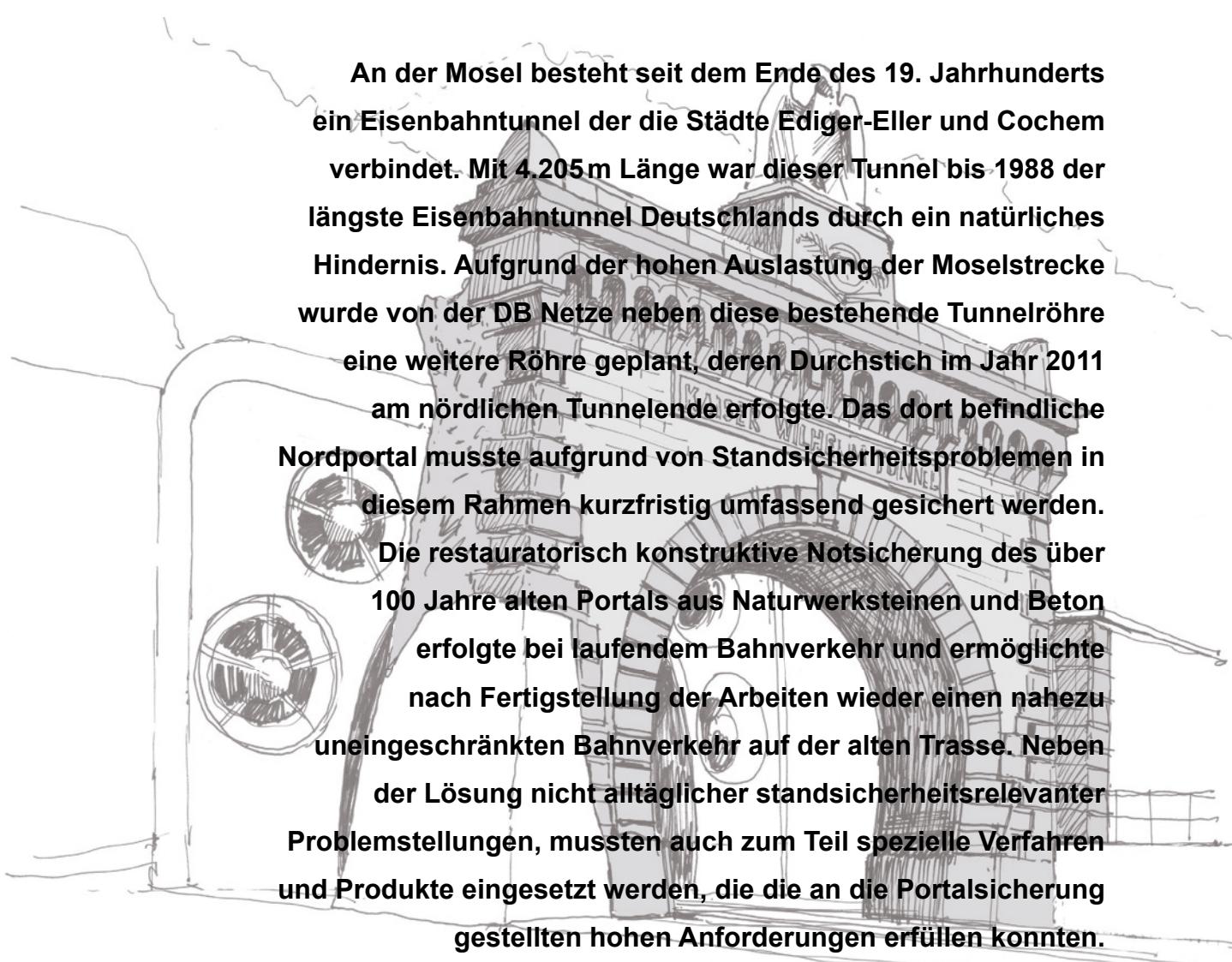
- [1] WTA Merkblatt 3-17 „Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen“; Fraunhofer IRB Verlag 2010.
- [2] Reissig, Josephine (2008): Tuffsteinkonservierung – Untersuchung hydrophober Beschichtungssysteme zur Behandlung von Schäden an hydrophobierten Bauwerken aus Ettringer u. Weiberner Tuff. Diplomarbeit, Fb Restaurierung FH Potsdam, 2008.
- [3] Snethlage, Rolf (2008): Leitfaden Steinkonservierung – Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. 3rd ed., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2008).
- [4] Hilbert, Georg (2014): Die Planung planen – Schadensglossar als Planungsmethode. Bauenschutz & Bausanierung, 3/2014.
- [5] Hilbert, G; Neumann, H. H.; Wendler, E. (2011): Hydrophobicity – One Target, Several Possibilities. 6th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials, Aedificatio Publishers 2011.
- [6] Hilbert, Georg (2010): Farbfassung auf Stein – Zum Einsatz von Anstrichsystemen zur Natursteinkonservierung. Restauro, 7/2010.
- [7] WTA Merkblatt 3-18 „Monitoring von Bauten und Denkmalen aus Naturstein“. Fraunhofer IRB Verlag 2014.

Abbildungen

Abb. 1: Foto Josephine Reissig
Alle anderen Abbildungen: Autor

Notsicherung des nördlichen Natursteinportals des Kaiser-Wilhelm-Tunnels in Cochem unter laufendem Bahnverkehr [1]

von Axel Dominik und Sabine Koch



An der Mosel besteht seit dem Ende des 19. Jahrhunderts ein Eisenbahntunnel der die Städte Ediger-Eller und Cochem verbindet. Mit 4.205 m Länge war dieser Tunnel bis 1988 der längste Eisenbahntunnel Deutschlands durch ein natürliches Hindernis. Aufgrund der hohen Auslastung der Moselstrecke wurde von der DB Netze neben diese bestehende Tunnelröhre eine weitere Röhre geplant, deren Durchstich im Jahr 2011 am nördlichen Tunnelende erfolgte. Das dort befindliche Nordportal musste aufgrund von Standsicherheitsproblemen in diesem Rahmen kurzfristig umfassend gesichert werden. Die restauratorisch konstruktive Notsicherung des über 100 Jahre alten Portals aus Naturwerksteinen und Beton erfolgte bei laufendem Bahnverkehr und ermöglichte nach Fertigstellung der Arbeiten wieder einen nahezu uneingeschränkten Bahnverkehr auf der alten Trasse. Neben der Lösung nicht alltäglicher standsicherheitsrelevanter Problemstellungen, mussten auch zum Teil spezielle Verfahren und Produkte eingesetzt werden, die die an die Portalsicherung gestellten hohen Anforderungen erfüllen konnten.

1 Einführung

Auf der Moselstrecke von Cochem nach Ediger-Eller verläuft ein Eisenbahntunnel, der 4.205 m lang ist und bis 1988 der längste Eisenbahntunnel Deutschlands durch ein natürliches Hindernis gewesen ist. Der Tunnel wurde in den Jahren von 1874 bis 1877 „schnurgerade“ erbaut und nach dem Deutschen Kaiser Wilhelm I. benannt. Der Tunnel schließt an beiden Enden durch ein Portal ab. Das nördliche Portal, das in diesem Beitrag behandelt wird, liegt mitten im Stadtgebiet von Cochem und steht nach dem Einbau einer Lüftungsanlage Anfang des 20. Jahrhunderts etwa 5 bis 6 m vor der eigentlichen Tunnelröhre (Abb. 1, 2) [2].

Der Einbau einer Lüftungsanlage wurde im Jahr 1904 notwendig, da aufgrund der Tunnellänge und des zunehmenden Zugverkehrs Probleme beim Abtransport der Ab- bzw. Rauchgase aufraten und es zu einer Verqualmung des Tunnels kam. Die natürliche Tunnelentlüftung wurde bis 1913 durch den Bau einer Lüftungsanlage künstlich unterstützt. Nachdem die Lüftungsanlage durch den weiter zunehmenden Zugverkehr schließlich auch nicht mehr ausreichte, wurde im Jahr 1913 ein Entlüftungsschacht abgeteuft [2].

Aufgrund einer hohen Streckenauslastung (Personen- und Güterverkehr) ist im Sommer 2008 mit dem Bau einer zweiten Tunnelröhre, die unmittelbar neben der alten Tunnelröhre verläuft, begonnen worden. Der Durchstich erfolgte auf der nördlichen Tunnelseite im Herbst 2011. Bevor der Durchstich erfolgen konnte, ist das Gelände im Einzugsbereich des nördlichen Portals entsprechend vorbereitet bzw. „begradigt“ worden. Dabei ist dem Portal das östliche Widerlager genommen worden, so dass es von dem Zeitpunkt an nahezu „frei“ vor der alten Tunnelröhre stand. Als erste Sicherungsmaßnahme ist das Portal

mit einer „Eisenklammer“ rückseitig am Felsen bzw. der historischen Lüftungskonstruktion verankert worden (Abb. 4).

Aufgrund des unverändert großen Verkehrsaufkommens und zur Sicherstellung des nahezu uneingeschränkten Bahnverkehrs ist das Portal dann im Frühjahr 2012, unter Berücksichtigung der denkmalpflegerischen Anforderungen, notgesichert worden.

Die verschiedenen an dem nördlichen Portal des Kaiser-Wilhelm-Tunnels in Cochem durchgeführten konstruktiven Notsicherungsmaßnahmen, unter Berücksichtigung der denkmalpflegerischen Anforderungen, werden nachfolgend erläutert.

2 Bestandsaufnahme

Zur Bestandsaufnahme des Nordportals ist neben einer Aktenstudie, einer visuellen Besichtigung, dem Anlegen von Schürfen und der Entnahme von Bohrkernen auch eine Laserscanaufnahme von dem Portal erfolgt, um neben den Abmessungen auch ggf. vorhandene Schiefstellungen zu erfassen.

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse der Bestandsaufnahme zusammengestellt.

2.1 Zustandsbeschreibung

Das Nordportal des alten Kaiser-Wilhelm-Tunnels ist Ende des 19. Jahrhunderts errichtet worden. Im Kern sowie in der Fläche (vorgesetztes Bossenmauerwerk) besteht das Portal aus einem Mauerwerk aus einer „Grauwacke“. Bohrkernentnahmen haben gezeigt, dass kaum anhaftender Mörtel bzw. nur Mörtel geringer Festigkeit, Hohlräume im Mauerwerk sowie teilweise gelöstes vorgesetztes Bossenmauerwerk im untersuchten Bereich vorhanden sind.

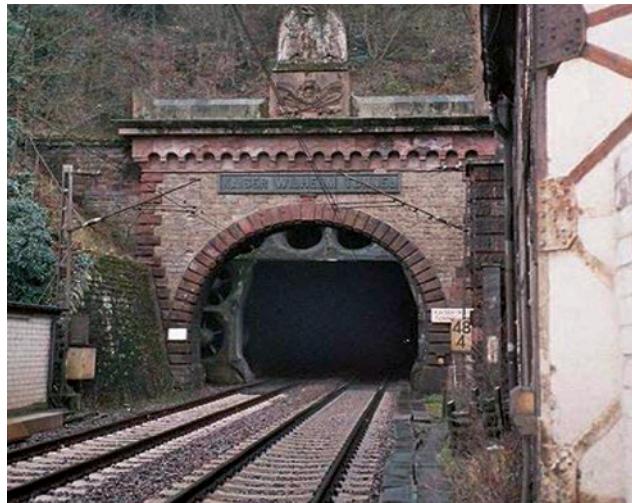


Abb. 1 Portal Kaiser-Wilhelm-Tunnel auf der Cochemer Seite vor Beginn der Tunnelarbeiten mit Gelände als westliches Widerlager [2]



Abb. 2 Portal Kaiser-Wilhelm-Tunnel auf der Cochemer Seite mit Blick auf die Lüftungsanlage

Die Schmuckelemente des Portals, wie z.B. Eck- und Bogenquader sowie Kranzgesims und Postament des mittig auf dem Portal positionierten Adlers, sind mit einem roten Sandstein aufgemauert bzw. verkleidet.

Die roten Sandsteine weisen teilweise Ausblü- hungen auf und Schalen in einzelnen Bereichen ab. Insbesondere an dem Kranzgesims sind Betonergän- zungen im Bereich der Sandsteine durchgeführt wor- den, die z.T. abgängig sind. Auch an der Adlerfigur haben bereits Überarbeitungen stattgefunden, die z.T. geschädigt sind. An dem Gesims sowie im Bos- senmauerwerk (Fugen) sind zudem Risse sichtbar.

Visuell ist eine Neigung des Gesimses mit Postament und Adler nach vorne zu erkennen (siehe dazu auch Abschnitt 2.2). Eine Bohrkernentnahme in die- sem Bereich am Übergang Hintermauerwerk/Gesims hat im Inneren eine „klaffende“ Fuge aufgezeigt.

Rückseitig (zwischen Portal und Lüftungsan- alge) ist das Nordportal nach dem Rückbau des Geländes zum Errichten der Lüftungsanlage mit ei- ner Spritzbetonschale flächig versehen worden. Die Spritzbetonschale liegt zum Teil hohl und droht sich abzulösen. Der genaue Zeitpunkt des Auftrages der Spritzbetonschale konnte nicht recherchiert werden.

Zwischen Nordportal und Lüftungsanlage ist ein Fundament aus Beton vorhanden, das offensichtlich Bestandteil der historischen Lüftungsanlage ist.

Unmittelbar neben dem alten nördlichen Portal des Kaiser-Wilhelm-Tunnels liegt die neue Tunnelröhre (Abb. 3).

Für den Durchstich der neuen Tunnelröhre in Cochem ist das Gelände östlich der alten Tunnelröhre teilweise abgetragen worden. Dabei ist auch das östliche Widerlager des Nordportals entfernt worden,

so dass das Portal von diesem Zeitpunkt an „frei“ vor der Lüftungsanlage stand (Abb. 2, 3 und 4).

Zur Sicherung des freistehenden Portals ist zu- nächst eine „Eisenklammer“, die an der rückseitigen Lüftungsanlage verankert worden ist, etwa auf Höhe des Bogenscheitels, am östlichen Portalpfeiler ange- bracht worden. Zusätzlich sind im Bereich des ehe- maligen östlichen Widerlagers Vernadelungen am Pfeilerfuß vorgenommen worden (Abb. 4).

Das so mehr oder weniger „freistehende“ Nord- portal, durch das unverändert, lediglich mit vermin- derter Geschwindigkeit, der Personen- und Güterver- kehr der Moselstrecke fuhr, ist bzgl. der auftretenden Erschütterungen mittels seismischer Messungen von der DB Netze AG permanent beobachtet worden. Unter anderem aufgrund festgestellter, z.T. erhöhter Er- schütterungen und um die Geschwindigkeit der Züge wieder anheben zu können, sollte eine konstruktive Notsicherung des Nordportals erfolgen.

2.2 Laserscanaufnahme

Vor Durchführung der Notsicherungsmaßnahmen ist zum Feststellen von evtl. Schiefstellungen und zum Erstellen von maßgetreuen Plänen für die weitere Planung eine Laserscanaufnahme von dem Portal erstellt worden.

Visuell ist an dem Nordportal u.a. eine Neigung des Kranzgesimses mit Postament und Adler nach vorne zu erkennen. Die Laserscanaufnahme hat u.a. gezeigt, dass das Nordportal gegen die Verti- kale etwa 11 cm und der Adler etwa 16 cm nach vorne geneigt sind (Abb. 5). Zudem konnte mittels der Laserscanaufnahme festgestellt werden, dass der das Portal bekönende Adler etwa 43 cm vor dem Por- tal steht und der Schwerpunkt des Adlers aufgrund



Abb. 3 Portal Kaiser-Wilhelm-Tunnel auf der Cochemer Seite mit Blick auf die Lüftungsanlage



Abb. 4 Portal Kaiser-Wilhelm-Tunnel auf der Cochemer Seite mit abgetragenem Widerlager und „Eisenklammer“

der festgestellten Portalschiefstellungen jetzt etwa in der Vertikalachse der Fassadenoberfläche des Portals liegt.

2.3 Zusammenfassung der bestehenden Problemstellungen am Nordportal

Basierend auf der zuvor durchgeführten Bestandsaufnahme am Nordportal des alten Kaiser-Wilhelm-Tunnels ergaben sich zusammenfassend folgende mögliche Problemstellungen für die Notsicherung aus der vorhandenen Mauerwerkskonstruktion des Nordportals unter Berücksichtigung des laufenden Bahnbetriebes (Abb. 5):

- östliches Widerlager der Bogenkonstruktion des Nordportals ist nicht mehr vorhanden,
- der angrenzende Baugrund wird durch den Kreisquerschnitt des neuen Tunnels tiefer als die Unterkante der Portalfundamente angeschnitten,
- Nordportal steht nahezu „frei“ vor der Lüftungsanlage,
- „Eisenklammer“ zum „Halten“ des Nordportals ist nicht ausreichend dimensioniert,
- Vernadelung des östlichen Portalfußes allein kann die Schublasten aus der Bogenkonstruktion nicht übernehmen,
- z.T. sind erhöhte Erschütterungen im Bereich des Portals durch den laufenden Bahnverkehr vorhanden,
- Kranzgesims mit Postament und Adlerfigur sind nach vorne geneigt und weisen Risse auf,
- Betonergänzungen an den Werksteinen des Kranzgesimses und des Adlers weisen Schäden auf und sind z.T. abgängig,
- flächiges Bossenmauerwerk weist Risse in den Fugen und Ausblühungen auf,
- das „innere“ Mauerwerk des Portals weist Hohlstellen auf,
- der Mauermörtel hat gemäß Befunde kaum bis keinen Verbund zu den Mauersteinen,
- die rückseitige Spritzbetonschale weist Hohlstellen auf.

3 Konstruktive Notsicherungsmaßnahmen am Nordportal

Am östlichen Portalpfeiler ist im Zuge des Tunnelneubaus am alten Kaiser-Wilhelm-Tunnel in Cochem das „natürliche“ Widerlager (Geländeanschnitt) des Nordportals abgetragen worden. In einer ersten Maßnahme ist eine „Eisenklammer“ am östlichen Portalfuß montiert worden, um das Portal gegen „Kippen“ zu halten und der östliche Portalfuß ist mit Ankern im

unteren Bereich vernadelt worden (siehe dazu auch Abschnitt 2.1 sowie Abb. 4).

Zur Aufrechterhaltung des Bahnverkehrs an der Moselstrecke und u.a. mit dem Ziel die Durchfahrtsgeschwindigkeit im Bereich des Nordportals wieder zu erhöhen, ist dann im Herbst/Winter 2011/2012 die konstruktive Notsicherung des Nordportals des Kaiser-Wilhelms-Tunnels in Cochem durchgeführt worden.

Die Planung des Sicherungskonzeptes beruht auf einem Zusammenspiel von ausführenden Firmen, Denkmalpflege, Fachplanern und dem Bauherrn (siehe dazu auch Abschnitt 6). Das Konzept besteht aus verschiedenen einzelnen Maßnahmen, die ineinander greifen und die die unter Abschnitt 2.3 aufgeführten Problempunkte des Nordportals berücksichtigen. Bei der Ausarbeitung des Konzeptes ist von den verantwortlich Beteiligten, u.a. in Abstimmung mit der Denkmalpflege, die spätere restauratorische Instandsetzung des Portals sowie der Anschluss des Portals an die bestehende Tunnelröhre, soweit möglich, berücksichtigt worden.

3.1 Übersicht über die Notsicherungsmaßnahmen

Die durchgeführten Notsicherungsmaßnahmen setzen sich im Wesentlichen aus folgenden Arbeitsschritten zusammen (Abb. 6, 7 und 8):

- Vorkonsolidierung des Mauerwerkes mittels Mörtelinjektion und Vernadelung am östlichen Portalfuß.
- Setzen von Erdankern mit integrierter Stahlkonstruktion zur Aufnahme der Schubkräfte am östlichen Pfeilerfuß.
- Setzen und Verpressen (mit speziellem Verbundmörtel) von Verbundankern quer zur Portalachse zum Verspannen der Holzunterkonstruktion.
- Rückverankerung des Kranzgesimses mit Adler mit Verbundankern.
- Aufbau und Verspannen der Holzunterkonstruktion zum Schutz der historischen Substanz und zum Halten des Kranzgesimses; Holzkonstruktion dient im Bereich des Kranzgesimses zusätzlich als Schalung für Leichtbetonrahmen.
- Vernadelung des Nordportals in Portalachse oberhalb des Bogens zur Aufnahme der Betonierlasten; der Portalbogen konnte aufgrund des laufenden Bahnverkehrs nicht abgestützt werden.
- Erstellen des Stahlbetonrahmens aus eingefärbten Leichtbeton entlang der Portalfüße und des Kranzgesimses zum Aussteifen des Portals und zum Rückverankern des abgängigen Kranzgesimses.

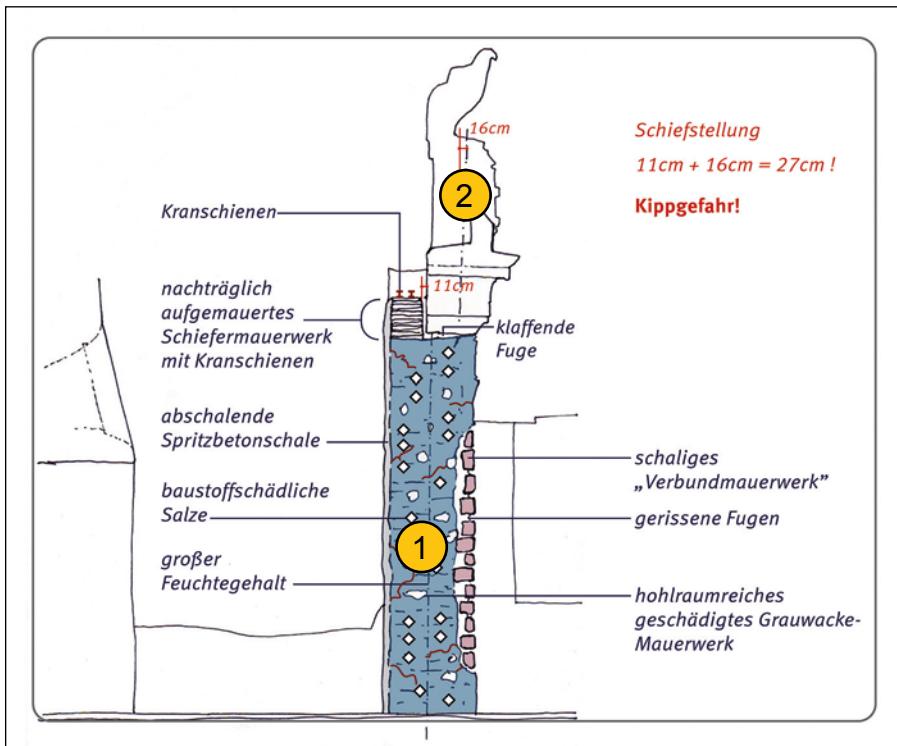


Abb. 5

Kennzeichnung der Portal- (1) und Gesimsschiefstellung (2) sowie einzelner Problemstellungen vom östlichen Portalpfeiler im Querschnitt [3] auf Basis der Laserscanaufnahme [4] – Prinzipskizze

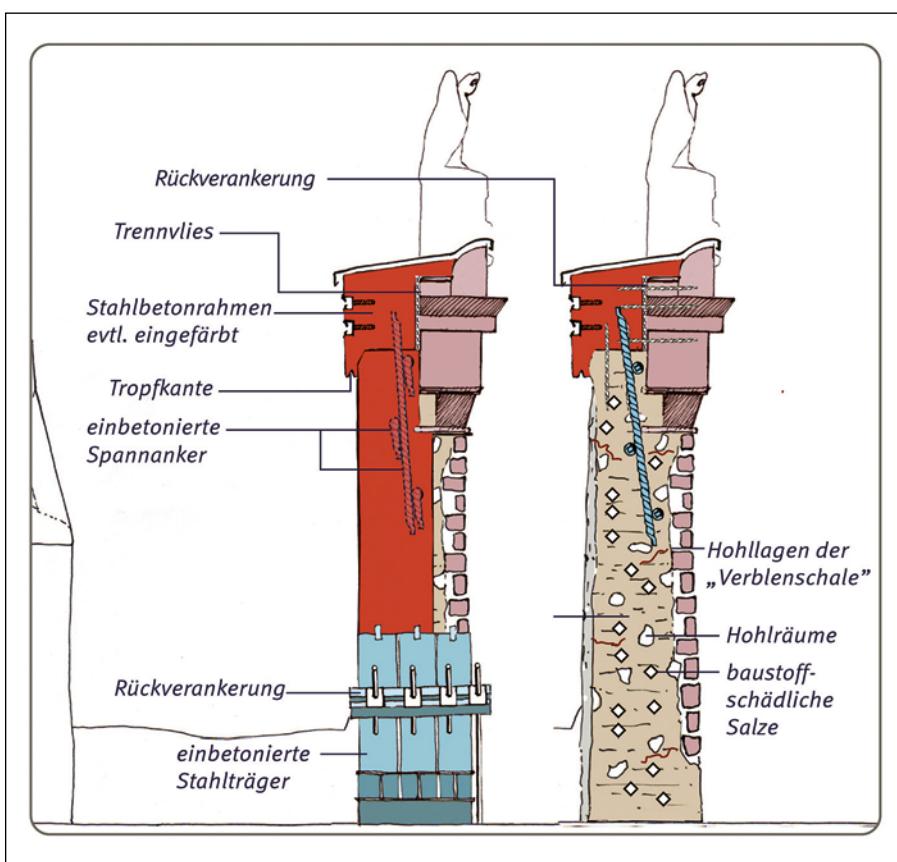


Abb. 6

Leichtbetonrahmen mit Erdankern, Quervernadelung und Rückverankerung Gesims in Ansicht östlicher Portalfuß (links) und im Querschnitt (rechts) [3] – Prinzipskizze

- Aufbau der Stahlkonstruktion mit zugehörigen so genannten „A-Böcken“ und entsprechenden Fundamenten auf Holzunterkonstruktion zum Aufbau des kraftschlüssigen Verbundes zum Sichern des Portals gegen Kippen.
- Aufbau der Stahlkonstruktion mit Holzunterkonstruktion wie oben zum „Halten“ der Adlerfigur.
- Überprüfen der Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen mittels Formänderungs- und seismischen Messungen.

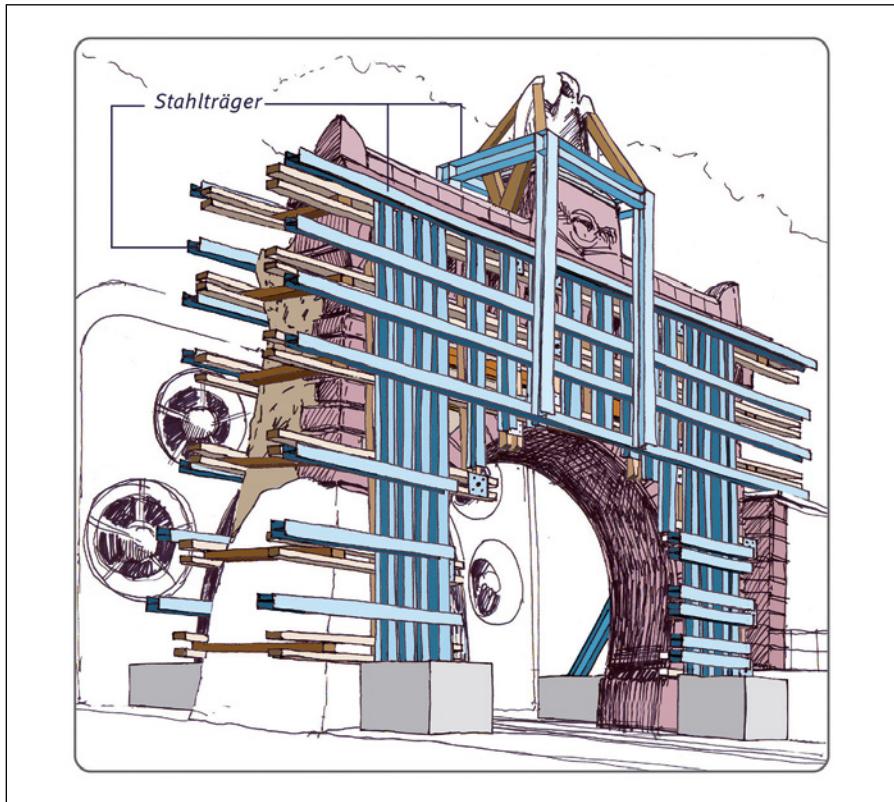


Abb. 7

Aufbau der Stahlkonstruktion mit einer Holzunterkonstruktion gegen „Kippen“ des Nordportals [3] – Prinzipskizze

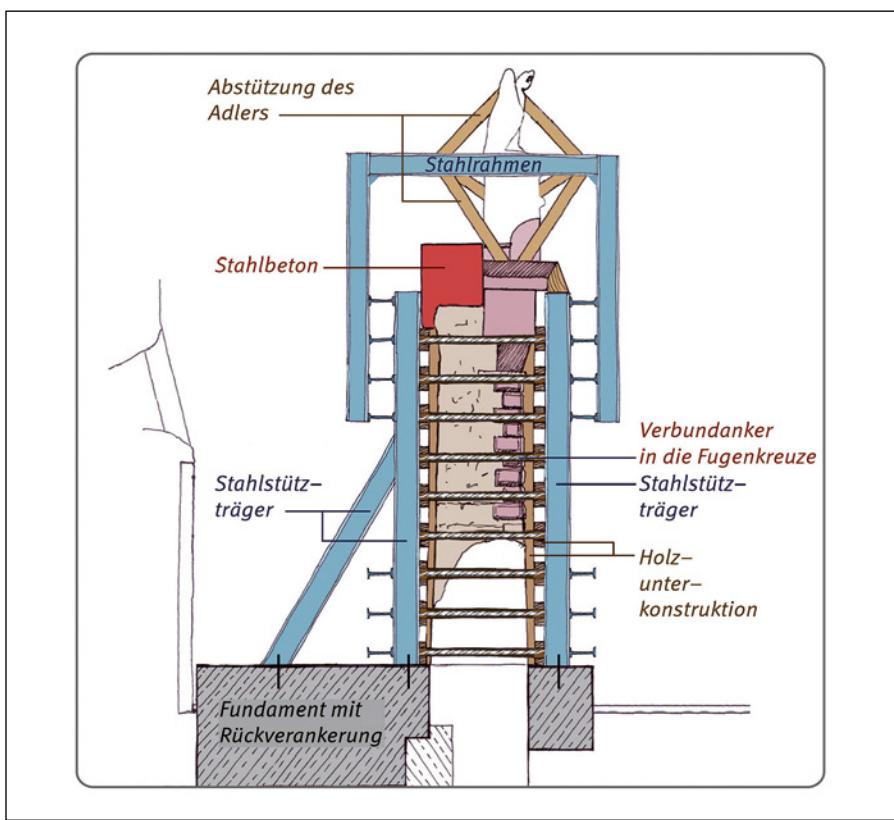


Abb. 8

Aufbau der Stahlkonstruktion mit einer Holzunterkonstruktion gegen „Kippen“ des Nordportals und des Adlers sowie Mauerwerkksolidierung und Stahlbetonrahmen im Querschnitt [3] – Prinzipskizze

3.2 Beschreibung zur Ausführung der Notsicherungsmaßnahmen

Unter Abschnitt 3.1 sind die durchgeführten Notsicherungsmaßnahmen stichpunktartig aufgeführt worden. Nachfolgend werden die einzelnen Maßnahmen ausführlicher erläutert.

Als eine erste Maßnahme sind im Rahmen der Notsicherung des Nordportals zunächst die an kommenden Schubkräfte durch das Setzen von entsprechend dimensionierten Erdankern am östlichen Portalfuß aufgefangen worden. Dazu sind Erdanker (IBO Selbstbohranker) am östlichen Portalfuß unter einem

Winkel von 45 Grad gegen die Horizontale in Richtung des westlichen Portalfußes in den Untergrund eingebracht worden. Zum Einleiten der Kräfte am östlichen Portalfuß ist dieser mittels einer Stahlkonstruktion entsprechend verstärkt bzw. die Erdanker sind an eine Stahlkonstruktion zum Aufnehmen der Lasten kraftschlüssig angeschlossen worden (Abb. 6). Parallel zum Setzen der Erdanker ist das Mauerwerk des östlichen Portalfußes auch im oberen Bereich bis unter das Bogenfries des Kranzgesimses vorkonsolidiert worden.

Nachdem die Standsicherheit des östlichen Portalfußes so wieder hergestellt worden war, ist zunächst auch das übrige Mauerwerk des Nordportals konsolidiert und somit für die weitere Stabilisierung vorbereitet worden. Dazu sind quer zur Bauteilachse Bohrungen in die Fugenkreuze durch den gesamten Mauerwerkquerschnitt geführt worden, in die spezielle Verbundanker eingelegt worden sind. An die Enden der speziellen Verbundanker sind jeweils Gewindestangen angeschweißt worden, um die vorgenommene Mauerwerkvernadelung für die Durchführung weiterer Notsicherungsmaßnahmen (Verspannen der Holzunterkonstruktion, siehe nachfolgende Ausführungen) heranziehen zu können (Abb. 7 und 8).

Zum Schutz der historischen Substanz wird zunächst mittels der zuvor eingebrachten Verbundanker eine Holzunterkonstruktion an der Portalvorder- und Rückseite montiert und verspannt (Abb. 8 und 9). Im Bereich der Rückseite des Kranzgesimses wird die Holzunterkonstruktion zudem genutzt, um die Schalung für die spätere Erstellung des Leichtbetonbalkens zu tragen (siehe Abb. 9).

Nach dem Aufbau der Holzunterkonstruktion ist an der Portalrückseite auf Höhe des Kranzgesims sowie seitlich der Portalfelder ein Stahlbetonrahmen aus Leichtbeton erstellt worden (Abb. 9). Der Stahlbetonrahmen soll neben den am östlichen Portalfuß gesetzten Erdankern zur Aussteifung des Nordportals quer zu den Bahngleisen beitragen und somit das fehlende Widerlager ersetzen. Zusätzlich soll das Kranzgesims mittels spezieller Anker an dem Stahlbetonrahmen rückverankert werden, um das Gesims für die Zeit der Notsicherungsmaßnahme zu „Halten“ und ein weiteres Absinken zu verhindern (Abb. 6 und 9).

Bevor der Stahlbetonrahmen hergestellt werden kann, muss allerdings noch ein Weg gefunden werden, wie das Portal während des Bauzustandes die Betonierlasten aufnehmen kann, da der Portalbogen, aufgrund des fortlaufenden Bahnverkehrs, für die Betonierarbeiten nicht abgestützt werden kann. So ist mit den verantwortlich Beteiligten entschieden worden, Verbundanker oberhalb des Bogenschei-



Abb. 9 Aufbau der Holzunterkonstruktion an der Portalrückseite sowie eingefärbten Leichtbetonrahmen

tels über die gesamte Portalbreite einzubringen, die neben der Aufnahme der Betonierlasten auch dazu beitragen, das Mauerwerk weiter zu stabilisieren und Schubkräfte aus dem Portalbogen während der Notsicherungsmaßnahmen aufzunehmen (siehe Abb. 6).

Für die Stahlbetonkonstruktion des Rahmens ist ein Leichtbeton ausgewählt worden, um einen E-Modul zu erreichen, der möglichst nah an das historische Material angepasst ist. In Abstimmung mit der Denkmalpflege ist der Leichtbeton in Anlehnung an die Naturwerksteine aus rötlichem Sandstein eingefärbt worden (Abb. 1 und 9).

Sobald der Stahlbetonrahmen eine bestimmte Festigkeit erreicht hatte, ist damit begonnen worden, die eigentliche Stahlkonstruktion am Nordportal aufzubauen, um das Portal gegen „Kippen“ zu schützen und den Zügen wieder ihre ursprüngliche Durchfahrtsgeschwindigkeit zu ermöglichen. Vor dem Aufbau der Stahlkonstruktion war es aufgrund der Untergrundbeschaffenheit, die im Rahmen der Bestandsaufnahme hinsichtlich der Tragfähigkeit mit geprüft und als nicht ausreichend festgestellt worden war, notwendig, entsprechend tragfähige Fundamente an der Portalvorder- und -rückseite aufzubauen (Abb. 7 und 8). Bei der Ausbildung der Fundamente musste mit berücksichtigt werden, dass der anstehende Untergrund durch den unmittelbar angrenzenden Tunnelneubau (Kreisquerschnitt) bis zu einer Tiefe von etwa 1,5m

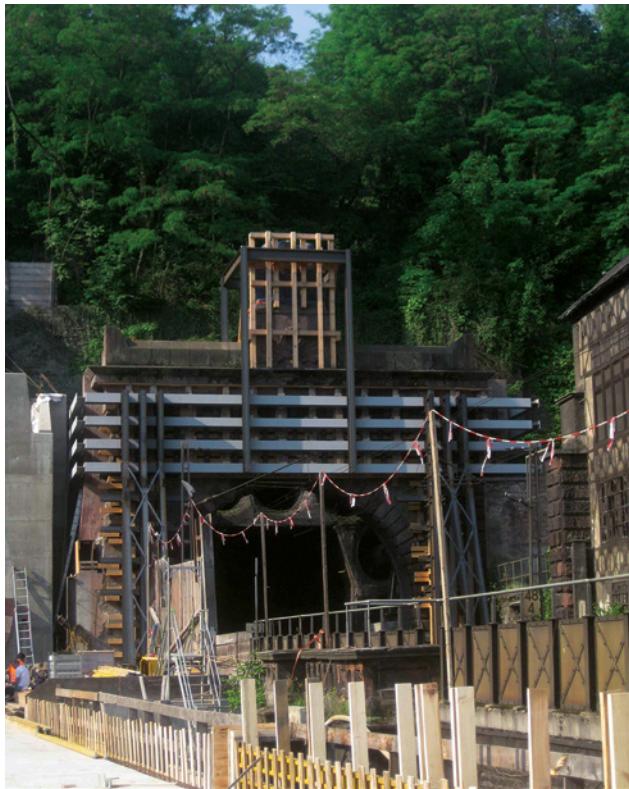


Abb. 10 Notgesichertes Nordportal des Kaiser-Wilhelm-Tunnels

unterhalb der Sohle des östlichen Portalfußes angeschnitten wird. Zudem lagen im Bereich der Fundamente zwischen Portal und Lüftungsanlage die historischen Betonanlagen der Lüftung. Diese Anlagen sollten soweit wie möglich erhalten werden.

Auf die so errichteten Stahlbetonfundamente sind sogenannte „A“-Böcke vormontiert worden, an denen schließlich die eigentliche Stahlkonstruktion angeschlossen worden ist (Abb. 7, 8 und 10).

Die Stahlkonstruktion ist so konstruiert und bemessen worden, dass das gesamte Tor umfasst wird und die Lasten aus dem Bauwerk und dem Bahnverkehr in den Untergrund abgetragen werden können. Durch eine Zusatzkonstruktion, die an den Querträgern der Hauptkonstruktion angeschlossen worden ist, konnte bei nur einem geringen Mehraufwand auch der Adler auf dem Kranzgesims mitgehalten werden (Abb. 8 und 10).

Die Wirkung der Notsicherungsmaßnahmen bzw. das evtl. Auftreten von Formänderungen kann visuell durch das Anbringen von „mineralischen Messbändern“, die vor dem Aufbau der Sicherungskonstruktion angebracht worden waren, kontrolliert werden. Zusätzlich ist angedacht worden, das Portal mess-technisch von zum Beispiel einem Beobachtungsplateau regelmäßig hinsichtlich evtl. auftretender Bewegungen zu beobachten.

Unmittelbar nach Abschluss der Arbeiten an der Notsicherungskonstruktion, die inklusive Planung, bei

laufendem Bahnverkehr und nur wenigen Stillstandszeiten etwa 6 Monate angedauert haben, konnte der Bahnverkehr wieder ungestört durch den alten Kaiser-Wilhelm-Tunnel bzw. das Nordportal aufgenommen werden.

4 Weitere Vorgehensweise

Die oben beschriebenen Maßnahmen zur Sicherung des Nordportals des Kaiser-Wilhelm-Tunnels in Cochem sind lediglich zur Notsicherung des Portals durchgeführt worden. Die Maßnahmen sind u.a. in Abstimmung mit der Denkmalpflege so geplant und ausgeführt worden, dass eine spätere restauratorische Instandsetzung des Portals und der Lüftungsanlage, aufbauend auf die bereits durchgeföhrten Maßnahmen, erfolgen kann.

Neben Maßnahmen zur Mauerwerkinstandsetzung muss insbesondere die Stand- und die Tragsicherheit des Portals durch geeignete, denkmalgerechte Maßnahmen wieder hergestellt werden. Dabei muss auch die unmittelbar am alten Tunnelausgang bestehende historische Lüftungsanlage (Industriedenkmal) in die Planung mit einbezogen werden.

Literatur

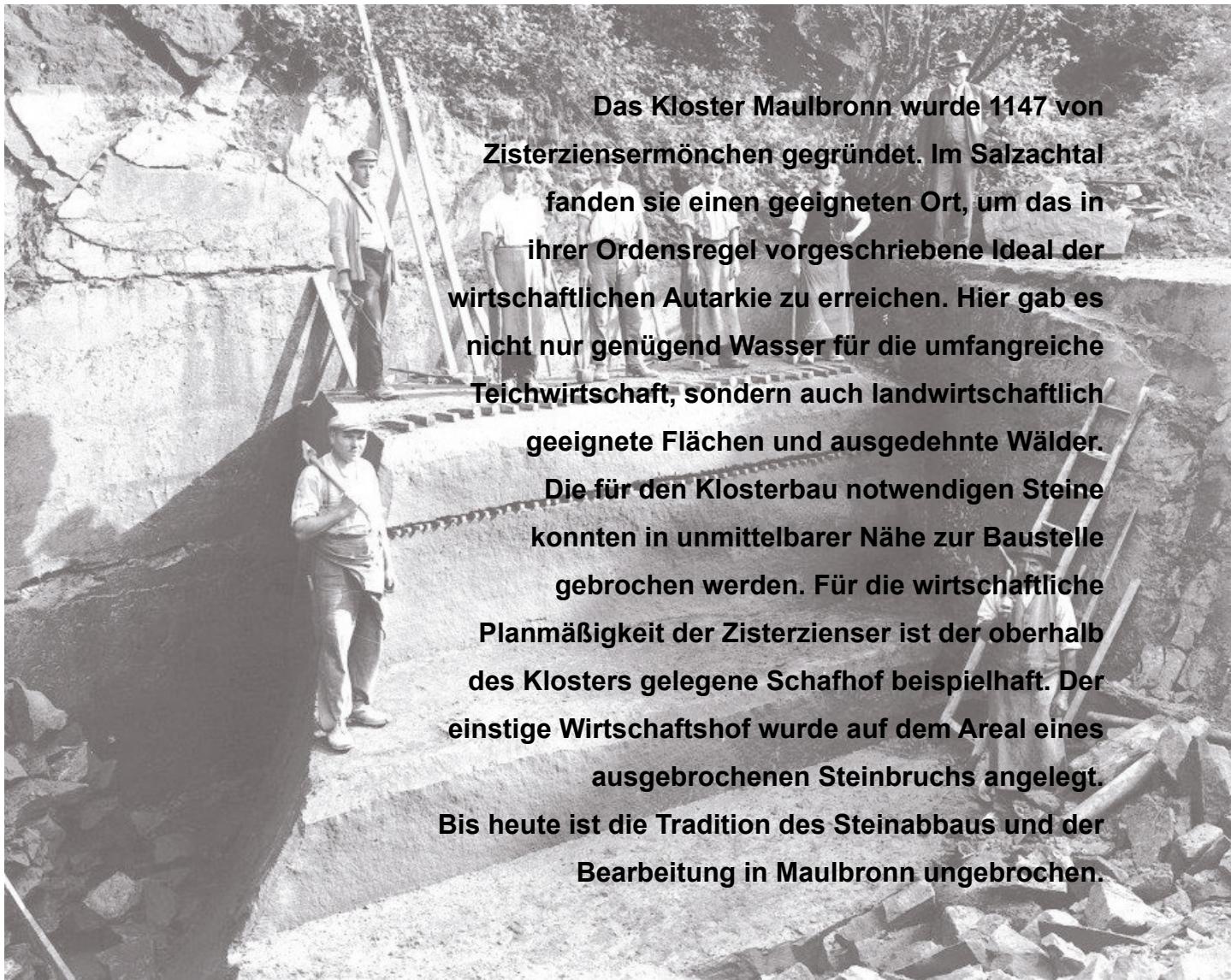
- [1] Koch, S.; Dominik. A.: Das Tor zum Tunnel – Notsicherung des Kaiser-Wilhelm-Portals unter laufendem Bahnverkehr. Technische Akademie Esslingen, Tagungshandbuch 2015, Seite 133; 4. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken; Herausgeber: M. Raupach; 01-2015
- [2] <http://de.wikipedia.org/wiki/Kaiser-Wilhelm-Tunnel>
- [3] Grafische Darstellung: Gerd Sedelies, Berlin
- [4] OE Planung + Beratung GmbH, Altena

Beteiligte Firmen

Deutsche Bahn AG – DB Netze, 10785 Berlin
Arbeitsgemeinschaft Neuer Kaiser-Wilhelm-Tunnel
(ARGE NKWT), Endertstraße 8, 56212 Cochem
ZERNA Planen und Prüfen GmbH
Lise-Meitner-Allee 11, 44801 Bochum
Ingenieurbüro Holger Tebbe
Fuhrweg 32, 56567 Neuwied
Planungs- und Ingenieurbüro Wilms, Schulstraße 13,
53539 Kelberg
Im Auftrag der ARGE NKWT:
Schürholz-Schäfer BauGesellschaft mbH,
Am Höhmelkopf 4, 51580 Reichshof-Wehnrat
Seitz Stahl- und Metallgestaltung GmbH & Co. KG,
Herforster Straße 18, 54662 Speicher/Eife

Ein Bilderbuch der Geschichte und Geographie: Steinabbau in Maulbronn

von Martin Ehlers



Das Kloster Maulbronn wurde 1147 von Zisterziensermönchen gegründet. Im Salzachtal fanden sie einen geeigneten Ort, um das in ihrer Ordensregel vorgeschriebene Ideal der wirtschaftlichen Autarkie zu erreichen. Hier gab es nicht nur genügend Wasser für die umfangreiche Teichwirtschaft, sondern auch landwirtschaftlich geeignete Flächen und ausgedehnte Wälder. Die für den Klosterbau notwendigen Steine konnten in unmittelbarer Nähe zur Baustelle gebrochen werden. Für die wirtschaftliche Planmäßigkeit der Zisterzienser ist der oberhalb des Klosters gelegene Schafhof beispielhaft. Der einstige Wirtschaftshof wurde auf dem Areal eines ausgebrochenen Steinbruchs angelegt. Bis heute ist die Tradition des Steinabbaus und der Bearbeitung in Maulbronn ungebrochen.

Stein – Wasser – Wald

Die Stadt Maulbronn liegt im nordöstlichen Enzkreis und gehört landschaftlich dem Strombergvorland an, das sich in westlicher Richtung, nach dem Elfinger Hof, zum Kraichgau bzw. zur Bauschlotter Platte hin öffnet. Charakteristisch für das Strombergvorland ist die zertalte Schilfsandsteinplatte, deren höhere Lagen von Bunten Mergelschichten bedeckt sind. In den Tälern wird der Gipskeuper angeschnitten. Die Bunten Mergel treten sowohl im Bereich des Scheuelbergs bis zum Gewann Reuth (Zaisersweiher) als auch am Hamberg auf. Aufgrund der für die Landwirtschaft ungünstigen Eigenschaften der Bunten Mergel ist der größte Teil der darüber liegenden Bodenflächen entweder bewaldet oder wird als Streuobstwiese genutzt.

In Maulbronn ist der Keuperboden vorherrschend. Kleinere Flächen sind mit Löß- und Lehmböden überdeckt, wie z.B. nördlich des Elfinger Bergs und im Gewann Sickinger Rain zwischen der Pforzheimer Straße und der B 35. Durch die Lößablagerungen entstanden fruchtbare Ackerböden. Einen deutlichen Stufenrand bilden die bewaldeten Höhen des Schilfsandsteins gegenüber den westlich der Maulbronner Gemarkung vorgelagerten Kraichgauhügeln im Lettenkeuper und Muschelkalk (Landesarchivdirektion Baden-Württemberg 1976: 549; Entwicklungsgutachten der Stadt Maulbronn 1979: 8).

Der über dem Gipskeuper vorkommende rote und gelbe Schilfsandstein wird als Werkstein abgebaut und dürfte bereits bei der Standortwahl für das Kloster neben dem Wasserreichtum des Salzachtals, die Anbindung an der Kaiserstraße (Rote Straße bzw.

Roter Weg) und den notwendigen politischen Voraussetzungen für die künftige Entwicklung ausschlaggebend gewesen sein. Der über Jahrhunderte betriebene Abbau des Schilfsandsteins hat deutliche Spuren in der Landschaft hinterlassen.

Das Vorhandensein wasserreicher Täler war für die Eigenwirtschaft der Zisterzienser unbedingt erforderlich. Im Gegensatz zu den Benediktinern, die ihre Klöster auf der Höhe anlegten, bauten die Zisterzienser stets im Tal, um genügend Wasser zu haben. Ein mittelalterliches Sprichwort sagt: „Bernhard liebte die Täler, Benedikt die Berge, Franz von Assisi die Dörfer und Dominikus die großen Städte“ (zit. in LEROUX-DHUYS 1998: 46).

In der Vita des Abts und charismatischen Kirchenpredigers Bernhard von Clairvaux (1090/91–1153), die ein Zeitgenosse verfasste, ist die Bedeutung des Wassers anschaulich dargestellt:

Der Fluss tritt in die Abtei insoweit ein, als die Mauer, die als Hindernis entgegensteht, dies zulässt. Er stürzt sich zunächst in die Getreidemühle, wo er gehörig eingespannt wird, das Korn unter dem Druck der Mühlsteine zu mahlen und das feine Sieb zu schütteln, welches das Mehl von der Kleie trennt. Dann fließt er in das nächste Gebäude und füllt die Siedepfanne, in der er erhitzt wird, um ihn zur Herstellung von Bier als Getränk für die Mönche zu benutzen, wenn der Ertrag des Weinstocks des Winzers Mühe nicht lohnt. Aber der Fluss hat seine Arbeit noch nicht getan. Er wird nun in die Tuchwalke geleitet, die sich an die Getreidemühle anschließt. In der



Abb. 1 Unterhalb der Schanze an der Reichshalde vor Maulbronn ragt der gelbe Schilfsandstein aus der weicheren Mergelschicht des Gipskeupers hervor.
Foto: Stadtarchiv Maulbronn



Abb. 2 Das Kloster und die Stadt Maulbronn im Salzachtal mit dem darüber liegenden „Tiefen See“ und „Roßweiher“. Der Schafhof wurde in einem ausgebrochenen Steinbruch angelegt. Im Hintergrund liegen die Berghänge des Strombergs und der Mettenberg bei Diefenbach. Foto: Stadtarchiv Maulbronn

Mühle hat er Nahrung für die Brüder bereitet, jetzt ist es seine Pflicht, ihnen zu helfen, ihre Kleidung herzustellen. Der Fluss versagt dies nicht, wie er überhaupt keine Aufgabe zurückweist, die man ihm stellt. So lässt er die schweren Hämmer und die Schlägel oder genauer gesagt die hölzernen Füße der Tuchwalke sich abwechselnd heben und senken. Wenn er nun, eiligst herumwirbelnd, alle diese Räder in schnelle Umdrehung versetzt hat, strömt er schäumend heraus und macht den Eindruck, als habe er sich selbst zermahlen lassen. Nun tritt er in die Lohgerberei ein, wo er alle Sorgfalt und Arbeit aufwendet, die für die Fußbekleidung der Mönche notwendigen Stoffe zu bereiten. Er teilt sich dann in viele kleine Zweige und durchzieht in seinem geschäftigen Lauf die verschiedenen Bezirke. Dabei sucht er allüberall nach jenen, die seine Dienste zu irgendwelchen Zwecken benötigen, es sei das zum Kochen, zur Drehbewegung, zum Pressen, zur Bewässerung, zum Waschen oder zum Schleifen. Immer bietet er seine Hilfe an und niemals weigert er sich. Um vollkommenen Dank zu erwerben und um nichts ungetan zu lassen, trägt er schließlich noch die Abfälle fort und hinterlässt alles in Sauberkeit.

(zit. in Varchmin & Radkau 1984: 47)

Das Wasser hatte bei den Zisterziensern nicht nur eine rein praktische Funktion, sondern auch eine symbolische Bedeutung, die sich in den Ortsnamen widerspiegelt. „Maulbronn“ ist dafür ein Beispiel.

Auch der umfangreiche Waldbestand spielte bei der Klostergründung eine Rolle. Heute ist nahezu die Hälfte der Maulbronner Gemarkungsfläche, zu der die Flächen der ehemals selbständigen Gemeinden Schmie und Zaisersweiher gehören, mit Wald bedeckt. Im Maulbronner Stadtwald herrscht von Natur aus der Eichen-Buchen-Bestand vor. Den größten Flächenanteil (86 %) nimmt das Laubholz ein, wobei die Trauben- und Stieleiche mit 45 % am häufigsten vorkommt. Daneben folgen die Buche (25 %) und weitere Laubbäume wie Hainbuche, Bergahorn, Esche, Kirsche, Roteiche, Spitz- und Feldahorn, Birke, Erle, Elsbeere, Aspe, Linde, Kastanie, Weide, Mehlbeere und Vogelbeere mit zusammen 30 %. Die Nadelbäume nehmen nur einen geringen Flächenanteil von 14 % am Stadtwald ein, wovon 9 % mit Kiefern, 3 % mit Fichten, 1 % mit Douglasien und 1 % mit Lärchen bedeckt sind. Seit den 1980er Jahren ging der Anteil der Fichten durch Stürme, Dürre und den Befall von Borkenkäfern deutlich zurück. Gleichzeitig stieg der

Anteil der Laubbäume, allen voran die Buche. [1] Seit 1980 gehört Maulbronn zum Naturpark Stromberg-Heuchelberg, der als dritter Naturpark in Baden-Württemberg ausgewiesen wurde.

Die Steinbrüche

Seit dem Klosterbau durch die Zisterziensermönche wird in Maulbronn kontinuierlich Schilfsandstein gebrochen und verarbeitet. In nachklösterlicher Zeit, vor allem im 18. Jahrhundert, wurden die Steinbrüche durch Bedienstete der Klosterverwaltung betrieben. Nach dem Maulbronner Lagerbuch von 1725 werden drei „Steingruben“ auf der Klostermarkung erwähnt. [2] Eine davon lag im Graubrunnenwald und wurde vom Dorf Zaisersweiher (seit 1975 Stadt Maulbronn) genutzt, weshalb es immer wieder zu Grenzstreitigkeiten kam. Schließlich konnte die Zaisersweiherer Gemeindeverwaltung 1856 einen historischen Beleg aufweisen, durch den die Grenzen nach wie vor zu ihren Gunsten abgesteckt wurden. Das seitens des württembergischen Herzogs Carl Eugen legitimierte Dokument stammte aus dem Jahr 1759 und war an die Maulbronner Klosterverwaltung gerichtet. [3]



Abb. 3 Der Abflusskanal vom Tiefen See zum Kloster hin;
Foto: Stadtarchiv Maulbronn

Als weitere Steingrube wird der Seidebruch beim Tiefen See am Diefenbacher Weg genannt, in dem „gute“ rote Werksteine gebrochen wurden. Der dritte im Lagerbuch angegebene Steinbruch lag oberhalb des Elfinger Weinbergs und lieferte gelben Sandstein. [4] Ferner ist auf der Karte der Klostergemarkung des Geometers Johann Michael Spaeth aus dem Jahr 1761 ein Steinbruch im Gewann Killensrain eingezeichnet. [5]

Seit dem Verkauf des ehemaligen Klosterlands im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts entstanden immer mehr Steinbrüche. Um 1830 erwarb Steinhauer Johannes Schmid aus dem Nachbarort Schmie (seit 1970 Stadt Maulbronn) vom Kameralamt Maulbronn ein Gelände am Killensrain, um dort einen Steinbruch anzulegen. [6] Seinem Beispiel folgten über das 19. Jahrhundert hinweg noch verschiedene Steinhauer aus Schmie, wie die Namen Walter, Vallon, Kälber, Brüstle, Konzi, Goutier oder Erber bezeugen. [7] Die Geschichte der Schmieder Steinhauer ist übrigens seit 2003 in dem Museum „Steinhauerstube“ im Schmieder Rathaus mit zahlreichen Exponaten, Bildern und Texten anschaulich dargestellt (vgl. EHLERS 2003). Außerdem ist im „Museum auf dem Schafhof Maulbronn“ der lokalen Steinhauerei eine Themenstation gewidmet.

Traditionsreich in Maulbronn ist der 1872 von Werkmeister Franz Fröhner – Nachfahre des aus Knittlingen stammenden und 1798 als Klostermaurer nach Maulbronn berufenen Georg Jacob Fröhner [8] – verkaufte Steinbruch im Gewann „Beckenloch“. Damals ging der Steinbruch mitsamt Gebäuden und „Steinhauergeschirr“, d.h. Werkzeug, an das „Stuttgarter Immobilien und Baugeschäft“, vertreten durch seinen Direktor Friedrich Distel. [9] Dieses veräußerte 1887 an die Handelsgesellschaft Sorge & Läpple wiederum den Steinbruch mit den hinzugekommenen Gebäuden um 40.000 Mark. [10] Nach einem Jagdunfall von Teilhaber Karl Läpple wurde 1894 der größte Maulbronner Steinbruch an den aus Gündelbach stammenden Albert Burrer, seinerzeit Werkmeister und Wasserbautechniker im Garnisonsbauamt Ludwigsburg, verkauft. [11] Im selben Jahr wurde auch die nordöstlich vom Schafhof gelegene Villa der Familie Läpple an das Kameralamt Maulbronn veräußert, um dort das Forstamt unterzubringen. [12]

Bis heute wird in dem Steinbruch im Gewann „Beckenloch“ von der Fa. Lauster Steinbau GmbH roter Sandstein gebrochen und verarbeitet. Nicht nur im sogenannten „Großen Bruch“ („Beckenloch“), sondern auch südlich des Seidehofs („Seidebruch“), nordöstlich des Tiefen Sees („Weißer Bruch“) oder in



Abb. 4
Steinbruch Läpple im Gewann Beckenloch um 1890;
Foto: Stadtarchiv Maulbronn

den Gewannen „Wannenbach“, „Silahopp“, „Klosterberg“ und „Graubrunnen“ wurden umfassend Steine gebrochen; im Jahr 1897 waren es 200.000 Zentner. Damals arbeiteten in den Steinbruchbetrieben immerhin 350 bis 400 Männer.

Anfang des 20. Jahrhunderts hatten die Maulbronner Steinbrüche rund 380 Beschäftigte. So waren im ehemaligen Oberamt Maulbronn in Freudenstein 150, Sternenfels 30, Gündelbach 22, Knittlingen 69 und Oberderdingen 120 Steinbauer tätig. In diesen Orten waren die Steinbrüche mit Abstand die wichtigsten Arbeitgeber. Einige Schmiede und Zaisersweiherer Steinbauer arbeiteten in Maulbronn. Die Verdienstmöglichkeiten waren um die Jahrhundertwende in den Steinbrüchen noch recht gut, gingen aber wegen der großen Konkurrenz immer weiter zurück. Beispielsweise gab es 1897 in Schmie 125 Beschäftigte und zehn Jahre später nur noch 72. [13] 1902 übernahm Steinbauermeister Ludwig Seeburger aus Sulzfeld von seinem Schwager Jakob Krüger einen weiteren bedeutenden Steinbruch an der Stuttgarter Straße. Die Steine wurden damals zur Bearbeitung mit einem Pferdegespann auf den Werkplatz an der Frankfurter Straße (heute Fa. Common) gebracht. 1987 übernahm die Fa. Lauster den Seeburger'schen Steinbruch. [14]

Werksteine wurden für den Eisenbahnbau und seit der Gründerzeit z.B. nach Pforzheim, Stuttgart, Karlsruhe, Wildbad und Freiburg i.Br. verkauft. Auf dem Rhein wurde der Maulbronner Schilfsandstein bis nach Rotterdam geliefert. Mit vierrädrigen Fuhrwerken, vor die bis zu acht Pferde gespannt wurden, konnten die Steine über größere Strecken, u.a. bis nach Stuttgart, transportiert werden. Mit dem Pferdefuhrwerk wurden auch Steine vom Werkplatz zur Eisenbahnstation Maulbronn gebracht.

Das Alltagsleben der Steinbauer war sehr beschwerlich und gesundheitsverschleißend. Viele erkrankten an Silikose, auch Quarzstaublunge genannt. Wegen des schädlichen Staubs arbeiteten die Steinbauer in gut belüfteten Hütten, die deshalb mindestens auf einer Seite offen waren. In der Fachliteratur wurde als Schutzmaßnahme für die Atemwege zu einem „kräftigen Bart“ geraten (vgl. BURRER 1911: 21f.). Nach dem Reichsgesetzblatt von 1902 wurde aus Gesundheitsgründen die tägliche Arbeitszeit eines Steinbauers auf neun und eines Steinbrechers auf zehn Stunden begrenzt. [15]

Die Zahl der Steinbauer ging nach dem Ersten Weltkrieg deutlich zurück, was nicht allein mit der schlechten wirtschaftlichen Situation in der Weimarer Republik zusammenhing, vielmehr war der Na-

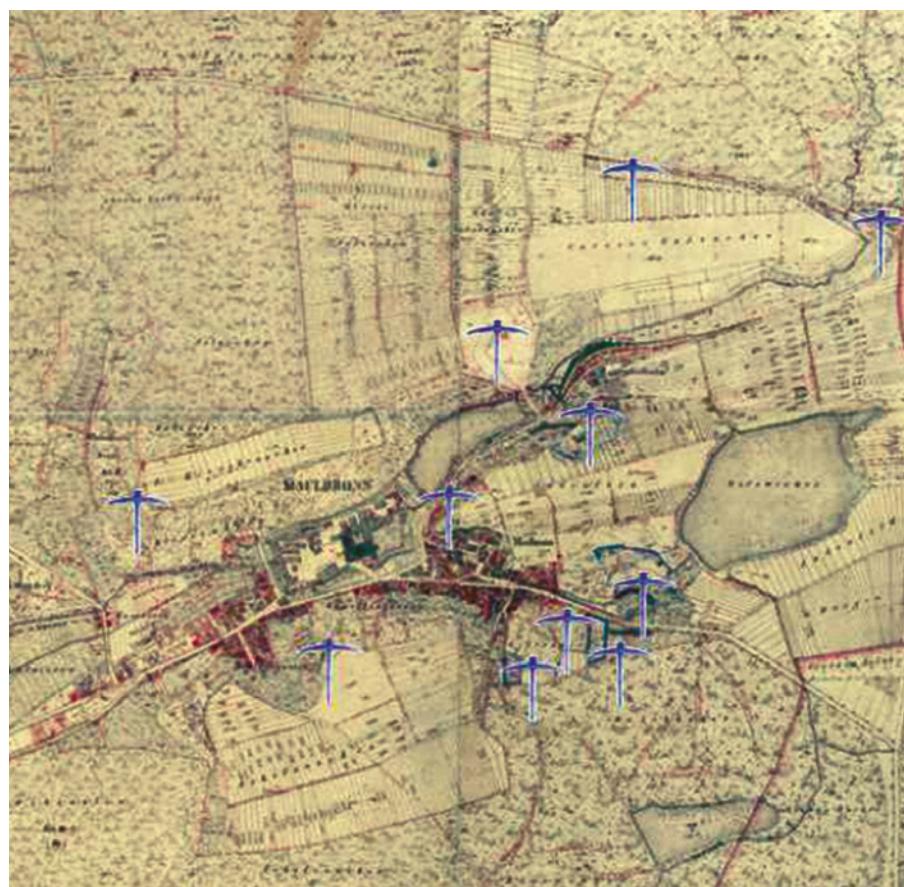


Abb. 5
Verteilung der Steinbrüche;
Vorlage: Stadtarchiv Maulbronn

turstein seit der Jahrhundertwende sukzessiv durch preiswertere Baumaterialien wie Zement, Beton oder Ziegelsteine verdrängt worden. Während des Zweiten Weltkriegs kam die Arbeit in den Maulbronner Steinbrüchen fast zum Erliegen. Erst wieder in der Nachkriegszeit brachten sich die Steinbruchbetriebe Burer und Seeburger vor allem beim Wiederaufbau sowie bei der Renovierung von öffentlichen Gebäuden, Geschäftshäusern und historischen Bauwerken ein. Auch beim Neubau von Gebäuden, Anlagen bis hin zu Grabmalen konnten und können die hiesigen Steinhauer ihr traditionsreiches Handwerk, das bildhauerisches Können voraussetzt, anwenden.



Abb. 6 Blick in die „Steinhauerstube“, das Dorfmuseum in Schmie; Foto: Stadtarchiv Maulbronn

Schafhof – ein Beispiel für die Höfe des Klosters Maulbronn
Östlich, nur wenige hundert Meter von der ehemaligen Zisterzienserabtei Maulbronn entfernt, liegt der auf dem Plateau eines klösterlichen Steinbruchs angelegte Schafhof. Noch immer ist die Bruchkante des gelben Sandsteinbruchs, dessen Steine für die romanischen Bauteile des Klosters verwendet wurden, deutlich sichtbar. Vermutlich wurde der Steinbruch aufgegeben, weil das hochwertigere Steinmaterial nur noch mit großem Aufwand aus den tiefer gelegenen Schichten hätte gebrochen werden können. Auf dem ausgebrochenen Steinbruchgelände, das zur

heutigen Stuttgarter Straße hin mit Steinbruchschutt aufgefüllt und mit Mauern eingefasst wurde, legten die Zisterzienser den Schafhof als klösterlichen Wirtschaftshof an. Der Hof war nicht nur mit einem teilweise noch heute erkennbaren Mauerring umschlossen, er wurde auch von der äußeren Wehrbefestigung der Klosteranlage geschützt. Nach dem Lagerbuch von 1725 war damals die Ummauerung bereits in großen Teilen eingefallen.

Im Lagerbuch von 1575 wurde der Schafhof noch als „Hof Steingrube“ bezeichnet, was unmissverständlich auf die ursprüngliche Nutzung des Geländes hinweist. [16] Zu Anfang des 17. Jahrhunderts



Abb. 7 Arbeit in der offenen Steinhauerhütte im Steinbruch Seeburger, 1949; Foto: Stadtarchiv Maulbronn

waren die Bezeichnungen „Schafhof, Ochsenhof oder -haus“ gebräuchlich, da auf dem Hofareal sowohl die Schäferei als auch der Ochsenmaststall lagen.

Bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts bestand der Schafhof aus drei Wohngebäuden, verschiedenen Stallungen, Scheunen, zwei Toren und einigen Gärten. Die dem Schafhof seinen Namen gebende Schäferei war nach dem Lagerbuch von 1725 vom übrigen Gut getrennt und an einen sogenannten „Bestandsschäfer“ verpachtet, der mit seiner Familie und den Knechten im „Schäfereihaus“ (Schafhof 8) mitten auf dem Hof wohnte. Phasenweise übernahm auch der Hofpächter die Schäferei. Damals umfasste die Schäferei rund 400 Tiere. [17] Die Förster betrachteten es mit Argwohn, wenn Schafherden durch die Wälder getrieben wurden, weil durch den Verbiss am Jungwuchs der Bäume Schaden entstand. Die Waldweide war grundsätzlich untersagt. [18]

Seit etwa der Mitte des 19. Jahrhunderts setzten in Folge der Gründung der politischen Gemeinde Maulbronn im Jahr 1838 die Veränderungen am Baubestand ein, die das Ensemble bis heute prägen: 1842 wurde ein Teil der Gebäude auf dem Schafhof für die junge Gemeinde Maulbronn „entbehrlich“ und zum Verkauf freigegeben, d.h. an den Meistbietenden veräußert. Gutspächter Christian Specht erwarb das Wirtschaftsgebäude (Schafhof 14) mit Hofraum und Michael Pfisterer eine Scheune mit Stallungen

(Schafhof 12). Das Schäfereiwohnhaus (Schafhof 8) mit Holzhütte und Garten kaufte Johann Martin Schäfer. [19] Zu diesem Anwesen kam 1862 die Hälfte des Schafstalls (Schafhof 4) dazu. [20] In den nächsten Jahrzehnten wurden auf dem und um den Schafhof von den Maulbronner Bürgern zahlreiche Gebäude errichtet. Unterhalb des Schafhofs entstand entlang der Stuttgarter Straße die sogenannte Vorstadt.

Der Schafhof wurde weiterhin landwirtschaftlich genutzt und war auch in seinem Erscheinungsbild entsprechend geprägt. 1905 gründete Karl Heinrich sein Bauunternehmen und begann noch im selben Jahr mit dem Bau des Wohnhauses von Adolf Notter auf dem Schafhof (16) (vgl. HEINRICH 1980: unpag.). Adolf Notter wurde 1924 genehmigt, auf seinem Anwesen eine Metallgießerei zu errichten, die bei den Nachbarn zunächst auf Widerstand stieß. Es wurde befürchtet, dass „die gesteigerte Feuergefährlichkeit der Anlage [...] große Gefahren für die unmittelbar neben der geplanten Anlage stehenden Scheuern“ mit sich bringen würde und „in Bälde ein Niederbrennen des ganzen Komplexes von Häusern und Scheuern (sog. Schafhof) zu erwarten sei“. Stadtschultheiß August Kienzle sprach sich für den Bau der Gießerei aus, weil nach seiner Auffassung von ihr „keinerlei Einfluss auf die Gefahrenklasse der Gebäude“ ausging und sich an der Nordseite die Felswand des einstigen Steinbruchs befand. Schließlich wurde die

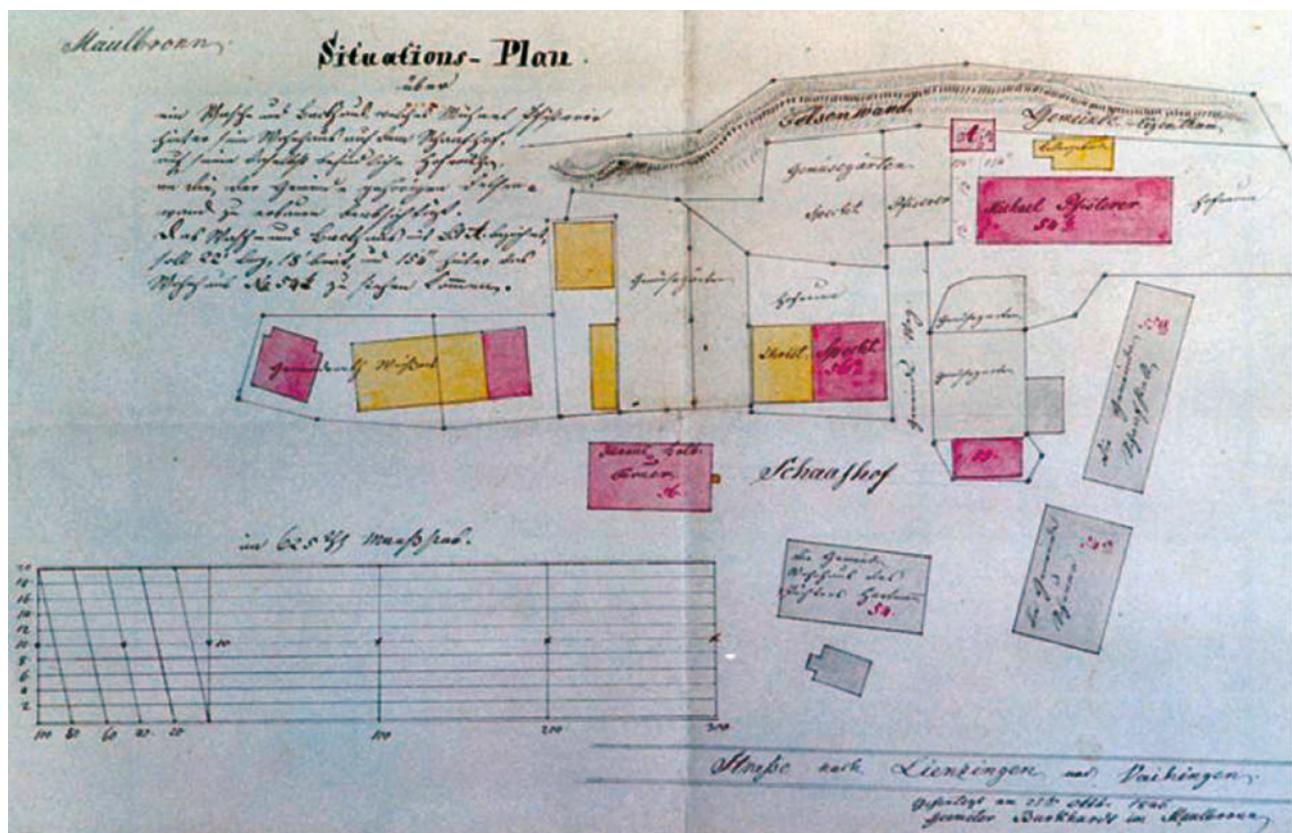


Abb. 8 „Situations-Plan“ über den Schafhof mit der „Felsenwand“ des ehemaligen Steinbruchs, 1846; Vorlage: Stadtarchiv Maulbronn

Gießerei von Adolf Notter auf dem Schafhof gebaut. Sie war neben der von Wilhelm Schenk im Jahr 1913 gegründeten Aluminiumgießerei der zweite, wenn auch mit Abstand kleinere Betrieb dieser Art in Maulbronn. [21]

Die reiche Geschichte des Schafhofs wird heute für alle Interessierten nachvollziehbar präsentiert: Der ehemalige Maulbronner Gemeindeschafstall (Schafhof 6) wurde von 2004 bis 2009 vom Geschichts- und Heimatverein Maulbronn mit großem ehrenamtlichem Engagement ausgebaut und zum Museum umgestaltet. Finanziell und konzeptionell wurde die museale Dauerausstellung von der Stadt Maulbronn unterstützt. Die seit den 1950er Jahren stark veränderte Fassade des Gebäudes wurde rückgebaut und in das malerische Fachwerk-Ensemble seiner Umgebung harmonisch eingefügt. Ein von der Auffahrt zum Schafhof hin erkennbares historisches Wirtshauschild lädt die Gäste zum Besuch des 2009 eröffneten „Museums auf dem Schafhof“ ein.

Der Aufsatz „Ein Bilderbuch der Geschichte und Geographie: Steinabbau in Maulbronn“ stammt aus der Tagungsdokumentation „Werksteinabbau und Kulturlandschaft. Chancen und Konflikte für das Natur- und Kulturerbe“. Die Veranstaltung fand am 22./23. März 2012 im Kloster Maulbronn statt. Herausgegeben wurde die Tagungsdokumentation vom Veranstalter, dem Bund Heimat und Umwelt in Deutschland (BHU), Bundesverband für Kultur, Natur und Heimat e. V., mit Sitz in Bonn. Dem BHU und den Bearbeitern Dr. Inge Gotzmann und Dr. Martin Bredenbeck sind wir für die freundliche Abdruckgenehmigung sehr verbunden.

Beim BHU kann die im Jahr 2013 erschienene Tagungsdokumentation unter folgendem Kontakt bestellt werden:

Bund Heimat und Umwelt in Deutschland (BHU)
Adenauerallee 68, 53113 Bonn
Tel. 0228 / 22 40 91; Fax: 0228 / 21 55 03
E-Mail: bhu@bhu.de; Internet: www.bhu.de
ISBN 978-3-925374-33-3

Da die Publikation ohne Schutzgebühr abgegeben wird, wird um eine Spende an den BHU gebeten.

Anmerkungen

- [1] Stadt Maulbronn. Sitzungsvorlage zur örtlichen Prüfung der Forsteinrichtungserneuerung 2011–2020 am 4.5.2011. Untere Forstbehörde: Landkreis Enzkreis. Forsteinrichterin: OFR'in Alexandra Radlinger. Regierungspräsidium Freiburg Referat 83: 10.
- [2] Hauptstaatsarchiv Stuttgart. Geistliche Längsbücher Kloster Maulbronn. Erneuerung über Maulbronn, 1725/1758. H 102/49 Bd. 9: Bl. 637r, 648r.
- [3] Stadtarchiv Maulbronn. Streitfall Gemeinde Maulbronn und Zaisersweiher 1842–1856. IV/1 A 117; vgl. dazu: EHLERS, M. (2000): Ortsgeschichte im Überblick (Grenzstreitigkeiten zwischen Zaisersweiher und Maulbronn). In: Zaisersweiher. Ein Lesebuch zur Ortsgeschichte. Maulbronn: 170–172.
- [4] Wie Anm. 2.
- [5] Hauptstaatsarchiv Stuttgart. Geometrischer Plan über die Herzogliche Clostersgemarkung Maulbronn (1761). N 1 Nr. 65.
- [6] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von herrschaftlichen Gütern und Gebäuden, 1795–1833. III/4 A 25.
- [7] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von Gütern und Gebäuden, 1823–1853. III/4 A 28; Stadtarchiv Maulbronn. Beilagen zu den Unterpfandsbüchern. Nr. 435. III/4 A 354; Stadtarchiv Maulbronn. Beilagen zu den Unterpfandsbüchern. Nr. 563. III/4 A 359; Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von Gütern und Gebäuden, 1895–1898. III/4 A 366.
- [8] Hauptstaatsarchiv Stuttgart. Annahme des Georg Jacob Fröhner von Knittlingen als Klosterauer in Maulbronn, 1798. A 502 L, Bü. 11.
- [9] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufbuch, 1870–1875. B 578, S. 249–256.
- [10] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von Gütern und Gebäuden, 1884–1890. (Nr. 65. Kaufvertrag Stuttgarter Immobilien & Baugeschäft – Sorge & Läpple über Bauhütte, Wohnhaus, Schmiedewerkstätte und Waschküche im Steinbruch Beckenloch, 1887.) III/4 A 364; Stadtarchiv Maulbronn. Kaufbuch 1886–1889. B 582. S. 67–76.
- [11] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von Gütern und Gebäuden, 1887–1895 (Nr. 49. Kaufvertrag Sorge & Läpple – Albert Burrel über Steinbrüche mit Gebäuden [u. a. Wirtschaftslokal, Wagner- und Schmiedewerkstätte] und Inventar im Beckenloch an der Lienzinger Straße,

- im Seidebruch an der Zaisersweiherer Straße und unterhalb des Salzackers, 1894.)
- [12] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufunterlagen von Gütern und Gebäuden, 1887–1895. III/4 A 365.
- [13] Stadtarchiv Maulbronn. Verhandlungen der Württembergischen Zweiten Kammer über die Bahnlinie Maulbronn-Sternenfels (u.a. Steinhauerbetriebe, Transport von Sandsteinen; Druckwerk), 1907. VIII/5 A 279; vgl. EHLERS 2003: 24.
- [14] Stadtarchiv Maulbronn. Seeburger, W.: Natursteinwerk Ludwig Seeburger, Maulbronn. Betriebschronik 1902–1986. 1. Teil. Typoskript, o.J. I/12.
- [15] Vgl. RGBI. Nr. 16. 22.3.1902: 78–80.
- [16] Hauptstaatsarchiv Stuttgart. Geistliche Lagerbücher Kloster Maulbronn. Erneuerung über Maulbronn, Elfingerhof, Scheuelberghof, 1575. H 102/49. Bd. 3: Bl. 74v.
In Maulbronn gehörten zu den Grangien der im Westen angesiedelte Elfinger Hof, der östlich des Klosters in einem ausgebrochenen Steinbruch angelegte Schaf- oder Ochsenhof (Steingrube) und der am Fuß des Scheuelbergs errichtete Scheuelberghof. Weitere, heute nicht mehr vorhandene Grangien waren Billensbach (Bullispach) unterhalb des Billensbacher Bergs und Salzach (Salzah) im Bereich des Salzackers.
In der Nähe zum Kloster kamen z.B. der Füllmenbacher Hof bei Diefenbach sowie der Steinbachhof bei Gündelbach im Lauf der zweiten Hälfte des 12. Jahrhundert in den Besitz der Abtei Maulbronn und wurden in Grangien umgewandelt. 1156 verfügte das Kloster über insgesamt elf Grangien, deren Zahl bis 1177 auf 17 anstieg. Ausführlicher wird die Geschichte der Maulbronner Grangien bzw. Höfe in: EHLERS & FELCHLE (2012), Band I: 177–221, dargestellt.
- [17] Wie Anm. 2: Bl. 578v.
- [18] Wie Anm. 2: Bl. 374v; Hauptstaatsarchiv Stuttgart. Klosterverwaltung Maulbronn. Verleihung der eigenen Schäferei an Christoph Heinrich Barth, 1796–1814. A 284/60 Bü. 479.
- [19] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufbuch, 1840–1847. B 575: Bl. 78v–81r; Stadtarchiv Maulbronn. Gemeinderatsprotokoll, 1840–1843. B 155: Bl. 262v–264v.
- [20] Stadtarchiv Maulbronn. Kaufbuch, 1857–1870. B 577: 243–246; Stadtarchiv Maulbronn, Gemeinderatsprotokoll, 1858–1869. B 158: 207–210.
- [21] Stadtbauamt Maulbronn. Bau-Akten, Schafhof 14.

Literatur

- Burrer, A. (1911): Der Steinhauer an der Arbeit. Eine praktische Abhandlung. Esslingen.
- Ehlers, M.; Felchle, A. (Hg., 2000): Zaisersweiher. Ein Lesebuch zur Ortsgeschichte. Maulbronn.
- Ehlers, M. (Hg., 2003): Kleine Chronik von Schmie. Auf den Spuren der ‚starken‘ Männer des Steinhauerdorfes ... Maulbronn.
- Ehlers, M.; Felchle, A. (Hg., 2012): Maulbronn Heimatbuch. Bd. I u. II. Maulbronn.
- Entwicklungsgutachten der Stadt Maulbronn (1979): Planungsgruppe Prof. H. D. Lutz + Partner, Stuttgart, und Landsiedlung Baden-Württemberg GmbH, Stuttgart. I. A. der Stadt Maulbronn.
- Heinrich, K. (Hg., 1980): 75 Jahre Bauunternehmung Karl Heinrich. Mühlacker.
- Landesarchivdirektion Baden-Württemberg (Hg., 1976): Das Land Baden-Württemberg. Amtliche Beschreibung nach Kreisen und Gemeinden. Bd. V. Regierungsbezirk Karlsruhe. Stuttgart.
- Leroux-Dhuys, J.-F. (1998): Die Zisterzienser. Geschichte und Architektur. Köln.
- Varchmin, J.; Radkau, J. (1984): Kraft, Energie und Arbeit. Energie und Gesellschaft. Hg. vom Rowohlt Taschenbuch Verlag und Deutschen Museum. Reinbek.

Abkürzungen

- (ohne gebräuchliche Maße und Gewichte)
- Bl. = Blatt
- r = Recto ([Blatt]vorderseite)
- v = Verso ([Blatt]rückseite)
- Hg., hg. = Herausgeber, herausgegeben
- RGBL. = Reichsgesetzblatt
- unpag. = unpaginiert
- vgl. = vergleiche
- zit. in = zitiert in

Daniele Coiro
Projektleiter
Vermögen und Bau Baden-Württemberg,
Amt Ravensburg
Minneggstraße 1, 88214 Ravensburg
Daniele.Ciro@vbw.bwl.de

Axel Dominik
Dominik Ingenieurbüro
Griegstraße 16, 53332 Bornheim-Merten
info@dominik-ingenieurbuero.de

Frank Eger
Diplomrestaurator
Dorfbachstr. 10, 72336 Balingen
frankeger@gmx.de

Martin Ehlers
Stadtarchivar
Stadtarchiv Maulbronn
Klosterhof 31, 75433 Maulbronn
ehlers@maulbronn.de

Prof. Dipl.-Ing. Gerhard Eisele
Fachhochschule Potsdam
Kiepenheuerallee 5, 14469 Potsdam
eisele@fh-potsdam.de

Prof. Dr. rer. nat. Gabriele Grassegger
Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart
Fak. Bauingenieurwesen, Bauphysik u. Wirtschaft
Labor für Bauchemie „Denkmalerhaltung,
Altbauerhaltung (Conservation Sciences)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
gabriele.grassegger@hft-stuttgart.de

Dr. Friedrich Grüner
Diplom-Geologe
MPA Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart
friedrich.gruener@mpa.uni-stuttgart.de

Dr.-Ing. Andreas Hasenstab
Ingenieurbüro Dr. Hasenstab
Carron-du-Val Str. 17, 86161 Augsburg
zfp@hasenstab.de

Prof. Dr. Christoph Herm
Hochschule für Bildende Künste Dresden
Archäometrie und naturwissenschaftl. Forschung
in der Konservierung/Restaurierung
Güntzstr. 34, 01307 Dresden
herm@hfbk-dresden.de

Dr. Georg Hilbert
gh-DenkMalPlan
Hollehochstr. 37, 39110 Magdeburg
office@gh-denkmalplan.de

Dipl.-Rest. (FH) Sarah Hutt, M. Eng.
Institut für Bauforschung (ibac) d. RWTH Aachen
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen
hutt@ibac.rwth-aachen.de

Albert Kieferle
AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

Sabine Koch
Dominik Ingenieurbüro
Griegstraße 16, 53332 Bornheim-Merten
info@dominik-ingenieurbuero.de

Dr. rer. nat. Martin Krause
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Martin.Krause@bam.de

Walter Kreisl
Abteilungsleiter
Vermögen und Bau Baden-Württemberg,
Amt Ravensburg
Minneggstraße 1, 88214 Ravensburg
Walter.Kreisl@vbw.bwl.de

Thomas Kreißl
AeDis AG
Im Hof 17, 73269 Hochdorf
info@aedis-denkmal.de

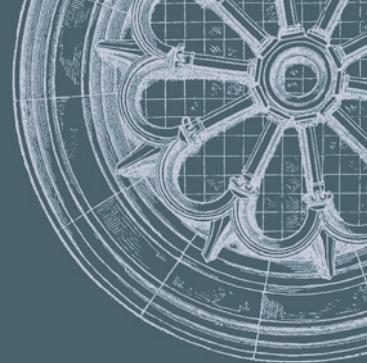
Till Läpple
strebewerk. Riegler Läpple
Partnerschaft Diplom-Ingenieure
Reinsburgstraße 95, 70197 Stuttgart
mail@strebewerk.de

Holger Probst
Projektleiter
Vermögen und Bau Baden-Württemberg,
Amt Pforzheim
Simmlerstraße 9, 75172 Pforzheim
Holger.Probst@vbw.bwl.de

Stefan Schädel
strebewerk. Riegler Läpple
Partnerschaft Diplom-Ingenieure
Reinsburgstraße 95, 70197 Stuttgart
mail@strebewerk.de

Dipl.-Geol. Dr. Wolfgang Werner
Leiter des Referats Landesrohstoffgeologie am
Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
(LGRB) Regierungspräsidium Freiburg
Albertstr. 5, 79104 Freiburg i. Br.
wolfgang.werner@rpf.bwl.de

Hermann Zettler
Amtsleiter
Vermögen und Bau Baden-Württemberg,
Amt Ravensburg
Minneggstraße 1, 88214 Ravensburg
hermann.zettler@vbw.bwl.de

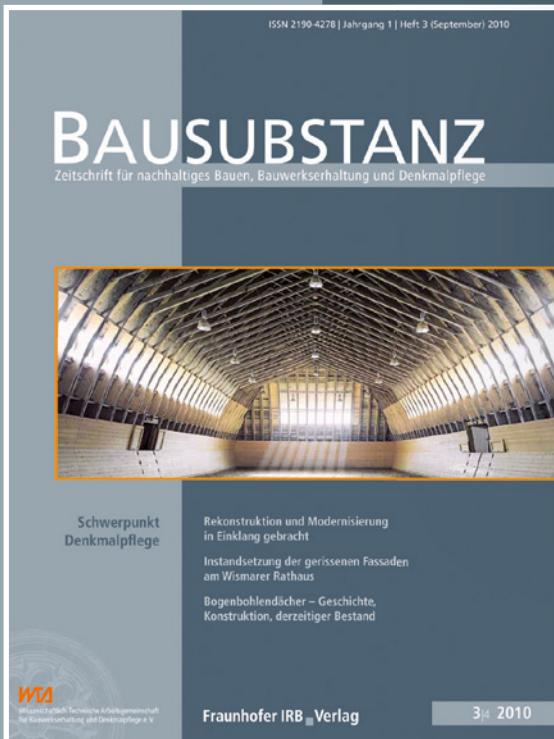


NEUES WISSEN FÜR ALTE BAUWERKE

BAUSUBSTANZ

Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

www.bausubstanz.de



Auch als E-Journal – für Abonnenten kostenfrei

ca. 80 Seiten je Heft
ISSN 2190-4278
erscheint viermal im Jahr

Die **BAUSUBSTANZ** ist eine Fachzeitschrift für alle, die sich professionell mit der Instandhaltung, Sanierung, Restaurierung und Pflege alter Bauwerke beschäftigen. Mit einer Mischung aus Reportagen über gelungene Sanierungsobjekte, der Vorstellung von Techniken, Baustoffen und Verfahren sowie wissenschaftlichen Beiträgen bietet Ihnen die **BAUSUBSTANZ** viermal im Jahr Neues, Bewährtes und Wichtiges aus dem weiten Feld der Bausanierung.

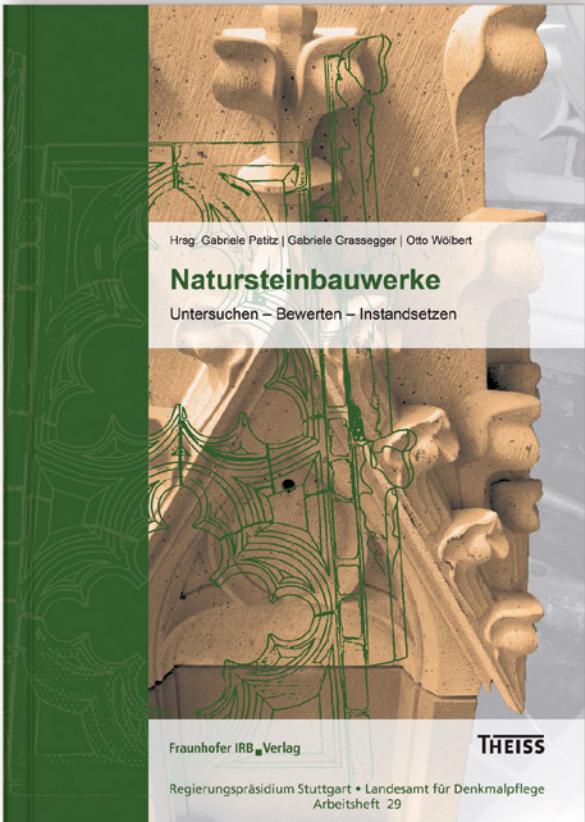
Fraunhofer IRB Verlag

Der Fachverlag zum Planen und Bauen
www.baufachinformation.de

Bestellung:
Tel. 0711 970-2500 | Fax -2508 | E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

Natursteinbauwerke

Hrsg.:
Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger,
Otto Wölbert



Natursteinbauwerke

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2014, 300 Seiten, zahlr. Abbildungen und Tabellen, Kartoniert
ISBN 978-3-8167-9196-6

E-Book: ISBN 978-3-8167-9197-3
BuchPlus: ISBN 978-3-8167-9373-1

Der Bestand an historisch bedeutsamen Natursteinbauwerken ist erheblich – deren Bausubstanz ist aber stark gefährdet. Um sie zu schützen und zu restaurieren ist ein behutsamer Umgang mit möglichst minimalen Eingriffen in die Originalsubstanz nötig.

Für die Erfassung und Bewertung von Schäden sowie für die Planung und Ausführung von Instandsetzungen ist ein umfassendes Fachwissen erforderlich, das dieses Buch liefert. Es befasst sich ausführlich mit der sinnvollen Bestandsaufnahme am Gebäude, der Kartierung von Schäden sowie geeigneten Sanierungsmaßnahmen. Die zahlreichen Autoren gehen dabei gezielt auch auf planerische Aspekte, Strategien zur Schadensprävention und aktuelle Normen ein.

Bestellung:
Tel. 0711 970-2500 | irb@irb.fraunhofer.de

Fraunhofer IRB Verlag
Der Fachverlag zum Planen und Bauen
www.bauinformation.de

*Die angegebenen Euro-Preise gelten für Deutschland. Für Österreich und die Schweiz gelten die Preise als unverbindliche Preisempfehlung.

ISBN 978-3-8167-9404-2



9 783816 794042

Hochschule für Technik Stuttgart

Fakultät B, Bauingenieurwesen

IGP Ingenieurbüro
Dr. Ing. Gabriele Patitz



in Zusammenarbeit mit



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄIDIUM STUTTGART
LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE