



naturstein sanierung stuttgart 2013

Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse
und messtechnische Erfassungen

15. März 2013

Fraunhofer IRB Verlag

<https://doi.org/10.51202/9789618780253> - Generiert durch IP 216.78.216.36, am 22.01.2025, 01:40:45. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts in Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

Natursteinsanierung Stuttgart 2013

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen
sowie Sanierungsbeispiele**

Tagung am 15. März 2013 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

Fakultät Bauingenieurwesen, Fachgebiet: Bauchemie und Baustoffkunde

Hochschule für Technik (HFT)

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

Fraunhofer IRB Verlag – Stuttgart

Einband

Maßwerke an der Oktogonhalle des Westturms, Freiburger Münster.

Foto: Archiv Münsterbauverein

Fotogrammetrie: Bildmessung GmbH

1. Auflage

2013 Fraunhofer IRB Verlag,

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

ISBN (Print): 978-3-8167-8924-6

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8925-3

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 Teilnehmer/innen, liebe Leser/innen,

wir begrüßen Sie ganz herzlich zur 19. Fachtagung Natursteinsanierung an der HFT in Stuttgart und wünschen Ihnen einen interessanten interdisziplinären fachlichen Austausch. Zu den Teilnehmern gehören wieder Denkmalpfleger, Restauratoren, Architekten, Ingenieure, Anwender und ausführende Firmen sowie Kollegen aus der Forschung und Lehre. Neben einem vielfältigen Vortragsprogramm haben Sie die Möglichkeit, sich an Firmenständen über neue und altbewährte Produkte und Sanierungsverfahren zu informieren, Kontakte zu knüpfen und Erfahrungen auszutauschen. Außerdem stellt sich der Verband der Restauratoren (VDR) mit verschiedenen Fachrichtungen vor. Aktuelle Fachliteratur finden Sie an den Informationsständen des Beuth-Verlages, des Fraunhofer IRB Verlages und am Stand des Landesdenkmalamtes B.-W. Esslingen.

Die Vorträge werden von umfangreichen Fachartikeln in diesem Band begleitet, die den Kenntnisstand erweitern und neue Verfahren und Erkenntnisse vorstellen sollen. Themen sind u. a. die Konservierung und Restaurierung von englischem Alabaster und belgischem Kohlekalkstein in der Bildkunst der norddeutschen Renaissance, die Konservierung von frei bewittertem römischen Ziegelmauerwerk bei den Kaiserthermen Trier, die Simulation von Mauerwerken, um die besten Fugenmörtel auszuwählen, der Erhalt von Skulpturen aus vulkanischem Gesteinsmaterial unter Wassereinfluss sowie die statische Ertüchtigungen der Wasserspeicher am Westwerk des Magdeburger Doms.

Weiterhin wird die Anwendung der Software metigo® als moderne Methode zur Dokumentation für die Restaurierung in einem Vortrag und am Informationsstand vorgestellt.

Die diesjährige Exkursion führt uns zum Freiburger Münster. Die Münsterbaumeisterin Yvonne Faller stellt uns die Arbeitsweise der Freiburger Münsterbauhütte vor und wird uns mit ihren Mitarbeitern Einblicke in die Werkstätten ermöglichen. Weiterhin werden Führungen unter fachlicher Leitung des Landesamtes für Denkmalpflege zum Münster und zu aktuellen Arbeiten am Münster stattfinden.

Mit den ausgewählten Referenten, Vorträgen und Informationsständen wollen wir Ihnen wieder zwei spannende und anregende Tage bieten. Nutzen Sie die Chance des fachlichen Austausches und nehmen Sie viele neue Anregungen in Ihren Alltag mit!

Den Teilnehmern der Tagung und auch Ihnen als Leser wünschen wir eine interessante Lektüre.

Gabriele Patitz

Gabriele Grassegger

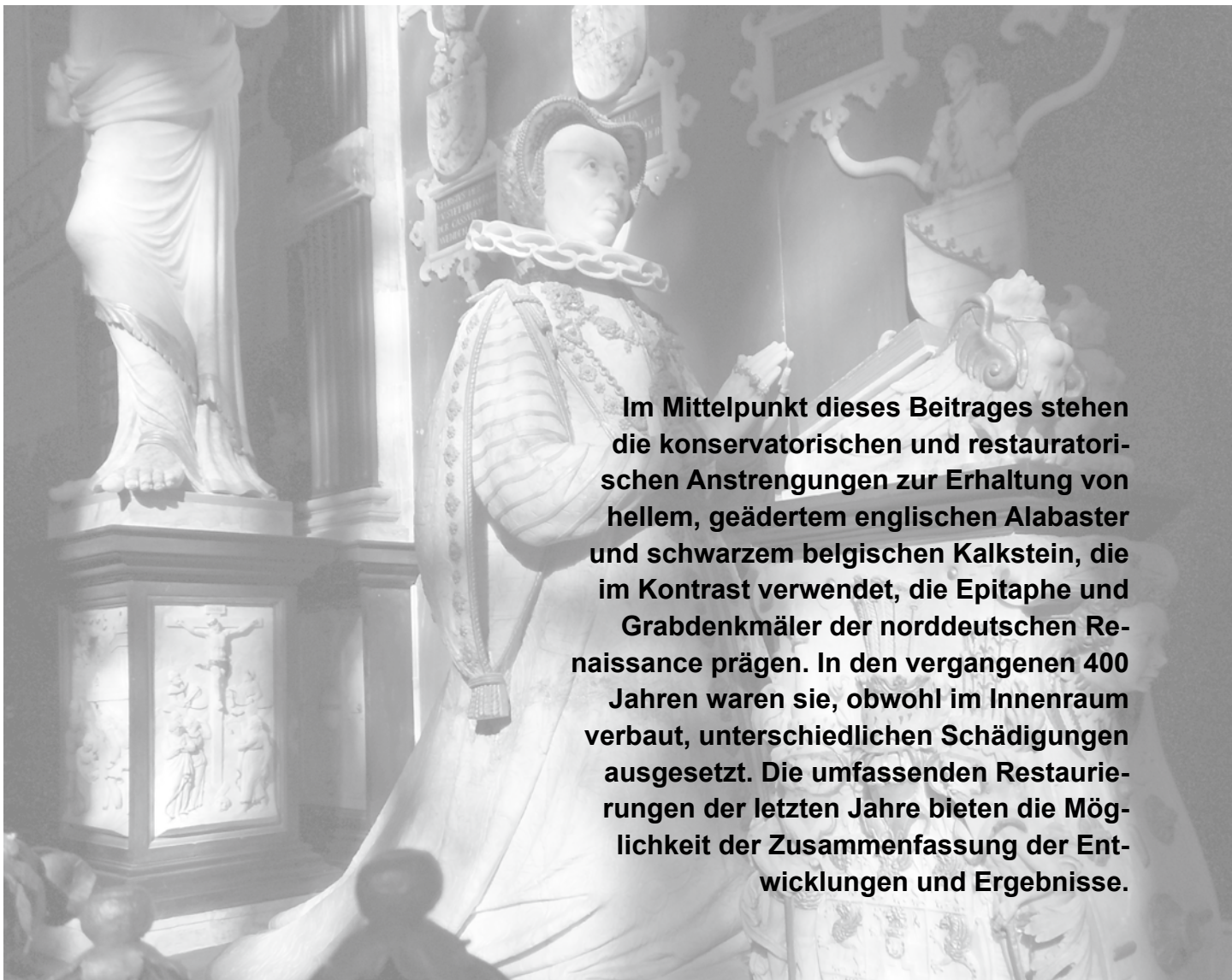
Otto Wölbert

Boris Froberg Michael-Christian Kremppler	Die Konservierung und Restaurierung von englischem Alabaster und belgischem Kohlekalkstein in der Bildkunst der norddeutschen Renaissance	7
Hans Michael Hangleiter	Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur Konservierung von frei bewittertem römischem Ziegelmauerwerk	21
Friedrich Grüner	Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Nachhydrophobierung am Kapellenturm in Rottweil	33
Eberhard Wendler Helen Jacobsen María Paula Álvarez Esther von Plehwe-Leisen Hans Leisen Ute Steinhäuser	Zu viel oder zu wenig? Die unterschiedlichen Funktionsweisen von Wasser bei der Zerstörung wertvoller Oberflächen aus vulkanischen Gesteinsmaterialien	43
Oliver Hornung	Suevit ein Gestein aus dem Nördlinger Ries – Restaurierung eines historischen Grabdenkmals am Friedhof St. Emmeram zu Nördlingen	53

Daniel Lehn Roland Fink Gabriele Grassegger	Welcher Fugenmörtel ist bei Sanierungen von historischen Mauerwerken aufgrund der Belastungen am besten?	65
Gunnar Siedler Sebastian Vetter	Moderne Methoden der Dokumentation für die Restaurierung – Digitale Kartierung und automatisierte 3D-Objektdokumentation mit der Software metigo®	77
Ronald Betzold	Magdeburger Dom Statische Ertüchtigungen am Westwerk Spezialverankerung der Hauptportal-Wasserspeier	89
Peter Schneider	Der Apollontempel in Didyma – Monumentalität und Präzision	103
Yvonne Faller	Die Arbeitsweise der Freiburger Münsterbauhütte	109
	Autorenverzeichnis	118

Die Konservierung und Restaurierung von englischem Alabaster und belgischem Kohlekalkstein in der Bildkunst der norddeutschen Renaissance

von Boris Froberg und Michael-Christian Krempler



Im Mittelpunkt dieses Beitrages stehen die konservatorischen und restauratorischen Anstrengungen zur Erhaltung von hellem, geädertem englischem Alabaster und schwarzem belgischem Kalkstein, die im Kontrast verwendet, die Epitaphe und Grabdenkmäler der norddeutschen Renaissance prägen. In den vergangenen 400 Jahren waren sie, obwohl im Innenraum verbaut, unterschiedlichen Schädigungen ausgesetzt. Die umfassenden Restaurierungen der letzten Jahre bieten die Möglichkeit der Zusammenfassung der Entwicklungen und Ergebnisse.

1 Einleitung

Die steinernen Bildwerke der Renaissance im nord-deutschen Raum zeigen übergreifend stilistische und materialspezifische Gemeinsamkeiten. Der Schwerpunkt lag oft auf dem Zusammenspiel von schwarzem Kalkstein und hellem Alabaster. Für tragende Teile, wie Säulen und Pfeiler kommt häufig auch noch roter Kalkstein (französischer Kalkstein *Rouge Griotte* oder gotländischer *Hoburgen-Marmor*) zur Anwendung. Diese Materialkombination ist als zeittypisch anzusehen. Bei dem farblichen Kontrast der Materialien wird von Anfang an von der Materialästhetik der Natursteine ausgegangen und damit eine bewusste Abkehr von den mittelalterlichen Gestaltungsidealen angezeigt. Die plastischen und figürlichen Dekorationen sind meistens durch partielle Auf- oder Auslagen aus Blatt- oder Muschelgold akzentuiert, außerdem sind die vertieften oder auch erhabenen Schriften vergoldet oder ausgelegt worden (Abb. 1).

Die belgischen Kalksteine sowie der Alabaster wurden nach der Bearbeitung geschliffen und teils hochglänzend poliert. Hierbei kamen auch Wachse und Harze zum Einsatz. Dadurch wird der Kontrast der tiefschwarzen Kohlenkalksteine, der stark geäderten *Rouge-Griotte* Kalksteine und des milchig-weißen Alabasters erheblich gesteigert. Es sind vereinzelt auch polychrome Farbfassungen bekannt.

Die umfassenden Restaurierungen der letzten Jahre am Fürstenepitaph im Münster zu Bad Doberan, am Grabmal Herzog Christoph im Dom zu Schwerin, am Dorotheenepitaph und Ulrichmonument im Dom zu Güstrow (Abb. 2) sowie an den Bodenplatten aus der Schlosskirche zu Schwerin (Abb. 16) fanden im Zeitraum 2006–2013 statt. Sie wurden durch den Autor selbst ausgeführt bzw. von ihm geleitet und bieten die Möglichkeit der Darstellung der Entwicklungen und

Ergebnisse. Zum einen werden die Hintergründe, die Geologie und die Schäden sowie Veränderungen beleuchtet. Zum anderen werden die konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen aufgezeigt.

2 Betrachtungen zur Stilistik

Die plastisch bearbeiteten Natursteinbauteile liegen meist in der Kombination von Putten, Engeln, Allegorien, Arabesken, Grottesken, Mauresken, Voluten, Kartuschen, Roll-, Knorpel- und Schweifwerk, Wappen und Wappenschilden, Speeren usw. vor. Sie gehen auf die sogenannte Florisschule aus Mechelen/Antwerpen zurück. Diese Schule hat ihre eigene Stilistik entwickelt. Sie baut auf den aus Italien kommenden „modernen“ Ornamentstil auf. Die flämischen Bildhauer und Bildschnitzer kombinierten die in dieser Zeit wieder bekannt gewordenen antikisierenden Formen mit Ornamenten, die den Metallbeschlägen von Truhen, Schränken und Türen entlehnt sind. Diese Formenkombination wird als Florisstil oder Beschlagwerkstil bezeichnet. Er findet sich in der Wandmalerei, der Schnitzkunst, in Stukkaturen und in der Bildhauerkunst gleichermaßen. Im Unterschied zum mittelalterlichen Gestaltungsideal der vollständigen Überfassung von Natursteinoberflächen und der Materialimitation von wertvolleren Oberflächen trat in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts auch in Nord-europa die Steinsichtigkeit in den Vordergrund. Die Farbfassungen auf Natursteinbildwerken der Renaissance dienen aber auch der Veredelung steinsichtiger Oberflächen (Abb.1, 28).

Die Verbreitung des Florisstils beschränkt sich weitgehend auf die protestantischen Gebiete. Von London über Tournai im Westen bis Königsberg im Osten, von Prag und Freiberg im Süden bis Uppsala im



Abb. 1: Ulrich von Mecklenburg, Alabaster, Endzustand



Abb. 2: Elisabeth von Dänemark am Ulrichmonument im Endzustand

Norden. Carsten Neumann zeigt, dass die flämische Bildhauerschule von Mechelen als stilbildend für den nordeuropäischen Raum anzusehen ist. Es existierte dort vermutlich eine ausgedehnte Relief- und Statuettenproduktion [4]. Diese wurden erst vor Ort montiert (z.B. Freiberg Dom, Grabmal Moritz von Sachsen, 1560). Für die Reliefs innerhalb der Bildwerke sind die durch überregionale Verbreitung bekannten Holzschnitte, z.B. die Großen Holzschnittpassion Albrecht Dürers und die Kupferstiche der niederländischen Kupferstecherfamilie Sadeler (z.B. Magdeburg Domkanzel), aber auch Zeichnungen (z.B. Dekormusterblätter) des flämischen Baumeisters und Bildhauers Cornelius Floris, als Vorbilder oder als Inspirationsquelle anzusehen.

Bei den bearbeiteten Grabdenkmälern zeigt sich eine üppige Formsprache, die keine protestantische Nüchternheit und Sparsamkeit erkennen lässt. Sie gehören zweifellos zu den in dieser Zeit aufwendigsten und qualitativsten Bildhauerarbeiten nördlich der Alpen.

3 Die Gesteine

3.1 Herkunft der verwendeten Materialien

Der schwarze Kalkstein und der helle Alabaster sind weitgehend monomineralisch und zeigen keinen „ortstypischen“ Fossilinhalt oder typische Struktur- oder Texturmerkmale. Daher ist eine sichere Herkunftsangabe nur allein aus makroskopischer Bemusterung und Dünnschliff nicht möglich. Beide Gesteine kommen in Europa an mehreren Stellen vor und wurden bzw. werden abgebaut. Dennoch soll und kann hier auch im Zusammenhang mit geschichtlichen und kunsthistorischen Kenntnissen eine Zuordnung versucht werden. Durch die Dissertation von Carsten Neumann kennt man die Quellenlage und kann diese mit den petrographischen Ergebnissen in Übereinstimmung bringen.

Kohlenkalk

Die deutschen Vorkommen eines weitgehend unifarbene schwarzen Kalksteins befinden sich im Lahn-Gebiet (sog. „Lahnmarmor“, schwarz: bei Schupbach – „Schupbach schwarz“). Dieser ist ein eher dunkelgrauer Kalkstein mit weissen Kluffüllungen. Eine grössere Bedeutung als Werkstein erlangte er im 19. Jahrhundert. Sehr viel bedeutender in der bildhauerischen Verwendung sind die dunkelgrauschwarzen Kalksteine des Unterkarbon von Dinant – Namur – Tournai in Belgien. Diese Kalke werden als „Bleu Belge Noir“, „Marbre Noir“, „Noir Belge Uni“ und unter weiteren Handelsnamen seit langem europaweit als Werksteine verwendet.



Abb. 3: Königsbüste am Ulrichmonument, Vorzustand



Abb. 4: Büste am Ulrichmonument, Vorzustand



Abb. 5: Portrait Ulrich von Mecklenburg, Alabaster

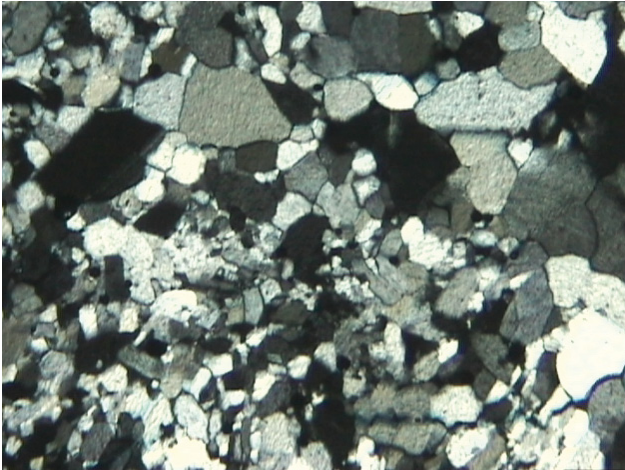


Abb. 6: *Alabaster vom Dorotheenepitaph, Probe Gü-Dom-De-01/08*
Dünnschliffphoto, X POL, untere Bildkante
2,3mm, fein-bis mittelkörnige Gipskristalle

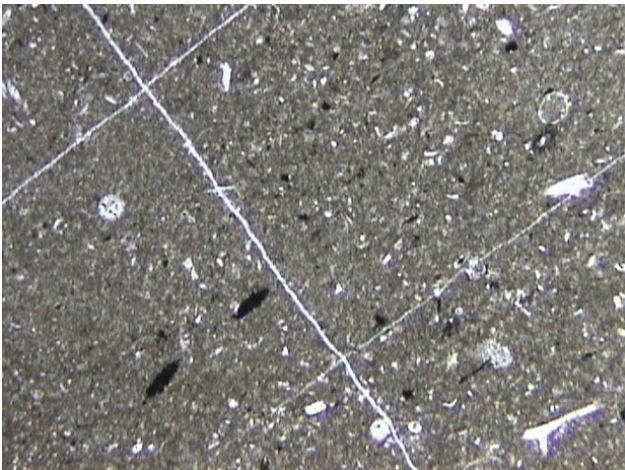


Abb. 7: *Kalkstein vom Dorotheenepitaph, Probe Gü-Dom-DE-02/08*
Dünnschliffphoto, II POL, untere Bildkante
2,3mm, feinstkörnige mikritische Matrix (dunkel) mit rekristallisierten Mikrofossilien und einem orthogonalen Kluftsystem

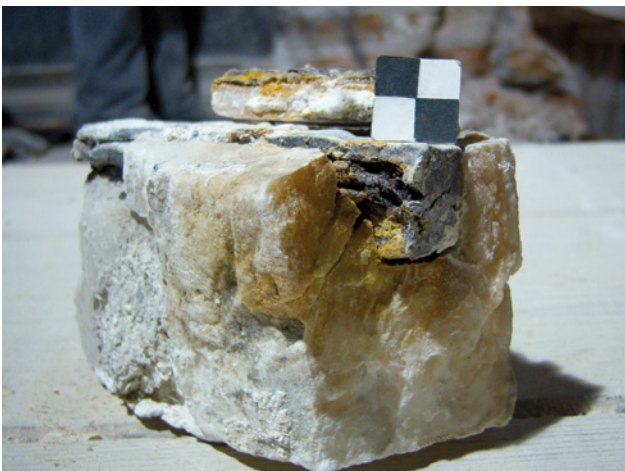


Abb. 8: *Rostschädigung am Alabaster, Ulrichmonument*

Alabaster

In Deutschland wurde Alabaster vom Mittelalter bis in die Neuzeit wechselnd und meist zeitlich begrenzt an verschiedenen Stellen abgebaut, z.B. Thüringen (Ruhla, Kittelsthal), Harz (Heldburg, Nordhausen), Fulda-Werra-Tal, Steigerwald (Iphofen), Hohenlohe und Koblenz. Die abgebauten Varietäten waren meist grauweiss, häufig gebändert, selten reinweiss. Zum Teil bestanden sie aus einer Paragenese von Gips und Anhydrit.

Bedeutende außerdeutsche Vorkommen fanden sich in Burgund, Lothringen (bei Metz, hier meist marmoriert) und v. a. in der Toskana (Volterra – bis heute bedeutende Alabasterindustrie; Alabaster überwiegend weiss oder schwach geadert) und in Mittelengland (Derbyshire, Staffordshire; Alabaster überwiegend weiss, gelblich verwitternd). Während der Alabaster von Volterra zumeist in bis zu kopfgrossen knollenförmigen Aggregaten vorkommt, ist der englische Alabaster schichtig-tafelig. Die grössten Schichtmächtigkeiten liegen hier bei rund ½ Meter. Der Alabaster wurde in grossen Tafeln gebrochen und konnte, in kleinere Platten geteilt, leicht auch über weite Wege transportiert werden. Die Herkunft der Gesteine an den restaurierten Bildwerken kann beim Alabaster grob mit Nottingham und beim Kalkstein grob mit Tournai angegeben werden. Die Alabasterbrüche in England sind inzwischen eingestellt. Nach unserem Wissen bezieht sich das auch auf die Brüche in Belgien.

3.2 Petrographische Untersuchung

Beschreibung Alabaster (Abb. 6)

Modalbestand: Die Proben bestehen ausschliesslich aus Gips. Dieser zeigt ein unregelmässiges Kristallgefüge und eine reine „Korn“bindung. Der Gips tritt sowohl idiomorph in Form leistenförmiger Kristalle als auch xenomorph und ohne erkennbare Kristallform auf. Die Kristallgrössen liegen bei 0,04–0,15mm. Die wasserfreie Form des Calciumsulfats (Anhydrit) konnte nicht beobachtet werden.

Beschreibung Kohlenkalkstein (Abb. 7)

Modalbestand: Die Proben bestehen zu über 90 % aus mikritischem Calcit (Korngrösse <5µm) als Grundmasse. Der Kalkstein zeigt ein matrixgestütztes Schlammgefüge. Die Allochemie sind in beiden Proben Mikrofossilien mit Grössen von 0,03–0,07mm. Hierbei handelt es sich um dünne Muschelschalen (Filamente), Foraminiferen (meist rund, selten gekielte Formen) sowie calcitische Ausgüsse von Radiolarien. Makroskopisch ist das Gestein im Werkstück völlig ungeschichtet, lagige organogene Bestandteile



Abb. 9: Rostschädigung mit Brüchen am Alabaster, Ulrichmonument



Abb. 10: Salzsäure-Schädigung am Alabaster und Kalkstein, Pilaster des Ulrichmonumentes



Abb. 11: Wappen vom Ulrichmonument mit Rissen im Vorzustand

zeichnen aber teilweise die Schichtung nach. Diese Bestandteile verleihen dem Gestein auch die dunkle Farbe und verursachen beim Anschlagen den typischen Geruch nach faulen Eiern (daher auch die Bezeichnung „Stinkkalk“). Unabhängig von der Schichtung durchziehen mit sparitischem Kalzit verheilte Klüfte die Proben. In beiden Proben ist ein +/- orthogonal zueinander stehendes Kluftsystem zu beobachten.

4 Schadbild

Verschmutzungen, Ver- und Abwitterungserscheinungen, spätere Überfassung und auch „Restaurierungen“ haben den ursprünglichen Eindruck häufig stark verändert oder vollständig verschwinden lassen. Die besonders im sakralen Bereich angestrebte „Entmaterialisierung“, wie es der Arzt und Kunsthistoriker Dr. Pocher (Güstrow) sagt, ist damit verloren gegangen (Abb. 3–4). Die Farbfassung ist in weiten Bereichen reduziert. Teilweise sind starke Strukturschäden an den Naturwerkstücken zu beobachten (Abb. 10, 15).

Die vorhandene Feuchtigkeit im Wand- und Epitaphbereich (bis zu 25 M.-% (durch Trocknung und Wägung ermittelt)) fördert den Transport von wasserlöslichen Salzen aus dem Mauerwerk. Diese sind als Hauptursache der Schädigungen anzusehen, denn die Salze wandern in die entstehenden Hohlräume und Risse ein und lagern sich dort ab. Partiiell waren zudem statisch-konstruktive Probleme zum Beispiel Verformungen und Setzungsrisse sowie zahlreiche Ergänzungen und Veränderungen festzustellen, die auf frühere Reparaturmaßnahmen hinweisen. Die Bauteile zeigen Schäden durch die korrodierte Tragkonstruktion. Diese konnten die Lasten teilweise nicht mehr ausreichend aufnehmen.

Die hellen, aus Alabaster gefertigten Teile sind in ihrer Leuchtkraft und Transparenz deutlich getrübt. Teilweise sind die Oberflächen durch frühere säurehaltige Reinigungsmaßnahmen (vermutlich 19. Jahrhundert) geschädigt. Durch Volumenvergrößerungen infolge von Korrosionserscheinungen sind Risse und Brüche zu Verzeichnen (Abb. 8–11). Alabaster gilt als



Abb. 12: Wappendetails vom Ulrichmonument, links gereinigt und rechts ungereinigt

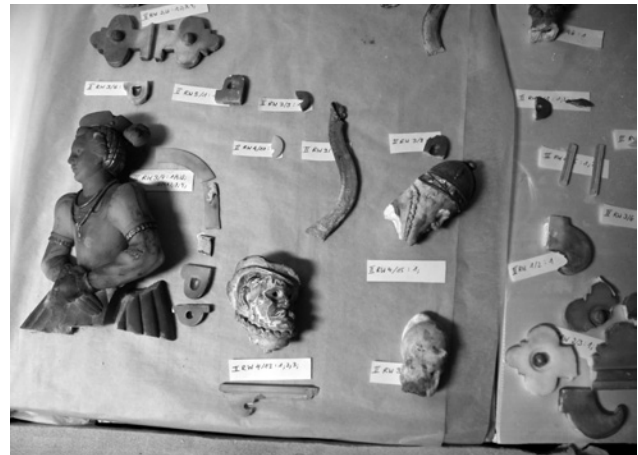


Abb. 13: Wappendetails vom Ulrichmonument nach der Demontage



Abb. 14: Schrifttafel mit Schäden am Ulrichmonument



Abb. 15: Kalksteinoberfläche mit Schäden am Ulrichmonument

ein sehr anfälliges Gestein gegenüber Verwitterungserscheinungen. Andauernde Feuchte-Tauwechsel sowie Salzeinlagerungen können zum Verlust der Gesteinsbindung führen und sich in Absandungserscheinungen bemerkbar machen. Anders verhält es sich bei dem verwendeten englischen Alabaster. Diese Schadensbilder konnten an den Alabasterobjekten in Güstrow nicht beobachtet werden. Hier können die entstandenen Schäden nicht auf die Mineralogie oder Struktur des Alabasters, sondern nur auf ungünstige Verbindungsmaterialien oder unsachgemäße Reinigungsmaßnahmen zurückgeführt werden. Der Stein zeigt eine erhebliche Resistenz gegenüber den vorhandenen Witterungseinflüssen. Dies kann eventuell an seiner Entstehung und Dichte liegen. Die Mächtigkeit der Gipsschichten in Alabasterqualität stellt eine geologische Besonderheit dar. Das Phänomen der Widerstandsfähigkeit bedarf noch weiterer chemischer, geologischer und mineralogischer Untersuchungen.

Am Kalkstein sind zum Teil fortgeschrittene Zerfallserscheinungen festzustellen. Die Oberflächen

des schwarzen Kalksteins zeigen durchgängig eine stumpfe und graue Oberfläche. Eine Aufrauung und eine unterschiedlich starke Calciumcarbonatbildung war zu verzeichnen. Außerdem tragen krepierete Lasuren zur Schleierbildung und Vergrauung des dunklen Kalksteines bei (Abb. 14, 20). Die Verwitterung der vergangenen Jahrhunderte führte zum großflächigen Verlust der polierten Oberfläche, gekennzeichnet durch zunehmende Feuchte- und Salzmigration, verbunden mit unterschiedlich starken Ablösungserscheinungen (Abb. 19) sowie Aus- und Abbrüchen (Abb. 15–17). Ähnlich starke Schädigungen zeigten auch die an den Bildwerken weiterhin verwendeten Kalk- und Sandsteine. Es waren auch Schäden zu erkennen, die auf mechanische Einflüsse zurückzuführen sind. Dabei handelt es sich vor allem um den Verlust kleinerer Gestaltungselemente. Im Laufe der Zeit wurden die entstandenen Schäden mit gips-, kalk- und zementhaltigen Ergänzungsmassen und Mörtelmischungen repariert. Auch bauzeitlich sind in den verschiedenen Achsen unterschiedliche Mörtel verwendet worden. Bei dem Versatz- und Verguss-

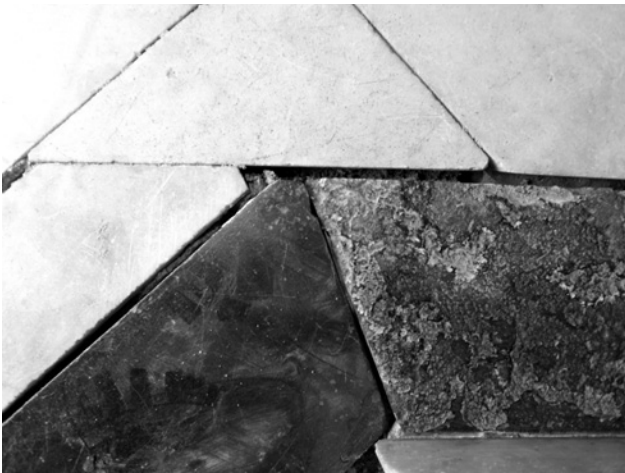


Abb. 16: Bodenplatten, Schlosskirche Schwerin, links kaum geschädigt, rechts stark geschädigt

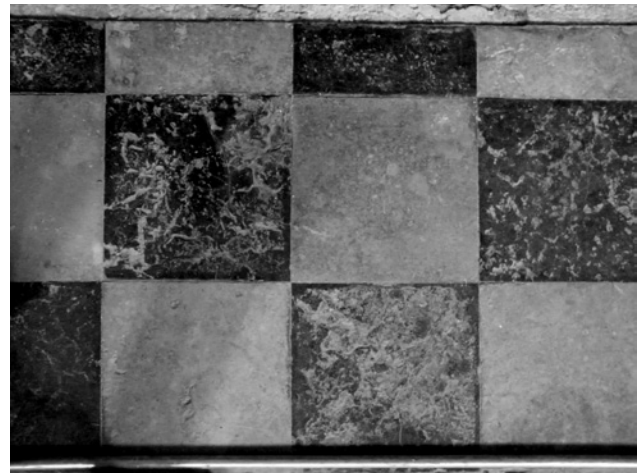


Abb. 17: Bodenplatten mit Oberflächenschädigung vor dem Dorotheenepitaph



Abb. 18: Rostschädigung am Kalkstein und Alabaster, Ulrichmonument

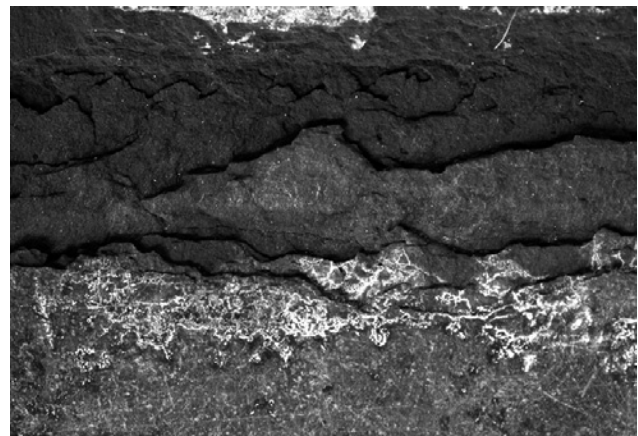


Abb. 19: Schichtaufspaltung am Kalkstein, Bodenplatten, Schlosskirche Schwerin



Abb. 20: Schichtaufspaltung und Krusten am Kalkstein, Bodenplatten, Schlosskirche Schwerin



Abb. 21: Strukturschädigung am Kalkstein nach Demontage, Ulrichmonument

mörtel handelt sich um bindemittelreiche, schwach proteinhaltige und schwach hydraulische, inhomogene Mörtel mit großen Kalkspatzen. Als Zuschlagstoffe sind Quarz, Glimmer Holzkohle und Ziegelreste vorhanden. Zur Verfübung fand Gips Verwendung.

5 Ältere Reparaturmaßnahmen

Der Kohlekalkstein war im Laufe der vergangenen Jahrhunderte aufgrund seiner Schädigung zur Nivellierung der entstandenen Krusten und zur optischen Angleichung mehrfach mit ganz verschiedenen, pigmentierten Überzügen gestrichen worden. Bei

den Farbfassungsbefunden (z.B. Vergoldung) konnten Koniferenharzlacke nachgewiesen werden. Die entstandenen Schäden wurden mit gips-, kalk- und zementhaltigen Ergänzungsmassen und Mörtelmischungen repariert. Auch bauzeitlich sind unterschiedliche Mörtel verwendet worden. Als Zuschlagstoffe sind ebenso Quarz, Glimmer, Holzkohle und Ziegelreste vorhanden. In den Reliefbüsten und den Wappendarstellungen sind neben den ursprünglich anzusehenden Holzstiften später auch Metallverbindungen, (meist korrodierte) Eisenstifte (Abb. 11, 13), sowie unbeschädigte Kupfer- und Messingmaterialien eingesetzt worden. Darüber hinaus sind bei Reparaturen auch Klebungen mit Gips, Koniferenbaumharz, Schellack und Epoxidharz ausgeführt worden. Dies zeigt, dass auch in jüngerer Vergangenheit (2. Hälfte des 20. Jahrhunderts) noch verschiedene Reparaturen durchgeführt wurden.

6 Laboranalysen

Es sind in Vorbereitung der Restaurierung verschiedene Oberflächenproben qualitativ und quantitativ auf ihren Salzgehalt hin analysiert worden. Exemplarisch sind die Salze für die Wandbildwerke an der Nordwand des Güstrower Domes aufgezeigt. Dabei fällt auf, dass im Alabaster der Sockelbereiche der Monumente extrem hohe Natriumsulfatkonzentrationen vorhanden sind. Dagegen zeigt der Alabaster aus der Wappentafel des Ulrichmonumentes (H = 260 cm) extrem hohe Natriumsulfat-, Calciumsulfat-, und Magnesiumsulfatkonzentrationen, mittelhohe Kaliumnitrat- und extrem hohe Calciumchlorid- sowie Natriumchloridkonzentrationen. Der schwarze belgische Kohlenkalkstein in den Sockelbereichen der Güstrower Wandbildwerke zeigt extrem hohe Natriumsulfat-, Calciumsulfat- und mittelhohe Kaliumnitrat- sowie Calciumnitratkonzentrationen. Dagegen sind in den beiden Proben aus der Rückwand des Ulrichmonumentes (H = 197 und 275 cm) hohe und extrem hohe Natriumsulfat-, Magnesiumsulfat- und Calciumsulfat-, mittelhohe Kaliumnitrat- und Calciumnitrat- sowie hohe Natriumchloridkonzentrationen nachgewiesen. Der schwarze Kalkstein zeigt die Hauptbelastung schädigender Salze im oberflächennahen Bereich von 2,5 mm bis 9 mm Bohrtiefe. In den tieferen Bereichen sind nur noch geringe Sulfat- und Chloridbelastungen nachweisbar gewesen. Die Konzentrationen nahmen nach innen gleichmäßig ab. Die Salze sind wohl über die Mörtelfugen eingewandert, durch jahreszeitliche Feuchtwechsel auch auf die Oberflächen gelangt und dort auch bedingt eingedrungen. Zur Bestimmung der Salzkonzentrationen

im Inneren des schwarzen Kalkstein sind aus einem Bauteil insgesamt zehn Proben im Bohrverfahren entnommen worden. Die Bohrung führte von der seitlichen Oberfläche 10,5 cm tief in das Gestein. Der tiefste Punkt der Bohrung besitzt ca. 6 cm Abstand von der Vorderseite und der Fugenfläche gleichermaßen. Zur Ermittlung geeigneter Reinigungs-, Festigungs- und Salzreduzierungsverfahren bzw. zur Untersuchung der historischen Farbigkeit sind Proben zur Analyse in das Labor eingeschickt worden. Der schwarze Kalkstein zeigt im Befund meist eine mit Ruß versetzte Schellack-Wachspolitur. Auf den Alabasterteilen sind zur Oberflächenveredelung Koniferenharzlacke nachgewiesen worden, als ursprünglicher Fugenmörtel ist reiner Gips verwendet worden. Später ist auch mit zementhaltigen Mörteln verfügt worden.

7 Konservierung

7.1 Salzreduzierung

An allen bearbeiteten Objekten sind salzreduzierende Maßnahmen belasteter Bauteile vorgenommen worden. Im eingebauten Zustand ist die abtrocknende Kompressenanwendung (mit und ohne Befeuchtung der Oberfläche) aufgrund ihrer relativ einfachen und gut steuerbaren Anwendung favorisiert worden. Hierzu fanden umfangreiche Vorversuche statt. Zum einen sind Versuche mit reinen Arbocelkompressen (für Alabaster), zum anderen in Kooperation mit dem Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege Dr. Wendler (München) Versuche mit Mischungen unterschiedlicher Zuschlagstoffe (für Kohlenkalk) vorgenommen worden. An den demontierten Kalksteinbauteilen konnten auch andere Methoden getestet bzw. eingesetzt werden. Hier sind die dauerhafte Kompressen-, die Wasserbadanwendung, die Befeuchtung, die Berieselung sowie der Einsatz eines gerichteten Wasserstroms mit schnelltrocknender Kompressen zu nennen. Der Transport von gelösten Salzen kann hierbei sowohl durch deren Eigenbewegung als auch durch die sich bewegende Flüssigkeit erfolgen. Beim Einsatz des Wasserbades am schwarzen Kalkstein besteht die Gefahr, dass die Sole durch das vorhandene Microporensystem in die Tiefen des Steins eindringt. Die Salzlast kann im Porenraum in Bereiche gedrängt werden, die zuvor eventuell unbelastet waren, da die vorhanden Poren die Salze beherbergen und durch die teilweise eingeschränkte Wasserdampfdiffusion nur unvollständig nach außen abgeben können. Um die Quantität der Kompressenentsalzung nachzuweisen, wurden die Kompressen nach jedem Durchgang auf ihren Salzgehalt hin überprüft.

7.1.1 Salzreduzierung englischer Alabaster

Arbocel BC 1000, max. 1 cm Schichtstärke
Ethylalkohol, dest. Wasser 1 : 2 (nur Fürstenepitaph)

Arbocel BC 1000, max. 1 cm Schichtstärke
dest. Wasser 1 : 2
Zwangstrocknung bei 25 °C und künstlicher Luftbewegung (nur demontierte Bauteile)

7.1.2 Salzreduzierung belgischer Kalkstein

Quarzsand 0,1–0,3 mm 50 g
Quarzsand 0,3–0,8 mm 30 g
Bentonit Pulver 75 g
Arbocel BC 200 50 g
Arbocel BWB 40 50 g
dest. Wasser

Quarzsand 0,1–0,3 mm 50 g
Bentonit Pulver 50 g
Arbocelkompeesse BC 200 50 g
Arbocelkompeesse BWB 40 100 g
dest. Wasser

7.2 Festigung

Für die geschädigten und zu erhaltenden Oberflächen, schwerpunktmäßig beim Kalkstein, sind entsprechende tiefgreifende Festigungen und Hinterfüllungen notwendig geworden, da hier Teilbereiche stark porös, desolat bzw. abgängig waren.

7.2.1 Zur Festigung des englischer Alabasters sind folgende Produkte getestet worden:

Kieselsäureester Funcosil 100
Kieselsäuredispersion Syton X 30
40 g Kieselsäuredispersion Syton X 30 in 60 g dest. Wasser, 2 g Acematt HK 125
Reinacrylat Paraloid B72, 3 %
Bei der Verfestigung von geschädigten Alabasteroberflächen zeigten die beiden Kieselsäuredispersionen die besten Ergebnisse, eine gute Verfestigung, keine Verdunkelung und keine Glanzbildung.

7.2.2 Zur Festigung des belgischen Kalkstein sind folgende Produkte getestet worden:

Polyvinylacetat Mowilith,
Polyvinylalkohol Mowiol,
Reinacrylat Paraloid B72, 3 %, 5 %, 7 % 10 % in Ethylacetat, oder Dowanol PM
Von den beprobten Materialien zeigt das Reinacrylat im Vergleich die beste Eindringtiefe und das optimale Festigungsverhalten. Die Anwendung des Festigungsmittels sollte im Tränkverfahren oder besser im Unterdruckverfahren erfolgen, um eine optimale

Verfestigung innenliegender Bereiche zu erreichen. Dies ist aber nur im demontierten Zustand möglich. Die Nachreinigung kann mit Dowanol PM oder Aceton erfolgen, um Konzentrationen an der Oberfläche und Verdunklung sowie Glanz zu vermeiden.

8 Restaurierung

Das Ziel der Restaurierungsmaßnahmen war jeweils, das ursprüngliche Erscheinungsbild aus der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts weitestgehend wiederherzustellen. Es handelte sich z.B. beim Ulrichmonument um ca. 20 m³ abzubauende bildhauerisch bearbeitete Natursteine, insgesamt ca. 150 m² zu bearbeitende Oberflächen sowie 3 Großfiguren, 3 Betpulte, 2 Karyatiden mit Postamenten und Aufsätzen, 2 Sphinxpaaren sowie 90 Büsten nebst Wappen der Ahnentafel, hunderte Bruchstücke, einzeln kartiert und reversibel beschriftet. Dabei wurden auch unsaubere, schadhafte und problematische ältere Klebungen getrennt (Abb. 13), zum Teil störende Gips- und zementhaltige Kittungen durch neue Inkrustationsverfugungen oder Modellierungen ersetzt und alles neu passgenau zusammengefügt sowie neu montiert.

Für die Reinigung des Alabasters ist meist Wasserdampf (Abb. 5), für die Fleckreduzierung sind Kompressen, für die Kalksteinoberflächen und die mechanische Abnahme von darauf befindlichen, kreperten Überzügen sind Alkohollösungen und -kompressen, eingesetzt worden (Abb. 22).

Die Festigungen poröser Oberflächenbereiche erfolgte am Alabaster, mit Kieselsäuredispersion am Kalkstein dagegen durch Injektion oder Tränkung mit Reinacrylat in Ethylacetat oder Dowanol PM. Die Hohlstellen des geschädigten Kalksteins sind mit verschiedenen füllstoffhaltigen Mischungen auf der Basis von Reinacrylat durch die Injektion per Spritze gefüllt worden. Nach makroskopischer Begutachtung und Klopfproben zeigt sich durchgängig eine gute Anbindung der Hinterfüllmasse an die Flanken. Größere Ausbrüche und Fehlstellen im Kalkstein und Alabaster konnten bildhauerisch in entsprechendem Material ergänzt und angesetzt (Abb. 28), kleinere Ab- und Ausbrüche dagegen gekittet werden. Dabei sind auch bildplastische, dreidimensionale Modellierungen an unterschiedlichen Detailbereichen und Verzierungen wie Hände, Füße, Gesichter, Haare, Attribute, Waffen, Borten, Säume, Schmuck usw. ausgeführt worden. Die eingesetzten Kittmaterialien für Alabaster und Kalkstein basieren meist auf Acryldispersionsmischungen. Hier waren neben den restauratorischen Anforderungen an Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Reversibilität die optischen Kriterien



Abb. 22: Reinigungskompressen und Reinigung am Ulrichmonument

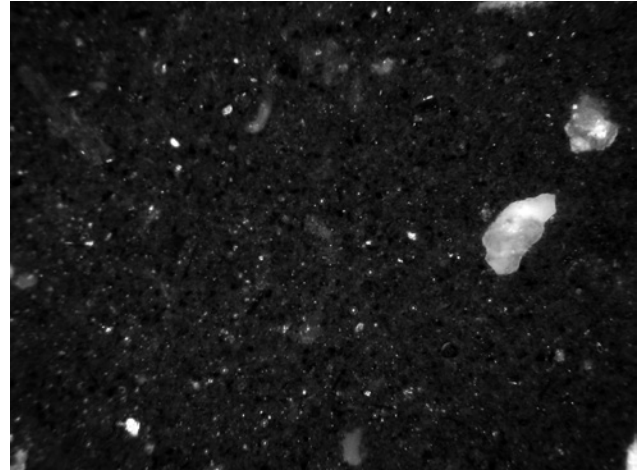


Abb. 23: Kittmasse Kalkstein II, mikroskopisch

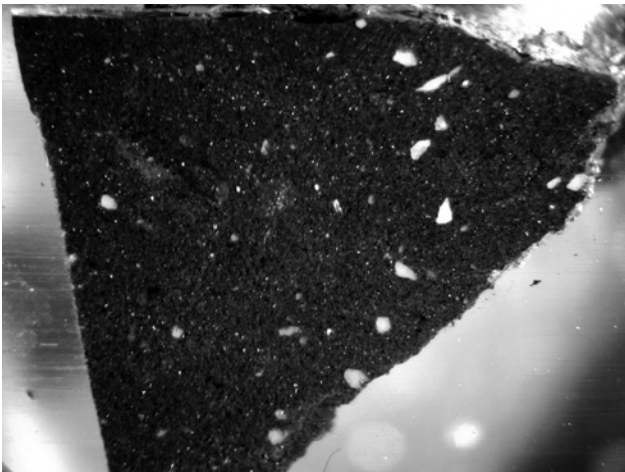


Abb. 24: Kittmasse Kalkstein I, mikroskopisch

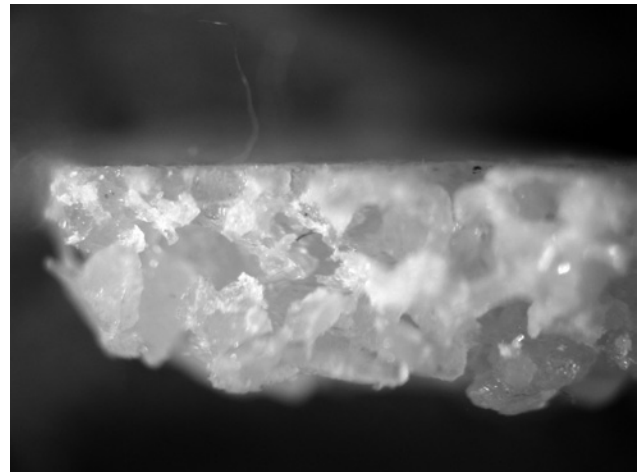


Abb. 25: Kittmasse Alabaster, mikroskopisch

ausschlaggebend für die eingesetzten gesteinsimitierenden Massen. Am Kalkstein spielte die Eintönung dabei eine wesentliche Rolle (Abb. 23–24, 29). Beim Alabaster zeigen Kittmassen in ihrer Zusammensetzung entsprechende Lichtbrechungen bzw. transluzenten Effekte (Abb. 25). Die acryldispersionsgebundenen Massen besitzen nach Gering eine sehr gute Farbstabilität. Sie sind weicher und elastischer als der Alabaster, bilden keine Trennschicht zum Stein aus und haben eine bessere Wasserdampfdiffusion als die anderen getesteten Materialien. Die Schichtstärke ist je nach Korngrösse des Zuschlages aufgrund des Bindemittels auf ca. 1 cm beschränkt. Dickere Schichten können nicht gleichmäßig aushärten. Später sind Skalpellanschnitte und Handschliffe der Ergänzungen möglich. Ergänzend sind auch gipshaltige Massen z.B. Stuckmarmore für die Ergänzung polierter Oberflächen möglich.

Zur Klebung von Brüchen und Dübeln kamen Epoxidharze wie Akepox 2010 und 2040 oder das Kaltpolymerisat Kallocryl A/C (Flüssigkeit) mit Kallocryl R (Pulver) zum Einsatz. Bei Dübelungen sind die Dübel lediglich im Bohrloch verklebt worden.

Abschließend sind die Oberflächen retuschiert worden. Die Alabasterbereiche wurden vorwiegend mit Aquarellfarben retuschiert (Abb. 26–27). Bei den Kalksteinen standen die Angleichung der unterschiedlichen Farbtöne und Strukturen im Vordergrund. Die Retuschen erfolgten mit pigmentierten Schellacklasuren sowie auch vorläufig diffusionsoffene, zellleimgebundene und pigmentierte Lasuren und Silikatcreidenretuschen, fixiert teils durch Aufsprüfung von Kieselsäuredispersion (Abb. 1–2) oder mikrokristallinem Wachs sowie deren Handpolitur. Im Bereich der Wappen, Figuren, Schriftfelder und sonstigen Zierelemente sind Vergoldungen mit Maler- und Muschel-



Abb. 26: Alabasterkittung II mit Retusche am Dorotheenepitaph



Abb. 27: Alabasterkittung I mit Retusche am Dorotheenepitaph



Abb. 28: Bildhauerergänzung, Alabaster am Ulrichmonument



Abb. 29: Kalksteinbodenplatte, Schlosskirche Schwerin, nach Kittung

gold abgetönt, mit Perlglanzpigmenten ergänzt sowie teilrekonstruiert worden (Abb. 26, 28). Dies war aufgrund der umfangreichen restauratorischen Farbumtersuchungen des André Streich möglich und betraf auch die Schwerter der Fürsten- und Königsbüsten. Ein abschließender Überzug erfolgte mit mehrlagigem, mikrokristallinen Wachs Cosmoloid H 80 in Shellsol T und Elaskonspray Aero 46 Spezial und dessen Handpolitur.

8.1 Reinigung

Die Reduzierung von Verunreinigungen und Krusten auf den Natursteinoberflächen wurde zur Verringerung des Eintrags schädigender Auflagen und zur optischen Verbesserung des Erscheinungsbildes gewünscht. Die anzuwendende Technologie war auf die originale Oberfläche und ihre Schädigung abzustimmen. Dabei wurden die Möglichkeiten und Risiken vorab gründlich abgewogen.

Für die Reinigung der Oberflächen des englischen Alabasters sind folgende Methoden und Materialien getestet worden:

- Pinsel, weich
- Trockenreinigungsschwamm
- Radieschwamm
- Radiergummi
- dest. Wasser kalt, Aufnebelung durch Handsprüher
- Wasserdampf ohne zusätzlichen Druck im Sprühabstand von 40–50 cm.
- Ethylalkohol
- Ethylalkohol, dest Wasser 1:2
- Ethylacetat
- Siedegrenzbenzin

Laserreinigung

Für die Reinigung der entfestigten Oberflächen kamen nur weiche Pinsel und bedingt Trockenreini-

gungsschwämme in Frage, bei intakten Oberflächen zeigten Wasserdampf (Abb. 5) und Laser gleich gute Ergebnisse.

Die Fleckreduzierungen erfolgten durch Anquellung mittels Kompressen auf feuchter Oberfläche aus Feinsand, Ceratosil, Ammoniumcarbonat in dest Wasser.

Für die Reinigung der Oberflächen des belgischen Kalksteins sind folgende Methoden und Materialien getestet worden :

- Trockenreinigungsschwamm
- Radieschwamm
- dest. Wasser kalt, Aufnebelung durch Handsprüher
- Wasserdampf ohne zusätzlichen Druck im Sprühabstand von 40–50 cm.
- Ethylalkohol ohne und in Arbocelkomprese BC 200
- Ethylalkohol, dest Wasser 1 : 2, ohne und in Arbocelkomprese BC 200
- Ethylacetat, ohne und in Arbocelkomprese BC 200
- Aceton
- Siedegrenzbenzin, ohne und in Arbocelkomprese BC 200
- Ammoniumhydroxid 5 %, 10 %, 15 %, ohne und in Arbocelkomprese BC 200

Laserreinigung

Feinhandschleifung, 300 er bis 1800er Körnung

Bei der Reinigung der Kalksteine sind je nach Problematik meist mehrere Technologien wie Trockenreinigungsschwamm, Wasserdampf für Schmutzablagerungen und Kaseinlasuren, ethanolhaltige Kompressen für harzhaltige Überzüge und die partielle Feinhandschleifung für Calciumcarbonatausbildungen notwendig (Abb. 22).

8.2 Rezepte Kittung Alabaster:

Masse fein für Rissfüllungen bis 1 mm Breite:

100g Carraramarmormehl fein 0–120

100g Alabastermehl bis 0,2mm, Eigenherstellung, ausgesiebt

Bindemittel Primal SF 016 1:1 in Wasser (nur Borwinmonument)

Antragmasse Grob bis 1 cm Schichtstärke:

100g Alabaster bis 3mm, Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

Es sind auch Fraktionen farbiger Alabasterbereiche aus geborgenen Bruchstücken (ursprüngliches Füll-

material) gesondert zur neuen Äderung eingesetzt worden.

10g San Ambrogio Marmormehl

10g Mori Marmormehl

Bindemittel Primal SF 016 1:1 in Wasser (Grabmal Herzog Christoph, Dorotheeneipitaph)

Antragmasse Mittलगrob bis 3mm Schichtstärke:

0,01–0,1 mm = 35,4 g

0,1–0,2 mm = 14,6 g

0,2–0,4 mm = 20,7 g

0,4–0,63 mm = 18,8 g

0,63–0,8 mm = 11,3 g

Alabaster in Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

4 Teile Bindemittel Primal SF 016 3 Teile Wasser (nur Fürsteneipitaph)

Antragmasse Mittलगrob bis 3mm Schichtstärke:

100g Alabastermehl bis 0,8mm, Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

Bindemittel Styrolit 950 2:1 in Wasser (nur Borwinmonument)

100g Alabaster bis 1 mm, Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

20g Quarzmehl Bindemittel Primal SF 016 1:1 in Wasser (Grabmal Herzog Christoph, Dorotheeneipitaph) (Abb. 25)

Antragmasse fein bis 1 mm Schichtstärke:

100g Alabastermehl bis 0,2mm, Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

Bindemittel Primal SF 016 1:1 in Wasser, oder Styrolit 950 2:1 in Wasser

100g Alabastermehl bis 0,2mm, Eigenherstellung, ausgesiebt, gewaschen, getrocknet

10g Hohlglaskugeln Scotchlite S22

Bindemittel Primal SF 016 1:1 in Wasser

8.3 Rezepte Hinterfüllung Kohlekalkstein:

Reinacrylat Paraloid B72, in Ethylacetat 10 %, Hohlglaskugeln Scotchlite S22 10 % oder 15 % (nur Borwinmonument)

Reinacrylat Paraloid B72, in Dowanol PM 10 %, Ace-matt HK125 5 %, Quarzmehl 10 %

Reinacrylat Paraloid B72, in Dowanol PM 10 %, Hohlglaskugeln Scotchlite S22 5 %, Marmormehl 10 % (nur Dorotheeneipitaph)

8.4 Rezepte Kittung Kohlekalkstein:

Antragmasse Grob bis 1 cm Schichtstärke:

50g Quarzsand hellgrau 0,5–3 mm

50g Carrara-Marmor Sand 0–3 mm

5g Knochenschwarz

Bindemittel Primal SF 016 1 : 1 in Wasser

Antragmasse Mittलगrob bis 3 mm Schichtstärke:

50g Quarzsand hellgrau 0,2–0,5 mm

50g Quarzsand hellgrau 0,5–1 mm

5g Knochenschwarz

Bindemittel Primal SF 016 1 : 1 in Wasser (Abb. 24)

Remmers Multispachtel

Bindemittel Macrovil D 340 50 % in Wasser (nur Schlosskirche Schwerin)

Antragmasse fein bis 1 mm Schichtstärke:

75g Quarzmehl 0,1–0,25 mm

75g Marmormehl

50g Knochenschwarz

Bindemittel Primal SF 016 1 : 1 in Wasser (Abb. 23)

100g Basaltmehl (0,01–0,1 mm)

50g Eisenoxidschwarz

Bindemittel Primal SF 016 1 : 0,75 in Wasser (nur Fürstenepitaph, Borwinmonument)

100g Marmormehl

50g Saxocarb 200

50g Knochenschwarz

Bindemittel Macrovil D 340 100 % (nur Schlosskirche Schwerin) (Abb. 29)

8.5 Retusche Alabaster

Auarellfarben auf Basis von Gummi Arabicum, Silikatkreiden, Fixativ Ludox PX 30 (nur Borwinmonument)

Cosmoloid H 80 in Shellsol T 5%ig, (Abb. 26–27)

8.6 Retusche Kalkstein

Schellack in Ethanol, Knochenschwarz, Eisenoxidpigmente (Kalkstein nur Borwinmonument)

Cosmoloid H 80 in Shellsol T 5%ig, Knochenschwarz, Eisenoxidpigmente nach zusätzlicher Absperrung der Kittungsbereiche mit Primal SF 016 1 : 4 in Wasser zelleimgebundene Lasuren (Methocel A4C) Knochenschwarz, Graphit (Kalkstein nur Borwinmonument) (Abb. 1–2)

Silikatkreiden, Fixativ Elaskonspray Aero 46 Spezial (nur Dorotheenepitaph)

8.7 Oberflächenbehandlung Alabaster und Kalkstein

Cosmoloid H 80 in Shellsol T 5%ig

Elaskonspray Aero 46 Spezial (nur Dorotheenepitaph)

Perflutex (Kalkstein nur Fürstenepitaph)

Die Rezepturen sind als Beispiele der verschiedenen Objekte aus den insgesamt über 150 Proben mit Acryldispersionen, Epoxidharzen und Acrylharzen exemplarisch ausgewählt worden. Sie beruhen auf den Ergebnissen der Restaurierungsarbeiten von Boris Froberg, Berlin, Wolfram Vormelker, Klingendorf, der Arge Froberg und Schubert, Berlin, der Wandwerk GmbH, Berlin, der Arge Badde, Rötger, Seibt GbR, Berlin, und der Restaurierung am Oberbaum GmbH, Berlin. Die Rezepturen beziehen auch die Ergebnisse der Facharbeit von Frau Karina Wilke an der FH-Erfurt 2007 und der Diplomarbeit von Frau Silvia Gering an der FH-Potsdam 2010 mit ein.

9 Zusammenfassung

Das Ziel der Restaurierungsmaßnahmen war es, das ursprüngliche Erscheinungsbild der schwarzen belgischen Kalksteine und die hellen geäderten englischen Alabaster weitestgehend wiederherzustellen. Dabei lag der Schwerpunkt in der Erhaltung der Originalsubstanz und deren Konservierung durch geeignete Reinigungs-, Salzreduzierungs- und Festigungsmethoden. Des weiteren war die restauratorische Komplettierung der Fehlbereiche gewünscht. Hierfür stand die Beschaffung von originalgetreuem Ersatzgestein und die Entwicklung von entsprechenden Kittmassen im Vordergrund. Die Herstellung von Kittmassen, die die steinsichtig geschliffenen und aufwändig hochglänzend polierten Oberflächen optisch ergänzen, stellten dabei eine besondere Herausforderung dar. Die Problematik bestand in der Angleichung von Kittmaterialien innerhalb der Steinoberflächen, ihrer Reversibilität und ihre Alterungsbeständigkeit. Sie sind bezüglich des Bindemittels, der Zuschlagstoffe und Pigmentierungen auf die Steine abgestimmt worden. Die wässrigen und wachshaltigen Retuschen sowie die Oberflächenbehandlungen mit farblosen, bzw. eingefärbten mikrokristallinen Wachsen nach entsprechenden Vorbehandlungen und deren Politur geben den Bildwerken ein gleichmäßiges Erscheinungsbild. Dem Betrachter wird ein homogener Farb- und Glanzeindruck vermittelt und die Ergänzungen sind nur aus der Nähe erkennbar. Dies betrifft die Kittungen und Modellierungen, wie die bildhauerischen Ergänzungen gleichermaßen. Durch die

Unterschiedlichkeit der ausführenden Restauratoren ergeben sich eine Vielzahl von eingesetzten Materialkombinationen, die alle gute bis sehr gute Ergebnisse zeigen. Da die Arbeiten in den letzten Jahren ausgeführt wurden, können ihre Alterungsbeständigkeit erst in einigen Jahren beurteilt werden. Bislang konnten keinerlei Veränderungen oder Schäden, z. B. durch erneute Salzausblühungen, Material- oder Farbveränderungen, Eintrübungen und Schleierbildungen bemerkt werden.

Literatur

- /1/ NEUMANN, C.: Die Renaissancekunst am Hofe Ulrichs zu Mecklenburg. Kiel: Ludwig, 2009.
- /2/ BARESEL-BRAND, A.: Grabdenkmäler nord-europäischer Fürstenhäuser im Zeitalter der Renaissance 1550–1650. In: Schleswig-Holsteinische Schriften zur Kunstgesch. 9; Kiel: Ludwig, 2007.
- /3/ CHEETHAM, F.: Alabaster Images of Mediaval England. London: Brewer, 2003.
- /4/ WUSTRACK, M.: Die Mechelner Alabaster-Manufaktur des 16. und frühen 17. Jahrhunderts. In: Europ. Hochschulschriften: Reihe 28 Kunstgeschichte; Frankfurt/M. Bern: P. Lang, 1982.
- /5/ FROBERG, B.: Plastische Ergänzungen an Naturstein. In: STEIN Jahrgang Nr. 127 (2011) Nr. 01, S. 56–59.
- /6/ FROBERG, B.: Die Reduzierung von Krusten. In: STEIN Jahrgang Nr. 127 (2011) Nr. 12, S. 58–61.
- /7/ FROBERG, B.: Der Alabaster leuchtet wieder. In: STEIN Jahrgang Nr. 128 (2012) Nr. 05, S. 42–49.
- /8/ FROBERG, B.: Die Kirche am Landtag. In: STEIN Jahrgang Nr. 129 (2013) Nr. 04, (Seitenzahlen sind noch unbekannt)
- /9/ FROBERG, B.: Die Konservierung und Restaurierung des Dorotheenepitaphs im Dom zu Güstrow. In: GRASSEGER, G., PATITZ, G. & WÖLBERT, O. (Hrsg.). Natursteinsanierung Stuttgart 2010; Stuttgart, 2010.
- /10/ SIEDEL, H., FRANZEN, C. & WEISE, S. (Hrsg.): Elbsandstein. Beiträge zur Tagung des Arbeitskreises zur Erhaltung von Kulturgütern aus Stein (ARKUS). Dresden: Veröff. Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt, 2007

Quellen

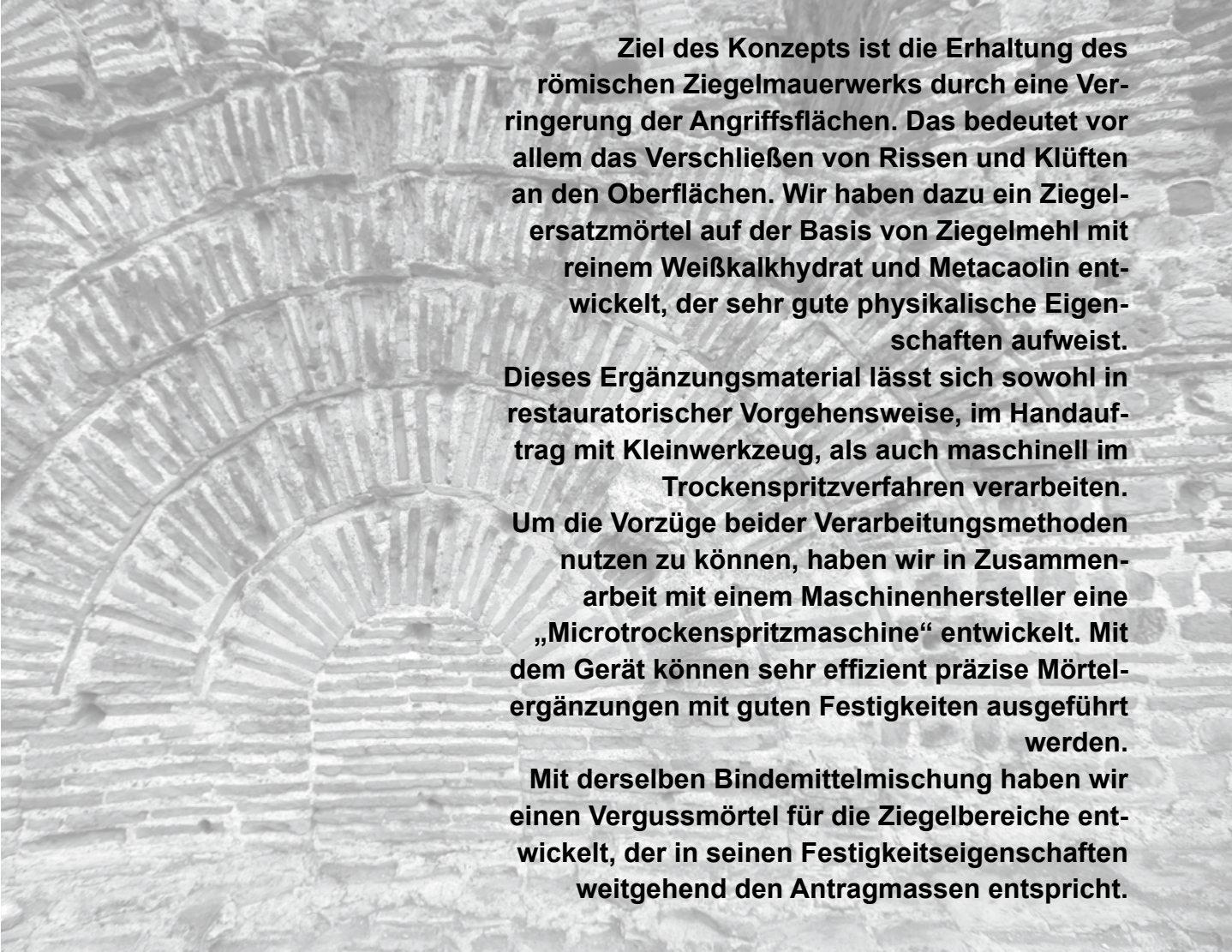
- [1] GERING, S.: Alabaster. In: RESTAURO Jahrgang Nr. 118 (2012) Nr. 05, S. 45–52.
- [2] FROBERG, B.: Bericht der restauratorischen Untersuchungen. Dorotheenepitaph 2008 und dem Ulrichmonument 2010 im Dom zu Güstrow. unver. Bericht; Berlin: 2008/2010.
- [3] STREICH, A.: Restauratorische Untersuchungen zur historischen Farbigkeit. unver. Berichte; Potsdam: 2006, 2007, 2010, 2011.
- [4] PRO-DENKMAL GMBH: Mikrochemische Analysen. unver. Berichte; Bamberg: 2006–2011.
- [5] MPA BREMEN: Mikrochem. Salzanalysen. unver. Berichte; Bremen: 2008, 2011.
- [6] KREMPLER, M.: Petrographische Untersuchungen Epitaph der Herzogin Dorothea. Grabmonument Herzog Ulrich. unver. Berichte; Berlin/Potsdam: 2006, 2007, 2010.
- [7] BOLZE, T.: Bericht zum konstruktiven Zustand. unver. Berichte; Potsdam: 2006, 2007, 2010.
- [8] BOLZE, T.: Ingenieurtechnische Planungen zur statischen Ertüchtigung. unver. Berichte; Potsdam: 2006, 2007, 2010.
- [9] ARGE FROBERG-SCHUBERT: Arbeitsdokumentation Fürstenepitaph im Münster zu Bad Doberan. unver. Bericht; Berlin: 2009.
- [10] FROBERG, B.: Arbeitsdokumentation Freigrabmal Herzog Christoph und Gemahlin Elisabeth im Dom zu Schwerin. unver. Bericht; Berlin: 2009.
- [11] FROBERG, B.: Arbeitsdokumentation Dorotheenepitaph im Dom zu Güstrow. unver. Bericht; Berlin: 2009.
- [12] WANDWERK GMBH: Arbeitsdokumentation Ulrichmonument im Dom zu Güstrow, 1. und 2. Bauabschnitt. unver. Bericht; Berlin: 2010, 2011.
- [13] ARGE BADDE, RÖTGER, SEIBT GBR: Arbeitsdokumentation Ulrichmonument im Dom zu Güstrow, 3. Bauabschnitt. unver. Bericht; Berlin: 2012.
- [14] RESTAURIERUNG AM OBERBAUM GMBH: Arbeitsdokumentation Restaurierung der Bodenplatten in der Schlosskirche Schwerin. unver. Bericht; Berlin: 2012.
- [15] FROBERG, B.: Arbeitsdokumentation Steinrestaurierung in der Schlosskirche Schwerin. unver. Bericht; Berlin: 2013.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1–5, 8–18, 21–22, 26–28: Restaurator Boris Froberg, Berlin
- Abb. 6–7: Michael-Christian Krempler, Berlin
- Abb. 23–25: Pro-Denkmal GmbH, Bamberg
- Abb. 19–20, 29: Restaurierung am Oberbaum GmbH, Berlin

Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur Konservierung von frei bewittertem römischen Ziegelmauerwerk

von Hans Michael Hangleiter



Ziel des Konzepts ist die Erhaltung des römischen Ziegelmauerwerks durch eine Verringerung der Angriffsflächen. Das bedeutet vor allem das Verschließen von Rissen und Klüften an den Oberflächen. Wir haben dazu ein Ziegelerersatzmörtel auf der Basis von Ziegelmehl mit reinem Weißkalkhydrat und Metacaolin entwickelt, der sehr gute physikalische Eigenschaften aufweist.

Dieses Ergänzungsmaterial lässt sich sowohl in restauratorischer Vorgehensweise, im Handauftrag mit Kleinwerkzeug, als auch maschinell im Trockenspritzverfahren verarbeiten. Um die Vorzüge beider Verarbeitungsmethoden nutzen zu können, haben wir in Zusammenarbeit mit einem Maschinenhersteller eine „Microtrockenspritzmaschine“ entwickelt. Mit dem Gerät können sehr effizient präzise Mörtelergänzungen mit guten Festigkeiten ausgeführt werden.

Mit derselben Bindemittelmischung haben wir einen Vergussmörtel für die Ziegelbereiche entwickelt, der in seinen Festigkeitseigenschaften weitgehend den Antragsmassen entspricht.

1 Einleitung

Die Kaiserthermen sind die monumentalen Überreste einer großflächig geplanten spätantiken Badeanlage. Der Bau mit seinen teilweise noch 19 Meter hoch erhaltenen Mauern gehört zu den größten römischen Thermen nördlich der Alpen und ist seit 1986 Teil des UNESCO-Welterbes in Trier (Abb. 1). Als Kulturdenkmal steht der Bau seit 1989 unter Denkmalschutz. Heute ist das Gelände der Thermen als Archäologischer Park ausgewiesen.

Im Rahmen der Entwicklung eines restauratorischen Gesamtkonzepts zur Erhaltung der antiken Gebäudestrukturen mussten wir uns besonders mit den Konservierungsproblemen an römischem Ziegelmauerwerk befassen. Materialentwicklung und Verarbeitungsverfahren sollen hier vorgestellt werden.

2 Trierer Kaiserthermen, Baugeschichte und Bauzustand 2012

Die sogenannten Kaiserthermen in Trier wurden mit der Erhebung zur römischen Residenzstadt unter dem Caesar Constantinus Chlorus und seines Sohnes Konstantin dem Großen geplant, und noch vor 300 n. Chr. wurde mit dem Bau dieser öffentlichen Badeanlage begonnen.

Dazu wurden zwei große Wohnblöcke am Rande der Stadt (250 × 145 Meter große Gesamtfläche) niedergelegt.

Ein weit verzweigtes unterirdisches System von hohen gewölbten Gängen diente als Betriebseinrichtung unter anderem für die Bedienung der Praefonien (Abb. 2).

Die Innenausstattung der Thermen wurde jedoch nie vollendet. Vermutlich seit 316 n. Chr. wurden die Arbeiten unterbrochen, da in diesem Jahr der Konflikt um die Alleinherrschaft zwischen Konstantin dem Großen und seinem Mitkaiser Licinius ausgebrochen war. Konstantin verlegte nach dem Sieg über Licinius (324 n. Chr.) seine Residenz von Trier nach Byzanz (seit 330 Constantinopolis).

Erst nachdem Kaiser Gratian 375 n. Chr. Trier wieder zur Kaiserlichen Residenzstadt gemacht hatte, wurde im Bereich der Thermen weitergebaut. Die Interpretation dieser Umnutzung als Garnisonsbau für die berittene kaiserliche Leibgarde ist jedoch unter den Wissenschaftlern umstritten. Jedenfalls wurde im Zuge dieser Umbauten die riesige, freitragende Halle des Frigidariums abgerissen und die unterirdischen Anlagen im Westteil des Gebäudes zugeschüttet. Beibehalten wurden wesentliche Teile des Caldariums sowie des Tiepidariums.

Zu Beginn des 5. Jahrhunderts verlässt die römische Verwaltung und mit ihr ein großer Teil der Bevölkerung die Stadt. Die Thermenbauten wurden in den folgenden Jahrhunderten umgenutzt.

Eine mittelalterliche Befestigungsanlage entstand unter einem Trierer Geschlecht, das sich „de Castello“



Abb. 1: Blick in das Caldarium

nannte. Zwischen 1102 und 1124 wurde eine neue Stadtmauer errichtet, die die Ruinen der Thermen als Eckbastion einschloss. Ein Stadttor, später „Altport“ genannt, wurde in diesem Zusammenhang durch das ehemalige Südfenster der unteren Fensterreihe des Caldariums geführt. In der Hauptapsis des Caldariums stand im 13. Jahrhundert eine Dreifaltigkeitskapelle und auf dem westlichen Palestragelände das Frauenkloster Engelsberg. Im 15. Jahrhundert wurde die Burg der Familie De Castello instand gesetzt, 1568 zerstört und in der Folge aufgegeben. Lediglich das Stadttor blieb in seiner Funktion erhalten. (Abb. 3, Aldeburg nach der Zerstörung)

Das öffentliche Interesse an der römischen Vergangenheit Triers drückte sich bereits 1816 mit einer Freilegung des Caldariums auf Staatskosten aus. Schon 1907 wurde ein Wiederaufbau der Kaiserthermen diskutiert.

Eine erste systematische archäologische Erforschung der Thermen mit entsprechenden Ausgrabungen und Freilegungen fand ab 1912 unter Daniel Krencker und Emil Krüger statt, deren Ergebnisse 1929 publiziert wurden. Im Zweiten Weltkrieg kam es zu Zerstörungen im Thermengelände.

Weitere Ausgrabungen, Freilegungen und Aufmauerungen über römischen Fundamenten fanden zwischen 1960 und 1966 unter Wilhelm Reusch statt.

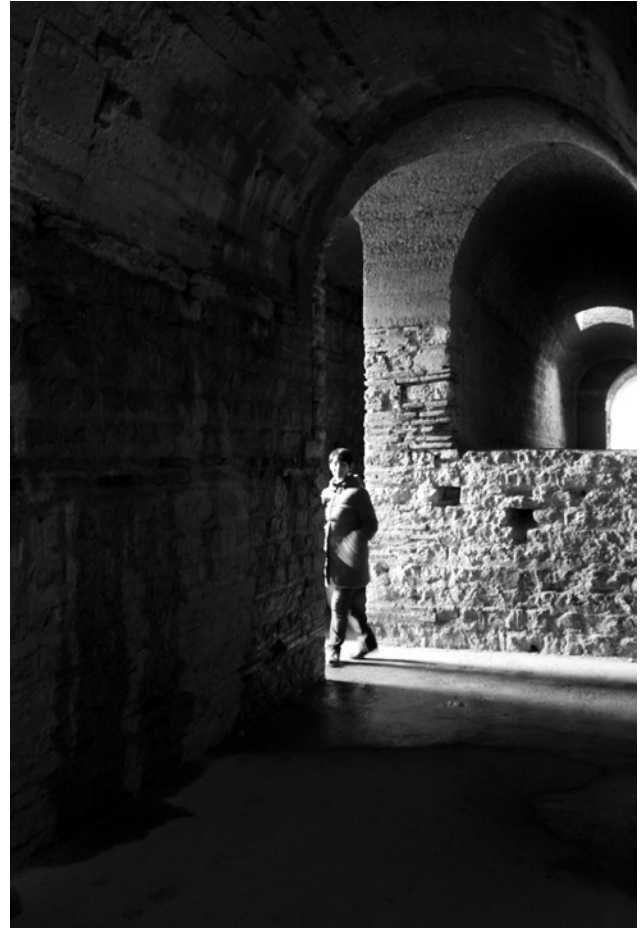


Abb. 2: unterirdische Anlagen

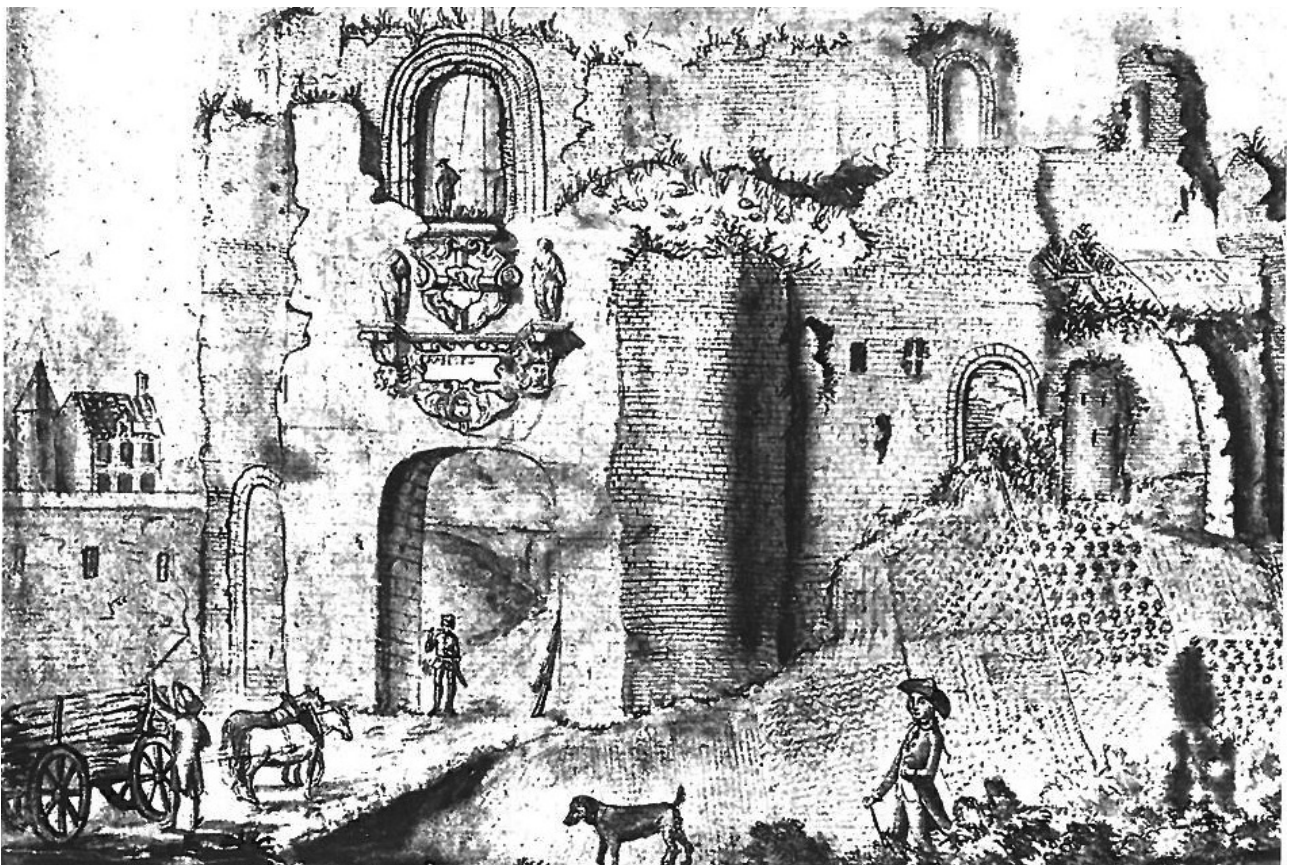


Abb. 3: anonyme Zeichnung zwischen 1795 und 1820, Stadtbibliothek Trier

In den Jahren 1983/84 kam es zu einer umfassenden Instandsetzung des Caldariums, verbunden mit erheblichen Mauerwerksrekonstruktionen der Ostapside. Gleichzeitig wurde die mittelalterliche Stadtmauer wiederaufgebaut.

Zwischen 2006 und 2007 wurde auf dem nordöstlichen Randbereich der Palästra unter Oswald Ungers ein neuer Eingangsbereich sowie ein Aussichtsturm errichtet.

3 Erhaltungszustand der historischen Anlage

Das heutige Erscheinungsbild der Anlage wird im Wesentlichen durch die Konzeption der großen Instandsetzung der 80er Jahre bestimmt. Alle überirdischen Bereiche sind der freien Bewitterung ausgesetzt. Die Mauerkronen wurden weitgehend durch neue Aufmauerungen überformt und teilweise gezielt begrünt. In diesen Bereichen besteht der Schutz gegen das anfallende Regenwasser in Zementestrichen mit bituminösen Beschichtungen. Da sich jedoch eine freibewitterte Gebäuderuine nicht klar in horizontale und vertikale Flächen aufteilen lässt, sondern im Wesentlichen aus unregelmäßigen, abgebrochenen und aufgespaltenen Mauerwerksstrukturen besteht, ist die Wasserführung das zentrale Erhaltungsproblem (Abb. 4).

4 Konzept

Wesentliches Ziel des Konzepts ist die Verringerung der Angriffsflächen, vor allem das Schließen von Rissen und Klüften an den Ziegeloberflächen. Gleiches gilt für die Mörtelfugen zwischen den Ziegeln.

Als Stand der Technik zu Antragsmassen für die Ziegelergänzung standen uns bisher folgende Konzeptionen zur Verfügung:

- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kalk oder Zement
- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kunstharzdispersion
- pigmentierte Mörtel, gebunden mit Kieselsoldispersion

4.1 Metakaolin als hydraulisch wirksamer Bestandteil des Bindemittels

Für unser Konzept standen die Überlegungen im Vordergrund, die hydraulischen Wirkungen von schwach gebrannten Ziegeln zusammen mit Kalk als Bindemittel für die Ersatzmassen zu nutzen.¹ So sind die Tone, wie sie von den Römern zur Ziegelherstellung verwendet wurden, Sedimenttone. Sie bestehen vor



Abb. 4: Raum 13a

allem aus den Aluminiumsilikaten, Illit, Montmorillonit und Kaolinit.

Durch einen Brennvorgang in normaler Atmosphäre und einem Temperaturbereich zwischen 600°C und 850°C entsteht daraus amorphes Metakaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) mit hervorragenden hydraulischen Eigenschaften. Zusammen mit Kalziumhydrat bilden diese Metakaoline CSH Kalzium-Silikat-Hydrat (CSH).

Für die Wahl von Metakaolin als hydraulisch wirksamer Bestandteil des Bindemittels war für uns vor allem entscheidend, dass dieses Material industriell hergestellt in gleichbleibender Qualität kostengünstig zur Verfügung steht. Es gibt für eine derartige Anwendung eine ganze Reihe von Metakaolinen. Unter diesen wurde der Typ mit dem geringsten Wassersanspruch und der kürzesten Abbindezeit, Metaver R der Fa. Newchem² gewählt.

Auf dieser Grundlage sollte eine Antragsmasse als Ziegelerersatzmasse entwickelt werden, die folgenden Bedingungen entspricht:

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

Parallel zur Antragsmasse sollte eine injizierbare Ziegelerersatzmasse auf der selben Grundlage entwickelt werden, die folgenden Bedingungen entspricht:

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

4.2 Vorgehensweise bei der Materialentwicklung

Antragmasse

Bindemittel: Weißkalkhydrat CL90 + Metakaolin
 Zuschlag: Ziegelmehl + Steinmehl
 Pigment: synthetisches Eisenoxid Bayferox
 Zusatzmittel: keine
 (w/z)_{eq}: ca. 0,66

Bindemittel

Zunächst wurden Vorversuche mit der Bindemittelmischung durchgeführt. Dabei konnten wir bereits auf die Erfahrungen bei unserer Materialentwicklung für Maulbronn zurückgreifen. Das Ziel war eine optimale Mischung zwischen CL90 und Metakaolin. Sehr gute Ergebnisse wurden bei einem Mischungsverhältnis in Gewichtsteilen von 1 : 1 erzielt.

Nach den aktuellen Testergebnissen des Herstellers lassen sich die höchsten Festigkeiten mit einem Verhältnis von 65 GT Metaver R zu 35 GT CL90 erreichen (Abb. 5).

Zuschläge

Ziegelmehl

Als Zuschlag für die Antragsmassen wurde vor allem Ziegelmehl verwendet. Ziegelmehl wird industriell

aus neuwertigen roten Tonziegeln vor allem für Tennisplätze hergestellt (nach DIN 18 035, Teil 5 und auf Schadstoffunbedenklichkeit geprüft).

Das verwendete Mehl³ hat eine Körnung von 0–1 mm, ist allerdings erdfeucht und muss ggf. getrocknet werden.

Kalksteinmehl

Das aus den Ziegeln hergestellte Mehl ergibt zusammen mit dem Bindemittel keine ausreichend dichte Packung. Um die Sieblinie zu verbessern, wurde noch Kalksteinmehl zugefügt.

Zusatzstoffe

Pigmente:

Der Einfluss von Pigmenten auf den w/z-Wert und damit auf die Festigkeit der Mörtel darf nicht unterschätzt werden. Dabei gibt es auch beim Einsatz von synthetischen Eisenoxidpigmenten bereits durch das Herstellungsverfahren bedingt enorme Unterschiede. Bei der Mörtelherstellung ist unser Ziel immer durch eine möglichst geringe Pigmentzugabe die optimalen Ergebnisse zu erzielen. Wir haben bei unseren Mörtelproben die besten Ergebnisse mit Bayferrox-Pigmenten erzielt. Aber auch bei diesen muss sehr sorgfältig ausgewählt werden. Grundsätzlich ergeben

Prisms 40×40×160 mm

Water content was adjusted to the consistency of 160 mm.

Composition of the mixtures (in grams)

Metaver R/CL90	10/90	20/80	35/65	50/50	65/35	80/20
Metaver R	20	40	70	100	130	160
CL90	180	160	130	100	70	40
Sand	300	300	300	300	300	300
Water	175,0	170,0	155,0	143,5	138,5	138,5
w/b	0,88	0,85	0,78	0,72	0,69	0,69

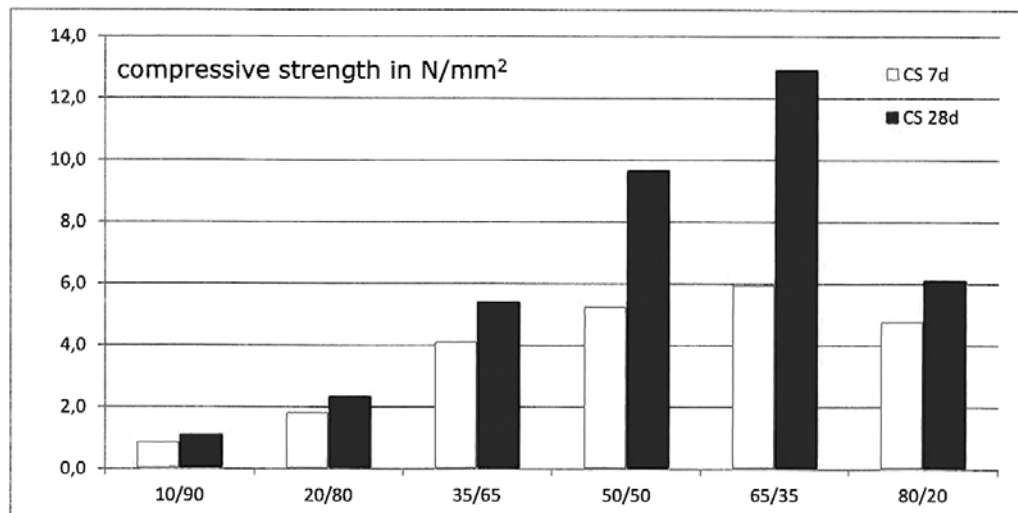


Abb. 5: Messung und Tabelle: temcon solutions GmbH, Michael Kassautzki

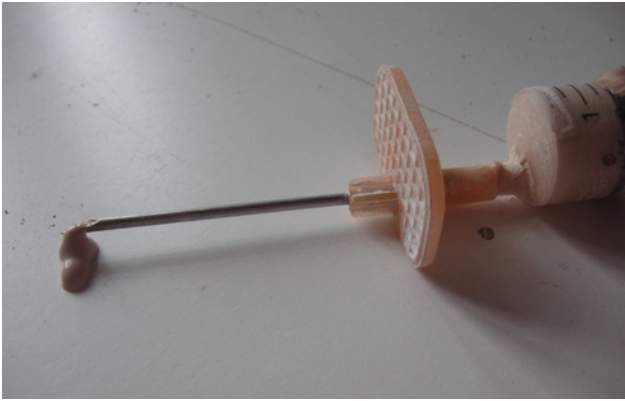


Abb. 6: *Injektionsmörtel lässt sich durch eine 1,2 mm Kanüle verarbeiten.*

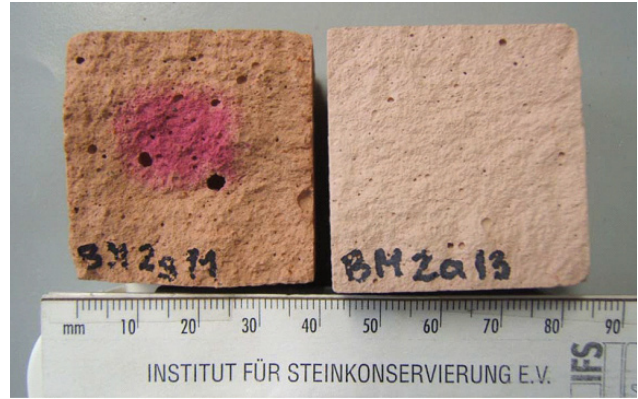


Abb. 7: *Carbonatisierungstest mit Phenolphthaleinlösung nach 6-monatiger Lagerung: Der Antragsmörtel (links) ist bis in durchschnittlich 12mm Tiefe carbonatisiert. Der Injektionsmörtel (rechts) vollständig. Aufnahme: IFS Dr. Michael Auras*

die Pigmente mit der kleinsten Teilchengröße das stärkste Färbevermögen. Gleichzeitig wird aufgrund des Streuvermögens von Eisenoxiden der Farbton direkt durch die Teilchengröße beeinflusst.

Beim Rot gilt, je kleiner die Teilchen sind, desto gelbstichiger ist der Farbton, während größere Teilchen einen eher blaustichigen Farbton erzeugen. Der Unterschied in der vorherrschenden Teilchengröße deckt immerhin die Spanne von $0,09\mu\text{m}$ für das Bayferrox® 105 M und bis zu $0,7\mu\text{m}$ für das Bayferrox® 180 M ab.

Auch beim Schwarz ist der Farbton des Pigments abhängig von der Teilchengröße der Primärteilchen. Das Spektrum reicht vom blaustichigen Bayferrox® 350 bis zum farbstarken Bayferrox® 330.

Der Farbton und die Farbstärke werden direkt von der Teilchengröße beeinflusst. Je größer die Primärteilchen sind, desto blaustichiger ist der Farbton. Allerdings geht das zu Lasten der Farbstärke, diese ist umso höher, je feinteiliger das Pigment ist.

Für unsere Mörtel wurden folgende Pigmente verwendet.

Rot	Bayferrox 110
Schwarz	Bayferrox 330
Gelb	Bayferrox 920

Vergussmasse

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

Bindemittel

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

Zuschläge

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

Zusatzstoffe

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

Pigmente:

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

4.3 Erste Ergebnisse

Herstellung der Prismen

Die Prismen wurden in Styroporformen ($4 \times 4 \times 16\text{cm}$) hergestellt. Die Viskosität der Vergussmörtel wurde so eingestellt, dass sich die Masse noch durch eine 1,2mm Spritzenkanüle verarbeiten ließ (Abb. 6).

Nachdem die Mörtelprismen in den Formen ohne erkennbaren Schwund abgebunden hatten, wurden sie nach ca. 7 Tagen aus den Formen genommen und weiterhin feucht gehalten.



Abb. 8: Zwei Ziegelscherben wurden aneinander gefügt und der Zwischenraum mit dem Injektionsmörtel vergossen.



Abb. 9: Die Ersatzmasse wurde an einem Ziegelscherben angetragen, die entstandene Sinterhaut wurde nach ca. 12 Stunden im Niederdruck-Strahlverfahren entfernt. Dabei konnte die gealterte Ziegeloberfläche völlig unbeschädigt erhalten werden.

Nach 20 Tagen wurden die Prismen an Herrn Dr. Auras vom Institut für Steinkonservierung in Mainz zur naturwissenschaftlichen Untersuchung übergeben. Die Proben wurden in einem überdachten Außenraum des IFS gelagert und wöchentlich befeuchtet.

Mit den erfolgversprechenden Massen wurden weitere Versuche zur Antragung und zum Verfüllen von Hohlräumen an römische Ziegelfragmenten aus Trier durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr zufriedenstellend (Abb. 9, 10 und 11).

Tab. 1: Physikalische Kennwerte, IFS Dr. Michael Auras

Probe		Antragsmörtel BM 2g 11	Injektionsmörtel BM 2a 13	Vergleich römischer Ziegel Kaiserthermen
Kapillare Wasseraufnahme	kg/√hm ²	8,2	9,5	S 1498
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	M.-%	22,1	20,6	1,2
Rohdichte	g/cm ³	1,54	1,62	14,8
Sättigungswert	-	0,81	0,84	1,88
Gesamtporosität	Vol.-%	41,9	39,5	0,85
Druckfestigkeit 28 Tage	N/mm ²	7,8	6,8	30,7
Druckfestigkeit 6 Monate	N/mm ²	7,2	10	3,74
Biegezugfestigkeit 28 Tage	N/mm ²	1,74	1,56	25,1
Biegezugfestigkeit 6 Monate	N/mm ²	1,46	1,64	17,5
Dyn. E-Modul	kN/mm ²	6,4	6,5	



Abb. 10: wie Abbildung 9



Abb. 11: Vorversuch für die Verarbeitung der Antragsmasse mit einer Trockenspritzanlage der Fa. Mader.

5 Überlegungen und Versuche zur Verarbeitung

Wesentlicher Teil der Konzeptentwicklung ist neben der objektbezogenen Materialentwicklung natürlich auch eine entsprechende Technik bei der Verarbeitung. Die schiere Masse von ca. 15.000 m² römischer Mauerwerks Oberfläche steckt einer ganz traditionellen restauratorischen Bearbeitung der Oberflächen mit kleinen Werkzeugen zeitlich und damit finanziell enge Grenzen. Allein der zeitliche Aufwand, kleinteilig zerborstene, mit einem feinen Rissnetz durchzogene Ziegel auf traditionelle Weise mit Injektionsspritze und Kitteisen zu konsolidieren, ist so enorm, dass eine Finanzierung unmöglich realisiert werden kann. Sofern keine effektivere Verarbeitungsmethode für die Ergänzungsmörtel gefunden wird, bleibt als Maßnahme in vielen Bereichen nur der großflächige Steinaustausch.

Das in der Mauerwerksanierung bekannte Trockenspritzverfahren schien uns – zumindest theoretisch eine Alternative zur Handarbeit.

Das Material wird mit hoher Geschwindigkeit trocken durch den Schlauch bis an die Düse transportiert, und erst dort wird die erforderliche Wassermenge zugegeben. Dies führt zu einer hohen Verdichtung des Mörtels, verbunden mit stark erhöhten Festigkeiten nach dem Abbinden.

Wir erhofften uns dabei neben einem sehr gut haften den Antrag auch einen tiefen Verschluss aller Risse mit guter Flankenhaftung. Die vorher locker in die Risse eingesetzten Spritzennadeln konnten dann noch zur Verfüllung mit dem Injektionsmörtel dienen.

Damit dieses Verfahren im vorliegenden Fall angewendet werden konnte, waren eine ganze Reihe von begleitenden Maßnahmen und Vorbereitungen erforderlich. Allein die schiere Größe der Apparatur

mit den fast armdicken Schläuchen und Düsen erfordert natürlich vor allem einen Schutz der Umgebung (Abb. 11) sowie in ganz präzisiertem Umfang den Schutz der hellen Mörtelfugen zwischen den Ziegeln vor der roten Ziegelmasse.

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

Um diesem Problem zu begegnen wurden mit der Antragsmasse im Trockenspritzverfahren einige Versuche durchgeführt. Geprüft wurde, in welchem Umfang eine schützende Beschichtung mit Cyclododecan den mechanischen Belastungen durch die gestrahlte Ziegelerersatzmasse standhalten kann. Dazu wurden moderne Vollziegel in Brocken zerschlagen und in einem Holzkasten so zusammengesetzt, dass Risse in verschiedenen Breiten entstanden. Anschließend wurden die Ziegel etwas unter Niveau mit Mörtel vergossen, so dass ein Fugenbild entstand (Abb. 12). Die Fugen sowie ein Ziegel wurden mit Cyclododecanschmelze versiegelt, und in einige Fugen wurden Kanülen als Packer eingesetzt und mit Kappen verschlossen. Die gesamte Oberfläche wurde anschließend im Trockenspritzverfahren mit der Antragsmasse beschichtet. Gezielt wurde beim Spritzen die Beschichtung mit Cy-



Abb. 12: Vorversuch mit zerschlagenen Vollziegeln in einem Holzkasten. Die Fugen und eine Ziegeloberfläche sind mit Cyclododecan beschichtet.



Abb. 13: nachgereinigte Versuchsfläche



Abb. 14: Die Ziegelbruchstelle zeigt die Eindringtiefe der gespritzten Antragsmasse in einen Riss von 2 bis 3 mm. (Daneben die hellere Injektionsmasse)

clododecan durch geringe Abstände zur Düse punktuell auch stark belastet. Es kam jedoch nur bei einem Spritzabstand von wenigen Zentimetern zu einem Abtrag der Beschichtung. Ca. eine Stunde nach dem Auftrag wurden die Überschüsse grob entfernt. Alle weiteren Überschüsse konnten mühelos mechanisch nachgereinigt und nach der Sublimation der CCD-Beschichtung vollständig entfernt werden (Abb. 13). Ein wichtiges Ziel dieses Vorversuchs war die Überprüfung der Eindringtiefe der gespritzten Masse in den Rissen. Dazu wurden die Ziegel wieder auseinander gebrochen. Es zeigte sich, dass selbst bei einer Rissbreite von 2–3mm noch Eindringtiefen von 8 bis 12mm erreicht werden können (Abb. 14). An einem zweiten Holzkasten wurde das Schwindverhalten der Antragsmasse bei einer Verarbeitung im Trockenspritzverfahren geprüft. Dabei entstand ein Block mit 27×42×9cm der auch nach 3 Monaten Außenlagerung keine Schwindrisse zeigte (Abb. 15).



Abb. 15: Mörtelblock – gespritzt mit 27×42×9 cm

6 Erste Musterfläche vor Ort

Nachdem diese Vorversuche an verschiedenen Ziegeloberflächen positiv verlaufen waren, wurde eine Musterfläche vor Ort vorbereitet. Wir hatten uns für die meisten weiterführenden Musterflächen einen Bereich mit erheblichen Schäden an den Ziegeln aus-

gewählt (Abb. 4 und 16). Innerhalb dieses Bereichs wurde eine Versuchsfläche zunächst von Bewuchs und Algen befreit (Abb. 17 und 18). Anschließend wurden alle Flächen, die nicht mit der Antragsmasse beschichtet werden sollten, mit Cyclododecan versiegelt (Abb. 19). Eine robuste Maske sollte die weitere



Abb. 16: Raum 13a, Untersicht des Gewölbes



Abb. 17: Raum 13a, Musterfläche im Vorzustand



Abb. 18: Raum 13a, Musterfläche nach Abnahme von biologischem Bewuchs



Abb. 19: Raum 13a, Musterfläche mit der Beschichtung aus Cyclododecan



Abb. 20: Raum 13a, Musterfläche, Beschichtung im Trockenspritzverfahren



Abb. 21: Raum 13a, Musterfläche nach der Beschichtung

Umgebung vor dem Materialnebel während des Spritzens schützen (Abb. 20). Das an den ersten Vorversuchen erprobte Verfahren konnte auch an der Musterfläche vor Ort bestätigt werden. Unmittelbar nach dem Materialantrag mit der Trockenspritzanlage⁵ (Abb. 21) wurde die Fläche mechanisch nachbearbei-

tet. Die Überschüsse konnten dabei verhältnismäßig einfach von der Cyclododecanbeschichtung abgenommen werden (Abb. 22 und 23). Die verbliebenen Reste wurden nach der Sublimation von CCD weitgehend mit dem Staubsauger abgesaugt (Abb. 24, 25 und 26).



Abb. 22: Raum 13a, Musterfläche nach einer ersten Abnahme der Mörtelüberschüsse



Abb. 23: Endzustand der ganzen Musterfläche nach dem Absaugen der Mörtelreste



Abb. 24: Detail vom Endzustand



Abb. 25: Detail vom Endzustand



Abb. 26: Detail vom Endzustand an der Schnittstelle zwischen bearbeiteter Fläche und dem Vorzustand. Photo: Michael Auras



Abb. 27: Micro-Trockenspritzanlage



Abb. 28: Micro-Trockenspritzanlage – Detail der Düsen

7 Micro-Trockenspritzanlage

Die guten Erfahrungen bei der Verarbeitung der Mörtel mit einer Trockenspritzanlage haben bei uns zu dem Wunsch geführt, noch kleinteiliger und mit einer leichteren, beweglicheren Anlage arbeiten zu können. In Zusammenarbeit mit einem Maschinenhersteller ist es gelungen, eine kleine, nur ca. 25 kg schwere Micro-Trockenspritzmaschine zu entwickeln, die bei der Aufgabenstellung an den Trierer Kaiserthermen sehr gut zum Einsatz kommen kann (Abb. 27 und 28). Die Arbeiten mit dieser Maschine befinden sich gegenwärtig noch in einer Erprobungsphase.

Anmerkungen

- 1 Wir konnten dabei auf jahrelange Erfahrung beim Einsatz von industriell hergestelltem Metakaolin der Fa. Newchem zur Herstellung von Injektionsmörteln für das Kloster Maulbronn zurückgreifen. Den ersten Hinweis auf die Verwendbarkeit von schwach gebranntem Kaolin hatten wir vom Kollegen Wilhelm Glaser, der mit einem selbst gebrannten Material gearbeitet hatte. (Siehe auch Vortrag Hangleiter bei der Exkursion nach Maulbronn auf der Natursteintagung 2010)
- 2 NEWCHEM Group/Germany/temcon solutions GmbH, Geschäftsführer: Michael Kassautzki, Alsfeld
- 3 BECO Bermüller & Co. GmbH, Nürnberg
- 4 Untersuchungen durch das IFS Mainz, Herr Dr. Auras, Druck- und Biegezugfestigkeiten wurden an der Materialprüfanstalt Wiesbaden bestimmt. Die Daten an den römischen Ziegeln sind Mittelwerte aus 2 bis 4 Einzelbestimmungen.
- 5 Ein Mitarbeiter der Fa. Mader aus Erbach (Odw.) führte die Arbeiten mit eigenem Gerät aus.

Literatur

- [1] Klaus Peter Goethert: „Kaiserthermen“ in Römerbauten in Trier. Edition Burgen Schlösser Altertümer Rheinland-Pfalz, Führungsheft 20, 2. Auflage 2010, Verlag Schnell und Steiner GmbH

Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Nachhydrophobierung am Kapellenturm in Rottweil

von Friedrich Grüner

Kapellenturm Rottweil
Beprobungsstelle 023
25.10.2010

Der Kapellenturm in Rottweil wurde zu Beginn der 1970er Jahre und erneut Mitte der 1980er Jahre im Oktogonbereich hydrophobiert. Dabei sind bauzeitlicher Schilfsandstein, Ersatzmaterial des 19. Jahrhunderts und der in jüngerer Zeit als Ersatzgestein verwendete Kordeler Sandstein behandelt worden. Nach neuerlich erforderlich gewordenen Eingriffen in die Substanz und abgeschlossener Steinrestaurierung stellte sich die Frage einer Nachhydrophobierung erneut. Untersuchungen zur mehrfachen Hydrophobierung von Schilfsandstein und Kordeler Sandstein wurden an Proben von Ausbaumaterial durchgeführt, um die Veränderung wichtiger bauphysikalischer Eigenschaften zu verfolgen.

1 Objekt- und Restaurierungsgeschichte

Für den Bau des Kapellenturmes und der Kirche in Rottweil wurden vor allem regional vorkommende Natursteine, hier Stubensandstein und grünlicher Schilfsandstein verwendet.

Der tonig gebundene und weiche Schilfsandstein wurde bevorzugt für feingliedrige Werksteine und Bildhauerarbeiten verwendet. Mit dem Bau wurde vermutlich um 1330 begonnen und der Kapellenturm kann in drei Abschnitte unterteilt werden. Ein quadratischer Unterbau mit mehreren Portalen und seitlich angesetzten Treppentürmen, gefolgt von einem Mittelabschnitt, der im 15. Jahrhundert von einem achteckigen Glockengeschoß (Oktogon) abgeschlossen (Abb. 1) wird.

Schon frühzeitig sind Standsicherheitsprobleme und Verwitterungsschäden am Schilfsandstein aufgetreten, die massive Eingriffe in die Bausubstanz zur Folge hatten. Erste schriftlich datierte Maßnahmen sind von 1815–1819 mit dem Austausch von desolaten Brüstungsmaßwerken bekannt. In den Jahren 1882–1896 sind aufwändige Steinaustauschmaßnah-

men am Mittel- und Oberbau belegt. Damals kamen vor allem Schilfsandsteine aus den Brüchen der näheren Umgebung in Trichtingen, Rosenfeld und Vöhrenfeld zur Verwendung. Im 20. Jahrhundert wurden die Brüstungsmaßwerke (ab ca. 1950) erneut ausgetauscht, diesmal jedoch komplett in Muschelkalk ersetzt. Bei den nachfolgenden Natursteinarbeiten in den 1960er Jahren wurde Kordeler Sandstein aus der Gegend von Trier als neues Ersatzgestein verwendet. Zwischen 1966 und 2001 sind kontinuierliche Arbeiten zur Natursteinaustausch und -konservierung belegt [1].

Aus dem Jahr 1968 konstatieren Akten der Kirchengemeinde ein Angebot der Fa. Prochaska Bauchemie zur Steinreinigung, Festigung und abschließenden Hydrophobierung der Natursteinflächen am Kapellenturm nach dem Hermetique-Verfahren. Über die verschiedenen Produkte und deren chemische Zusammensetzung sind heute so gut wie keine verlässlichen Angaben mehr zu finden, jedoch hat es sich zumindest bei dem Produkt Hermetique-Sandex um ein Produkt mit „besonderer Flusssäurekombination“ zur Steinfestigung gehandelt [2]. Untersuchungen zu den Natursteinschäden am Schilfsandstein im Oktogon konnten in jüngster Zeit Reaktionsprodukte in weißlich-grauen Schleierbildungen auf den Steinoberflächen in Form von Fluorit (CaF_2) nachweisen [3]. Weiterhin kann aus den Akten des Regierungspräsidiums Freiburg auf die Durchführung der Steinfestigung in größeren Bereichen des Oktogons im Jahr 1970 geschlossen werden. Abschließend wurde eine erste Schutzbehandlung (Hydrophobierung) mit Hermetique-Silikon, vermutlich durch Besprühen der Steinoberflächen, durchgeführt. Im Jahr 1986 wurde bei einer Nachkontrolle eine Verringerung der wasserabweisenden Wirkung festgestellt und eine erneute Hydrophobierung mit Wacker 290 S empfohlen und durchgeführt. Leicht sandende Stellen sollten zuvor mit Wacker OH gefestigt werden.

Ab dem Jahr 2007 machten herabfallende Gesteinsbrocken erneut Untersuchungen zum Erhaltungszustand und den Verwitterungsschäden notwendig. Mit Hilfe einer umfangreichen Kartierung wurden von Bauforscher Stefan King, Diplomrestaurator Frank Eger aus Balingen und Steinmetz Willi Bucher aus Fridingen die verschiedenen Bauphasen, die verwendeten Natursteine und deren aktueller Schadenszustand aufgenommen und eine abschließende Maßnahmenkartierung erstellt. Ergänzend hierzu wurden Voruntersuchungen an entnommenen Materialproben vom Schilfsandstein aus dem Oktogonbereich vorge-



Abb. 1: historische Ansicht des Kapellenturmes in Rottweil mit gut erkennbarer Bauteilgliederung

nommen. Über die Ergebnisse der Schadens- und Maßnahmenkartierung sowie den naturwissenschaftlichen Voruntersuchungen zum Zustand der Altkonservierung und den hinzugetretenen Schäden und deren möglichen Ursachen wurde bereits ausführlich berichtet [3].

2 Problemstellung Wiederholung einer Hydrophobierung

2.1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurden in Mitteleuropa bereits sehr viele Sandsteinfassaden und -denkmäler mit einer Hydrophobierung behandelt. Schon häufig wurde im Zuge einer Nachkontrolle eine Reduktion der Wirksamkeit über das Monitoring gesteinsphysikalischer Parameter (kapillare Wasseraufnahme) festgestellt. Da eine Veränderung grundlegender gesteinsphysikalischer Eigenschaften durch die mehrfache Anwendung sowohl von Konservierungsmitteln für die Steinfestigung als auch für den Feuchteschutz (Schlagregenbelastung, Hydrophobierung) zu erwarten ist, wurde auch am Beispiel des Regensburger Grünsandsteines und der grünen Mainsandsteine das Verhalten und die Problematik einer Wiederbehandlung ausführlich untersucht [4]. Im Anwendungsfall der wiederholten Hydrophobierung ist in erster Linie eine mögliche Verminderung des Dampfdiffusionsverhaltens zu erwarten, so dass eine Abwägung von Risiken und Nutzen vor einer erneuten Behandlung unbedingt erfolgen muss. Eine hydrophobierende Behandlung ist zudem nicht in der Lage, die Feuchteaufnahme im hygroskopischen Bereich zu beeinflussen, die hauptsächlich an die Porengrößen und damit an die Kapillarkondensation gekoppelt ist. Die Mobilität von im Porenraum bereits vorhandenen Salzen bleibt deshalb in beträchtlichem Umfang vorhanden, da das In-Lösung-Gehen und die Kristallisation von Salzen im Bereich wechselnder Luftfeuchte nicht unterbunden wird [7]. Die Wechselwirkung von Sorptionsfechteaufnahme und verbundener hygrischer Dehnung im hygroskopischen Bereich (= Bereich der Luftfechteaufnahme) wurde an fränkischen Schilfsandsteinen (Sander Schilfsandstein u. a.) untersucht [8]. Für bruchfrisches Material wurde eine deutliche Zunahme des hygrischen Dehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von der Sandsteinvarietät festgestellt. Für bruchfrisches Austauschgestein wurde aufgrund der resultierenden Eigenspannungen kein schädigender Einfluss erwartet, hingegen sind verwitterte und überwiegend tonig-gebundene Sandsteine durch die fehlende Verringerung des hygrischen Quellverhaltens durch eine hydrophobieren-

de Behandlung weiterhin einem erhöhten Schadensrisiko aufgrund hygrisch bedingter Eigenspannungen ausgesetzt [8].

Die größte Gefährdung durch hydrophobierende Behandlungen besteht in einer so starken Abnahme der Porosität und Permeabilität der Fassadenoberfläche, dass über Risse und Fehlstellen kapillar eindringende Feuchte hinter der behandelten Zone eingeschlossen wird. Der wasserabweisende Schutzfilm im Porenraum verhindert nachhaltig den Abtransport flüssigen Wassers zur Steinoberfläche [9]. Eine Akkumulation von Salzen durch Umlagerung und häufig anzutreffende Schalenbildung ist die Folge.

2.2 Hydrophobierung am Kapellenturm

Der Materialmix aus Schilfsandstein (bauzeitlich und verschiedene ältere Instandsetzungen) und dem nach 1960 als Ersatzgestein verwendeten Kordeler Sandstein (Abb. 2) hat im Laufe der Voruntersuchungen eine noch sehr deutlich vorhandene Hydrophobie aufgewiesen. Insbesondere hat der Kordeler Sandstein bei Messungen der kapillaren Wasseraufnahme



Abb. 2: Kapellenturm, Oktogonbereich, Vorzustand hydrophobierter Kordeler Sandstein mit abgedunkelten Streifenbildungen

vor Ort mit Karsten'schem Prüfrohr im Durchschnitt einen w-Wert von $0,3 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{-0,5}$ ergeben. Aus publizierten Einzelwerten einer geowissenschaftlichen Bestandsaufnahme und Untersuchung gesteintechnologischer Eigenschaften wurde ein Mittelwert von $3,98 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{-0,5}$ für die kapillare Wasseraufnahme berechnet [5]. Die Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruckbedingungen wurde aus diesen Werten zu im Mittel 5,86 M.-% berechnet [5].

Für Schilfsandstein im Oktogonbereich des Kapellenturmes wurde ein mittlerer w-Wert = $0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{-0,5}$ mit Hilfe des Auswertungsprogrammes Calcarow 3.2 nach Wendler und Pfefferkorn berechnet. Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Hydrophobierungen gibt es Bewertungskriterien nach WTA mit einer Skala von 1–5 [10]. Der Grenzwert für eine anstehende Wiederholungsbehandlung einer Fassade oder auch nach nur von Schlagregen exponierten Flächen wird mit $w = 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{-0,5}$ angegeben [6, 7]. Eine gut und effektiv funktionsfähige Hydrophobierung sollte einen w-Wert von $< 0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{-0,5}$ aufweisen [4, 6, 7, 10]. Überwiegend tonig gebundene Sandstein wie Schilfsandstein lassen sich von Haus aus schlechter hydrophobieren als quarzreiche Sandsteine, da letztere einen höheren Anteil von freien Silanolgruppen auf den Quarzoberflächen aufweisen. Tonminerale hingegen weisen nur randlich Silanolgruppen auf, die mit Siloxanen reagieren können und deshalb nur segelförmig aufgespannte Polysiloxanfilme von Tonpartikel zu Partikel bilden [11 in 4].

Somit stand für den Abschluss der aktuell durchgeführten Steinrestaurierungsarbeiten die Frage nach einer zweiten Wiederholung der Hydrobierung zur Entscheidung. Neben dem vorhandenen Materialmix aus Schilfsandstein und Kordeler Sandstein sind zahlreiche neue Sander Schilfsandsteinquader im Rahmen von Vierungen und Steinaustausch verbaut worden. Dies hat im Oktogonbereich zu einem „patchwork“ aus sehr unterschiedlich gut hydrophobiertem Material einschließlich nicht hydrophobierter, neu hergestellter Fugenanteile und Sander Schilfsandstein geführt.

3 Untersuchungen und Ergebnisse

Für die zu fordernde Eindringtiefe von Steinschutzmittel (Hydrophierung) ist die Kenntnis der Lage des Maximums der mittleren Feuchteverteilung im Stein besonders wichtig, da hiervon die Beeinflussungszone der kurzfristiger Klima- und Umgebungsfeuchteschwankungen abhängt. Für Natursteine mit niedrigem w-Wert ergibt sich hieraus eine erforderliche

Eindringtiefe von 10–20 mm, für Gesteine mit mittlerem w-Wert von 30–40 mm und für Gesteine mit hohem w-Wert von mehr als 50 mm [12]. Weitere Anforderungen an die Wiederholbarkeit einer Hydrophobierung, die sich auch mit den generellen Anforderungen für eine Behandlung decken [6, 7], sind:

- Nur geringe Veränderungen physikalischer Eigenschaften wie Farbe bzw. Farbvertiefung, Glanz, thermische und hygrische Dehnung
- Vermeidung einer signifikanten Zunahme des Wasserdampfdiffusionswiderstandes
- guter Haftverbund zu den Mineraloberflächen bzw. Durchtränkung von Tonmineraloberflächen

Für erste Versuche zur erneuten Nachhydrophobierung wurden Remmers SL (anwendungsfertig verdünnt) und Wacker SilRes BS 290, 1:10 und 1:15 verdünnt mit MEK (Methylethylketon) ausgewählt. Die Musterflächen wurden im Herbst 2010 von Diplomrestaurator Frank Eger aus Balingen am Turm angelegt (Abb. 3) und nach rund 6 Monaten im März 2011 nachuntersucht. Hierzu wurde die kapillare Was-

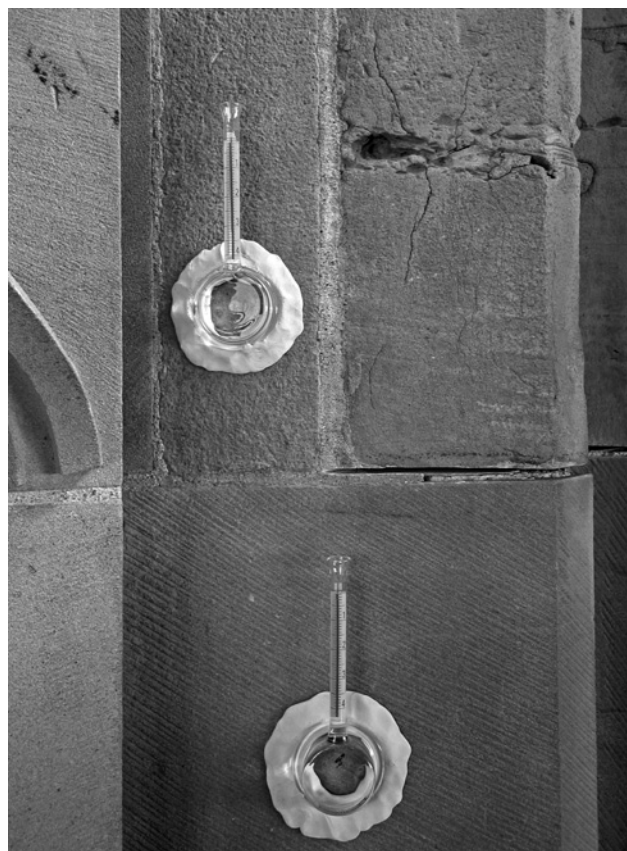


Abb. 3: Musterfläche 022, behandelt mit Wacker SilRes BS 290, 1:10, während des kapillaren Saugversuches, oberer Quader aus Schilfsandstein, Kordeler Sandstein in der unteren Bildhälfte

seraufnahme mit Karsten-Messröhrchen in Milliliter pro Zeiteinheit gemessen und der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) berechnet. Für die Auswertung wurde die Software Calkarow 3.2 von Dr. Eberhard Wendler und Dr. Stephan Pfefferkorn verwendet. Die Ergebnisse in Tabelle 1 lassen folgende Tendenzen erkennen:

- Remmers SL hat eine vergleichsweise gleichmäßige Wirksamkeit auf Kordeler Sandstein und Schilfsandstein gezeigt, das Anforderungskriterium an eine sehr gut wirksame Hydrophobierung von $w < 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{-0,5}$ [6] wird nicht erreicht.
- Die beobachtete Saugfähigkeit der Musterflächen mit Remmers SL ist laut Applikationsprotokoll geringer als die zuvor kalkulierte Sollverbrauchsmenge von 3 l/m^2 .
- Die Wirksamkeit von Wacker SilRes BS 290 in den Verdünnungen 1 : 10 und 1 : 15 ist für Kordeler Sandstein höher, in der Regel wurde das höchste Gütekriterium erreicht [6].
- Die Schutzmittelaufnahme von verdünntem SilRes BS 290 war generell höher und hat dem Sollverbrauch entsprochen.
- Problematisch bleibt auch hier die Applikation auf Schilfsandstein, nur teilweise kann eine gute Wirksamkeit erzielt werden. Die Ursachen hierfür sind im Erhaltungszustand und den Auswirkungen der vorangegangenen Steinkonservierung der 1970er Jahre zu suchen.

Die Eindringtiefe am Schilfsandstein konnte durch eine Probeentnahme und Begutachtung im Querschnitt überprüft werden, da die Musterapplikation in Bereichen, die für einen Steinaustausch vorge-

sehen waren, vorgenommen wurde. Es wurde eine Eindringtiefe von 10–15 mm in den meisten Fällen erreicht (siehe auch Abb. 4–7), die als ausreichend für Schilfsandstein eingeschätzt wird [10]. Die Auswertung zeigt aber auch, dass z. B. fleckenartig auch schlecht hydrophobierte Bereiche im Tiefenprofil verbleiben können. Auflockerungszonen und existierende Schalenbildung beeinflussen das Ergebnis ebenso negativ.

Für eine Einschätzung der Veränderung gesteinsphysikalischer Eigenschaften durch die mehrfache Hydrophobierung wurde eine zwei- bis dreimalige Anwendung simuliert. Diese Untersuchung wurde angeregt, weil durch den geplanten Bauablauf am Turm zunächst eine Überlappung der neuen Hydrophobierung durch die Ausführung in 2 Bauabschnitten vorgesehen war. Hierzu wurden Bohrkern aus Schilfsandsteinquadern und Kordeler Sandstein, die zum Austausch vorgesehen waren, gezogen, in gleichmäßig dicke Scheiben von 10 mm geschnitten und mehrfach behandelt. Aufgrund der Ergebnisse der Bauforschung konnte Versuchsmaterial aus bauzeitlichem Schilfsandstein, Ersatzmaterial aus dem 19. Jahrhundert und bruchfrischer, als neues Ersatzgestein vorgesehener Sander Schilfsandstein beprobt werden. Weiterhin wurde auch Kordeler Sandstein am Bauwerk beprobt. Durch die Probenahme stand althydrophobiertes und aus der Tiefe auch nicht hydrophobiertes Vergleichsmaterial derselben Steinsorte zur Verfügung.

Die Bohrkernentnahme und die Herstellung der Musterscheiben wurden von Fa. Stein Abel vorgenom-

Tab. 1: Ergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme (w -Werte) an Schilfsandstein und Kordeler Sandstein, Bewertung nach [10]

Muster Nr.	Material	Sandstein	w -Wert [$\text{kg/m}^2\text{h}^{-0,5}$]	Bewertung
020	Remmers SL	Schilfsandstein	0,20	2
020	Remmers SL	Kordeler Sandstein	0,21	2
021	Remmers SL	Kordeler Sandstein	0,21	2
021	Remmers SL	Schilfsandstein	0,14	2
022	SilRes BS 290, 1 : 10	Schilfsandstein	0,09	1
022	SilRes BS 290, 1 : 10	Kordeler Sandstein	0,05	1
023	SilRes BS 290, 1 : 10	Kordeler Sandstein	0,10	1
023	SilRes BS 290, 1 : 10	Schilfsandstein	0,51	4
024	SilRes BS 290, 1 : 15	Kordeler Sandstein	0,07	1
024	SilRes BS 290, 1 : 15	Schilfsandstein	0,10	1
025	SilRes BS 290, 1 : 15	Schilfsandstein	0,32	4
025	SilRes BS 290, 1 : 15	Kordeler Sandstein	0,10	1

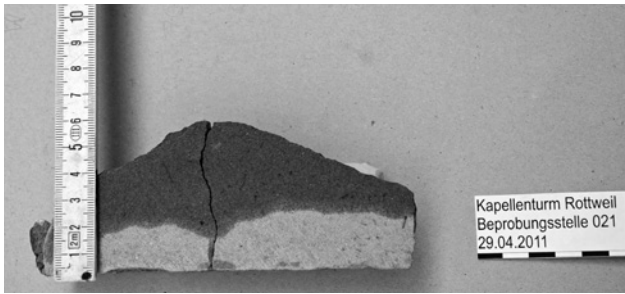


Abb. 4: *Musterfläche 021, bauzeitlicher (?) Schilfsandstein im Querschnitt, behandelt mit Remmers SL und benetzt mit Wasser, heller Bereich = hydrophobiert, wechselnde Eindringtiefe ca. 15–20 mm*

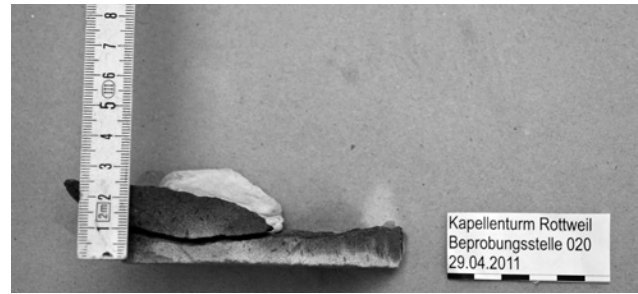


Abb. 5: *Musterfläche 020 im Querschnitt und mit Wasser benetzt, Schilfsandstein behandelt mit Remmers SL, geringe Eindringtiefe von ca. 3–6 mm, vorhandene Schalenbildung hat bei der Probenahme zur Ablösung geführt.*

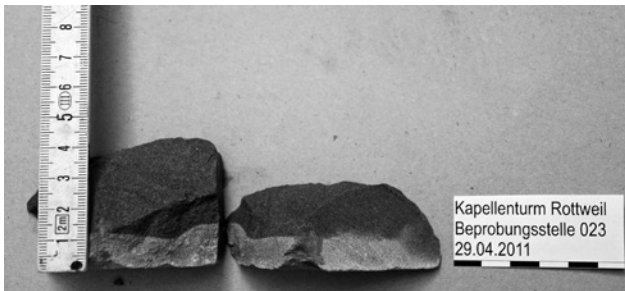


Abb. 6: *Musterfläche 023 im Querschnitt und mit Wasser benetzt, Schilfsandstein behandelt mit SilRes BS 290 1 : 10, erreichte Eindringtiefe 10–12 mm.*

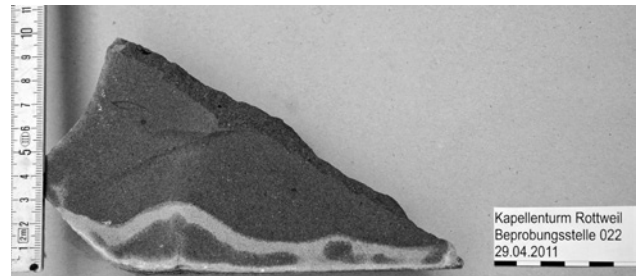


Abb. 7: *Musterfläche 022, die originale Steinoberfläche zeigt zur unteren Bildkante, behandelt mit Wacker SilRes BS 290, die durchschnittliche Eindringtiefe beträgt ca. 15 mm, jedoch scheinen nicht hydrophobisierte Inseln zu bestehen*

men, die Tränkung mit dem Steinschutzstoff Wacker BS 290, verdünnt 1 : 15, wurde mittels kapillarem Saugen im Labor durchgeführt. Es wurden bis zu 2 neue Hydrophobierungen mit einer Ruhephase von 30 Tagen und Lagerung unter konstanten Klimabedingungen von 20 °C und 65 % r.F. appliziert, so dass im Falle der Althydrophobierung eine vermutlich 4-fache Behandlung vorliegt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass bei der Erstbehandlung mit Hermetique-Silikon nur wenig Material im Sprühverfahren aufgebracht und vom Sandstein aufgenommen wurde. Für die Versuchsanwendungen wurden die Probescheiben jeweils vollständig durchtränkt. Nach Abschluss und Aushärtung bzw. Trocknung der durchgeführten Hydrophobierungen unter Umgebungsbedingungen von 20 °C und 65 % r.F. für weitere 20 Tage wurden die Scheiben unter konstantem Klima im Labor bei 23 °C und 50 % r.F. bis zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes konditioniert. Es wurden je Versuchsansatz 3 Bohrkernscheiben untersucht.

Eine visuelle Kontrolle von Farbveränderungen hat mit zunehmender Zahl der Hydrophobierungen eine sehr starke Abdunkelung für bauzeitlichen Schilf-

sandstein und Kordeler Sandstein gezeigt (Abb. 8, 9). Die Farbvertiefungen für bruchfrischen Sander Schilfsandstein und Material aus dem 19. Jahrhundert fallen hingegen geringer aus, sind aber trotzdem deutlich zu erkennen (Abb. 10, 11).

Die Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes wurde im wet cup Verfahren (93 % r.F. / 50 % r.F.) durchgeführt. Der Durchmesser der Bohrkernscheiben hat 52 mm und die Dicke 10 mm betragen. Die Ergebnisse zur Wasserdampfdiffusionsfähigkeit sind in Tabelle 2 (Schilfsandsteine) und Tabelle 3 (Kordeler Sandstein) dargestellt.

Die Einzelergebnisse schwanken recht deutlich. Dies kann einerseits an den höheren Messunsicherheiten durch die vergleichsweise kleinen gewählten Probengrößen von $d = 52$ mm und andererseits auch an den natürlichen Inhomogenitäten des Probenmaterials liegen. Zusätzlich ist auch der Einfluss der Verwitterung und der voran gegangenen Restaurierungshistorie in Betracht zu ziehen. Für den bruchfrischen Sander Schilfsandstein und die als unbehandelt anzusehenden Scheiben aus größerer Bohrkerntiefe sind letzte-



Abb. 8: Schilfsandstein, bauzeitliches Material, starke Zunahme der Farbvertiefung von nicht hydrophobierten Scheiben (rechts), Althydrophobie, einmal neu hydrophobiert, zweimal neu hydrophobiert (links). Alle Aufnahmen nach vollständiger Trocknung bis zur Massekonstanz der Scheiben im Klima 23 °C/50 % r. F.

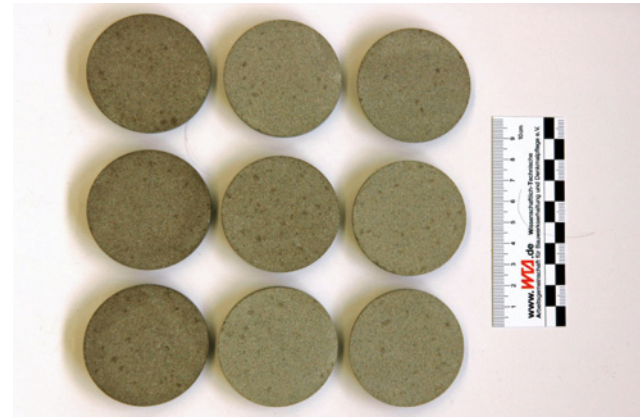


Abb. 9: Schilfsandstein, 19. Jahrhundert, Zunahme der Farbvertiefung von nicht hydrophobierten Scheiben (rechts), einmal hydrophobiert, zweimal hydrophobiert (links).



Abb. 10: Sander Schilfsandstein, neues Ersatzmaterial, Zunahme der Farbvertiefung von nicht hydrophobierten Scheiben (rechts), einmal hydrophobiert, zweimal hydrophobiert (links).



Abb. 11: Kordeler Sandstein, Zunahme der Farbvertiefung von nicht hydrophobierten Scheiben (oben), Althydrophobie, einmal neu hydrophobiert, zweimal neu hydrophobiert (unten).

re Einflüsse nicht von Bedeutung. Die mehrfach angewendete Hydrophobierung hat zu einer deutlichen Abnahme der Wasserdampfdurchlässigkeit, d.h. zu einer starken Erhöhung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gegenüber den Ausgangswerten nicht hydrophobierter Sandsteinproben geführt. Gegenüber dem bauzeitlichen, unbehandeltem Schilfsandstein ist bei neuerlicher, zweifacher Hydrophobierung von bereits früher hydrophobierten Flächen im Durchschnitt mit einer Verdreifung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes zu rechnen. Auch das vorgesehene Ersatzgestein, Sander Schilfsandstein aus dem fränkischen Abbauggebiet, reagiert mit nahezu einer Verdoppelung der μ -Werte auf eine zweifache Hydrophobierung. Der Kordeler Sandstein, mit

einer offenbar günstigeren Porenraumstruktur, weist große Schwankungen auf und reagiert im Vergleich hierzu moderater.

Erwartungsgemäß verhält sich der stark tonig gebundene Schilfsandstein besonders empfindlich. Der von [6] empfohlene Grenzwert zur Steigerung des μ -Wertes um $< 20\%$ durch die Wiederbehandlung gegenüber dem unverwitterten Materialzustand kann besonders beim Schilfsandstein nicht mehr eingehalten werden. Dies wurde auch schon von [4] bei einer Risikoabschätzung von Folgekonservierungen an Regensburger Grünsandstein und Grünen Mainsandsteinen aus dem fränkischen Bereich von Schloss Schillingsfürst, festgestellt.

Tab. 2: Ergebnisse der Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_d) und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ an Schilfsandstein nach unterschiedlicher Behandlung

Probe und Behandlungsstatus	s_d -Wert [m]	Wider- standszahl μ	Mittelwert μ
Schilfsandstein bauzeitlich unbehandelt	0,07	6,7	7,1
Schilfsandstein bauzeitlich unbehandelt	0,07	7,1	
Schilfsandstein bauzeitlich unbehandelt	0,08	7,5	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert Vorderseite	0,16	15,4	15,6
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert Vorderseite	0,16	16,2	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert Vorderseite	0,15	15,1	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,15	14,3	16,6
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,20	19,1	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,17	16,3	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,27	26,7	22,3
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,20	19,7	
Schilfsandstein bauzeitlich teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,21	20,5	
Schilfsandstein 19 Jhd. unbehandelt	0,11	10,4	11,1
Schilfsandstein 19 Jhd. unbehandelt	0,11	10,8	
Schilfsandstein 19 Jhd. unbehandelt	0,12	12,0	
Schilfsandstein unbehandelt 1. Hydrophobierung	0,17	17,2	16,4
Schilfsandstein unbehandelt 1. Hydrophobierung	0,17	16,6	
Schilfsandstein unbehandelt 1. Hydrophobierung	0,15	15,3	
Schilfsandstein unbehandelt 2. Hydrophobierung	0,18	18,0	17,6
Schilfsandstein unbehandelt 2. Hydrophobierung	0,17	17,4	
Schilfsandstein unbehandelt 2. Hydrophobierung	0,17	17,3	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial unbehandelt	0,14	13,0	12,8
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial unbehandelt	0,12	12,5	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial unbehandelt	0,13	12,8	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 1.Hydrophobierung	0,22	21,3	20,8
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 1.Hydrophobierung	0,21	21,0	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 1.Hydrophobierung	0,21	20,2	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 2.Hydrophobierung	0,23	21,7	21,5
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 2.Hydrophobierung	0,21	21,1	
Sander Schilfsandstein Ersatzmaterial 2.Hydrophobierung	0,22	21,8	

4 Zusammenfassende Bewertung

Die Bewertung der ausgeführten Musterapplikationen von Remmers SL und Wacker SilRes BS 290 hat Unterschiede im Eindringvermögen, Mittelverbrauch und in der Reduzierung des Wasseraufnahmekoeffizienten aufgezeigt. Werden die noch eine Resthydrophobie zeigenden Sandsteinflächen nur einmal hydrophobiert, so kann die Anforderung einer Zunahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von < 20 % [6] für den Kordeler Sandstein und zumindest

teilweise auch für den Schilfsandstein eingehalten werden. Im Falle einer Nichtbehandlung sind die zu einem großen Anteil neu vermörtelten Fugen, die vielfach neu eingesetzten Vierungsstücke und die neuen Quadersteine zu bedenken, über die vermehrt Feuchte bei Schlagregenbelastung in das Mauerwerk des Turmes gelangen kann. Für die Durchführung der anstehenden Hydrophobierungsarbeiten und den geplanten Bauablauf am Kapellenturm in Rottweil ergibt sich, dass eine überlappende Hydrophobierung

Tab. 3: *Ergebnisse der Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_d) und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ an Kordeler Sandstein nach unterschiedlicher Behandlung*

Probe	s_d -Wert [m]	Widerstandszahl μ	Mittelwert μ
Kordeler Sandstein unbehandelt	0,13	13,0	12,3
Kordeler Sandstein unbehandelt	0,12	11,8	
Kordeler Sandstein unbehandelt	0,12	12,1	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert	0,10	10,3	11,4
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert	0,13	12,3	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert	0,12	11,5	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,11	11,4	13,4
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,16	15,1	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 1. Hydrophobierung	0,14	13,6	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,18	17,5	15,4
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,14	13,8	
Kordeler Sandstein teilhydrophobiert 2. Hydrophobierung	0,15	14,9	

vermieden werden sollte. Einerseits ist eine derartige Zone durch eine besonders starke Farbvertiefung erkennbar und andererseits erhöht sich der Wasserdampfdiffusionswiderstand mit jeder weiteren Hydrophobierung beträchtlich.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Kirchengemeinde, der Bauleitung, den beteiligten Restauratoren und Steinmetzen und dem Landesamt für Denkmalpflege für die Möglichkeit der weiterführenden Untersuchungen und die gute Zusammenarbeit am Kapellenturm.

Literatur

- [1] King, S. Rottweil Kapellenturm: Bauphasenkartierung am Oberbau mit bauhistorischen Anmerkungen; Freiburg 2009, unveröffentlichter Bericht
- [2] Technisches Merkblatt zu Hermetique-Sandex, Prochaska Bau-Chemie, Garmisch Partenkirchen
- [3] Grüner, F.; Bucher, W., Eger, Frank: Grenzen und Möglichkeiten der Natursteinkonservierung am Beispiel des grünen Schilfsandsteines vom Kapellenturm in Rottweil. - Natursteintagung 2010, Stuttgart
- [4] Meinhardt-Degen, J. (2005): Geologisch-mineralogische und materialtechnische Untersuchungen zur Risikoabschätzung von Folgekonservierungen bei Sandsteinen am Beispiel von Regensburger Grünsandstein und Grünem Mainsandstein. – Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München
- [5] Beyer, F.-M. (1996): Geowissenschaftliche Bestandaufnahme und Untersuchung der petrographischen und gesteintechnologischen Eigenschaften von mesozoischen Naturwerksteinen der Westeifel. – Diplomarbeit an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
- [6] Snethlage, Rolf 1997: Leitfaden Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, Fraunhofer IRB Verlag
- [7] Snethlage, R., Wendler, E. 1996: Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, S. 3–40
- [8] Möller, U., 1991: Auswirkungen der Gesteins-hydrophobierung auf das thermohygrische Formänderungsverhalten. IBP – Mitteilung 206
- [9] De Witte, E., Bos, K., 1992: Conservation of ferruginous sandstone used in Northern Belgium, Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Delgado Rodrigues, J., Henriques, F., Telmo Jeremias F., (Ed.). Lisbon, Portugal, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, pp. 1113–1125
- [10] WTA Merkblatt 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen, Ausgabe 06.2010/D, WTA, Wissenschaftlich – Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.
- [11] Snethlage, R., Wendler, E., (2000): Chemical Compounds for Conservation of Natural Stone, Vorlesungsskript, LMU München, Fachbereich Geowissenschaften
- [12] Snethlage, R., Wendler, E., Klemm, D.D. 1995: Tenside im Gesteinsschutz – bisherige Resultate mit neuem Konzept zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, S. 127–146


Abbildungen

Abb. 1: Marburger Index

Abb. 2, 4, 5, 6, 7: Diplomrestaurator Frank Eger

Zu viel oder zu wenig? Die unterschiedlichen Funktionsweisen von Wasser bei der Zerstörung wertvoller Ober- flächen aus vulkanischen Gesteinsmaterialien

von Eberhard Wendler, Helen Jacobsen, María Paula Álvarez,
Esther von Plehwe-Leisen, Hans Leisen und Ute Steinhäuser



Die Eigenschaften vulkanischer Gesteine hängen in vielfältiger Weise vom Wechselspiel der zugrunde liegenden Magmen mit Wasser während des Aufstiegs und in der Eruptionsphase ab. Explosive Förderung führt zu wenig stabilen, meist stark verwitterungsempfindlichen Materialien, die im wechselfeuchten Milieu durch Dilatationsprozesse Gefügeschwächungen erleiden.

Feuchtekonzanz ist hier für den Erhalt zwingend erforderlich. Stabilere Baustoffe entstehen dagegen bei ruhiger, effusiver Magmenförderung. Trotz hygrischer Stabilität können jedoch auch diese Materialien Schäden erleiden, wenn sie intensiv von Feuchte durchsetzt werden, welche andernorts zuvor mobilisierte Elektrolyte auf den Oberflächen deponiert. Eine Kontrolle der Feuchteströme ist hier die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Restaurierung.

1 Einleitung

Der Wassergehalt von aufsteigenden Magmen sowie deren Kontakt mit externem Grund- und Oberflächenwasser beim Ausbruch beeinflussen bereits bei der Bildung stark die Eigenschaften magmatischer Gesteine. An zwei Beispielen aus Südamerika und Südostasien soll gezeigt werden, dass Wasser auf sehr unterschiedliche Weise auch zum Zerfall wertvoller Gesteinsoberflächen führen kann. Die petrophysikalischen Eigenschaften vulkanischer Materialien besitzen eine extreme Varianz. Ursachen sind vor allem Unterschiede in der Magmenzusammensetzung sowie in den Abläufen des jeweiligen Ausbruchsszenarios, die wiederum stark von den Umgebungsbedingungen abhängen: Eher ruhig ausfließende Laven können durch verhältnismäßig langsame Abkühlung stabile Mineralphasen und dadurch Gesteine mit hohen Kristallinitätsanteilen ausbilden und zeigen oft eine bemerkenswert hohe Verwitterungsresistenz. Umgekehrt besitzen Eruptivmaterialien, deren Förderung überwiegend explosionsartig verlief, meist eine ausgeprägte Neigung zum Zerfall in wechselnden Klimabedingungen, da metastabile Zustände beim Abkühlen „eingefroren“ wurden. Diese pyroklastischen Ablagerungen (Tuffe, Tuffite) besitzen auf Grund ihres sedimentären Charakters mit häufig schlechtem Sortierungsgrad (z.B. aus „Glutwalzen“ abgelagerte Ignimbrite) bereits a priori oft deutlich geringere Festigkeiten als etwa Basalt- oder Andesitlaven, was andererseits ihre Verwendung als leicht

gewinnbaren Baustoff erklärt. Die rasche Abkühlung der Auswurfmaterialien bedingt in Verbindung mit der oft silikatreichen Zusammensetzung der zugrunde liegenden Magmen die thermodynamische Labilität von Tuffen. Die meist hohen Anteile an Glasphase unterliegen zudem einer stetigen Umwandlung: neben Entglasungsprozessen, die durch Bildung neuer kristalliner Phasen die spezifische Oberfläche beträchtlich erhöhen und dadurch eine hohe hygrische Quellfähigkeit bedingen können [2], kommt es u.a. auch zur Umwandlung in stabilere Schichtsilikate. Auch diese sind oft quellfähig und erhöhen dadurch die Verwitterungsanfälligkeit der Baustoffe im Feuchtwechsel.

2 Der Einfluss von Wasser auf die Eigenschaften von Magmen

2.1 Entstehung, Transport und chemische Entwicklung

Basaltische Magmen entstammen letztlich dem oberen Erdmantel (ca. 20–70 km Tiefe), der im wesentlichen aus ultramafischen Gesteinen besteht, die unter dem Sammelbegriff Peridotite zusammen gefasst werden. Deren wesentliche Mineralphasen sind Olivin, Pyroxene und, abhängig von der Tiefe, aluminiumführende Minerale wie Spinell und Granat. Die Dichte des (oberen) Mantels ist mit durchschnittlich $3,3 \text{ g/cm}^3$ deutlich höher als die der darüber liegenden Erdkruste ($2,7 \text{ g/cm}^3$).

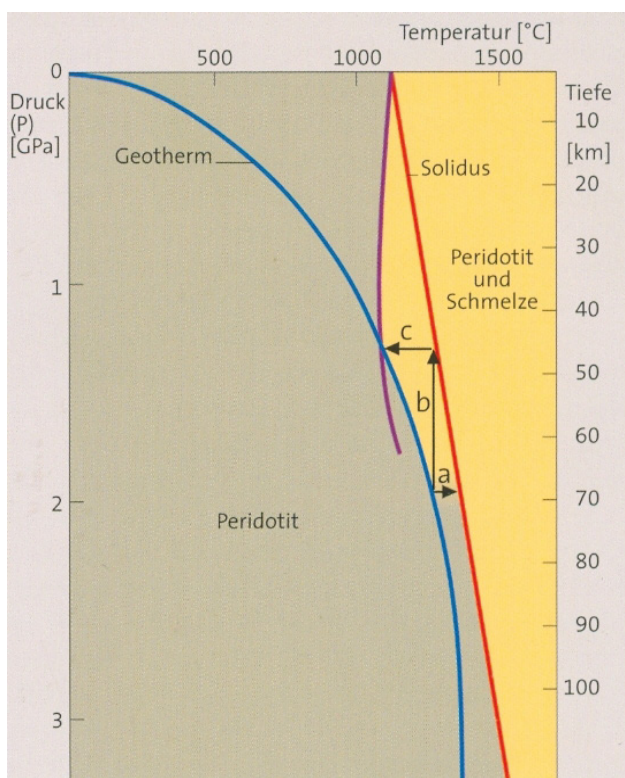


Abb. 1:
Zunahme der Temperatur mit wachsendem Gesteinsdruck („Geotherm“) und Soliduskurve des Mantel-Peridotits. Basaltmagmen können entstehen durch Temperaturerhöhung (a), Druckentlastung (b) und Zufuhr von Fluiden (c), vor allem Wasser und Kohlendioxid, aus [1].

Mit wachsendem Gesteinsdruck nimmt die Temperatur von der Erdoberfläche nach unten hin zu (Abb. 1). Obwohl in ca. 50 km Tiefe eine Temperatur von ca. 1000 °C herrscht, sind die Gesteine in dieser Tiefe in der Regel noch fest und kristallin, die Soliduskurve des Peridotits wird nicht geschnitten. Ein partielles Aufschmelzen (bei konstanter Zusammensetzung des Gesteins) könnte erfolgen durch Temperaturerhöhung (a) oder Druckentlastung (b). Wie aus Abbildung 1 erkennbar wird, kann jedoch auch eine stoffliche Veränderung (c) bei konstanten Druck- und Temperaturverhältnissen eine Erniedrigung der Peridotitschmelzkurve bewirken. Die Anwesenheit sogenannter fluider Phasen, im wesentlichen H_2O und CO_2 , führt zu einem partiellen Aufschmelzen des Mantelgesteins (Peridotit).

Unter den in einigen Kilometern Tiefe herrschenden Druck- und Temperaturbedingungen bildet Wasser zusammen mit zahlreichen gelösten Gasen eine überkritische Flüssigkeit (ein „Fluid“), d. h. Flüssigkeit und Dampf sind nicht mehr klar voneinander unterscheidbar. Das Leidenfrost'sche Phänomen einer sperrenden Dampfschicht tritt in diesen Tiefen also nicht mehr auf, und die Magmen sind je nach Zusammensetzung und Polarität in mehr oder weniger großem Ausmaß mit Wasser (sowie auch CO_2 und anderen Volatilen) mischbar. Der Eintrag von Wasser ist etwa

beim Abtauchen ozeanischer Kruste in Subduktionszonen möglich. Unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen kann dieses Wasser in OH-haltigen Mineralen wie Glimmern oder Amphibolen „geparkt“ sein, unter anderen Bedingungen kann es sich als „freies“ fluides H_2O mit den Magmen mischen [1].

Die Aufnahme von Wasser (und anderen fluiden Phasen) bewirkt neben einer Verringerung der Dichte auch eine deutliche Abnahme der Viskosität sowie partielles Aufschmelzen. All dies sind Faktoren, welche die Mobilität und einen Aufstieg der Magmen in höhere „Stockwerke“ erleichtern. Begrenzt wird dieser Auftrieb durch die Mohorovičić-Diskontinuität („Moho“) zwischen oberem Mantel ($\rho = 3,3 \text{ g/cm}^3$) und Kruste ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$). Diese Stagnation führt dort zur Entstehung von Magmenkammern, in denen, abhängig von Verweildauer und stofflichen Austauschmöglichkeiten mit dem umgebenden Krustengestein, eine Differenzierung der Magmen erfolgen kann: Bei langsamer Abkühlung kristallisieren zunächst mafische Minerale wie Olivin, Spinell und Pyroxene, später u. a. auch Feldspäte. Die Restschmelze verarmt also an Elementen wie z. B. Mg, Ca, Fe und Cr, wodurch sie insgesamt silikatischer wird. Die Entfernung von Netzwerkwandlern durch Kristallisation ionischer Komponenten führt folglich zu einer Erhöhung der kovalenten Anteile in der Restschmelze, was anschau-

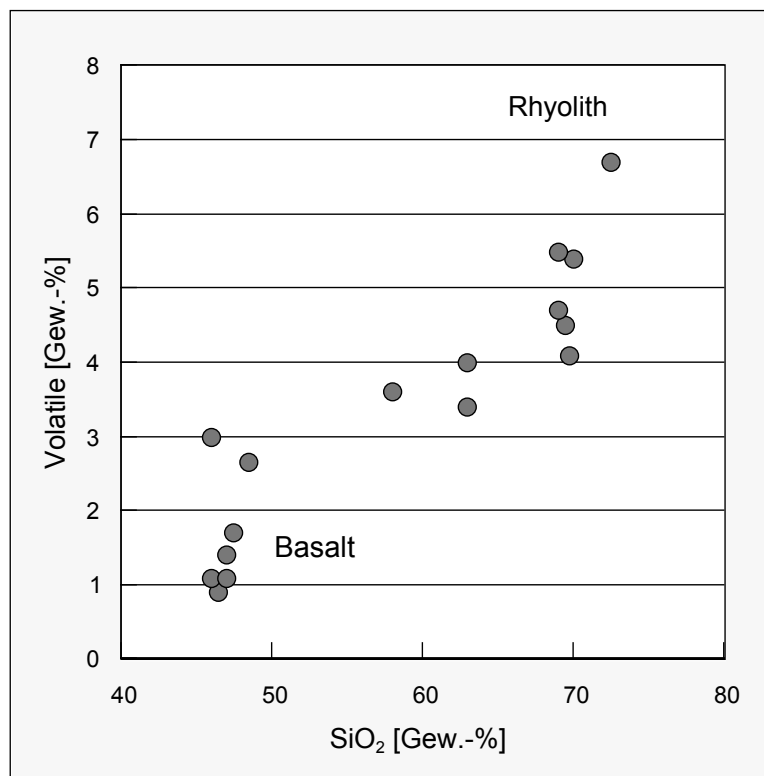


Abb. 2:
Sättigungsgehalte an volatilem H_2O in Abhängigkeit vom SiO_2 -Gehalt des Magmas (geändert nach [1])

lich erklärt, warum diese in ihrer Viskosität deutlich zunimmt.

Die Abnahme der Mobilität (Zunahme der Viskosität) eines durch Anreicherung der kovalent-silikatischen Anteile differenzierten Magmas kann bei entsprechendem Angebot an gelöstem Wasser bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden: Aus Abbildung 2 lässt sich erkennen, dass gerade silikatreiche Magmen bis zu 7 % an fluidem Wasser aufnehmen können, wodurch ihre Viskosität wieder deutlich abnimmt. Basaltische (d. h. gering differenzierte, silikatarme) Magmen können dagegen nur ca. 1 % Wasser aufnehmen, zeigen aber auch ohne Fluidgehalte eine sehr viel geringere Viskosität.

2.2 Effusion oder Explosion

Mit geringerem Druck (geringerer Tiefe) nimmt die Löslichkeit von Volatilen (z. B. Wasser) in einem Magma ab. Durch Druckentlastung und Abkühlung unter den kritischen Punkt im H_2O -Zustandsdiagramm bilden sich bereits beim Aufstieg Gasblasen, deren Anwesenheit die Viskosität wiederum erhöht. Dies führt in Verbindung mit dem immensen Druckanstieg bei der Bildung von Wasserdampf letztlich zur Fragmentierung des Magmas und dadurch zu einer explosiven Eruption. Magmen erreichen also Volatilensättigung schon während des Aufstiegs. Vielfach kristallisieren aber bereits vor einer Eruption OH-haltige Minerale wie Amphibol oder Glimmer in Magmenkammern unterhalb der Oberfläche aus (entsprechend der Abscheidungsabfolge der Minerale), sodass die Magmen zum Zeitpunkt ihres Austritts an Wasser eher untersättigt sind [1].

Etwa gleich bedeutend für den explosiven Charakter eines Ausbruchs wie der primäre Volatilengehalt der Magmen ist der plötzliche Zutritt externen Wassers (z. B. Grundwasser, Gletscher etc.). Diese „phreatomagmatischen“ Eruptionen sind verbunden mit extremer Volumenänderung, was letztlich zu einer starken Fragmentierung des Auswurfmaterials führt [3].

Im Umkehrschluss lässt sich folgern, dass eine geringe Wasserpräsenz (als primäre Volatile und/oder als externes Wasser) eher zu ruhigem, effusivem Verhalten führen wird. Aus der Tiefe mitgebrachte Fluide, die das Aufsteigen durch Viskositätserniedrigung erleichtert haben, sind bestrebt, die Schmelze zu verlassen. Die Geschwindigkeit dieses Entgasungsprozesses sowie die Größe der sich bildenden Blasen hängen wiederum von der Viskosität des Magmas ab. Bilden sich Blasen bereits im Schlot, führt dies zu einem Anstieg der Viskosität des Magmas und zu stagnieren-

dem Transport, letztlich aber auch zu Gasüberdruck und dadurch zur Fragmentierung der Magmen.

In niedrig-viskosen (basaltischen und/oder H_2O -reich) Magmen ist die Keimbildungsgeschwindigkeit und die Wachstumsrate von Kristallen hoch. Daher bildet sich hier auch bei raschem Abkühlen kaum Glasphase aus. Hochviskose (z. B. rhyolithische) Schmelzen bilden hingegen häufig Glas, dessen Struktur (Asche, Bims, Obsidian) von der Geschwindigkeit der Entgasung sowie vom Gehalt an H_2O abhängt.

Die Vielzahl der Parameter bei der Magmenentstehung und -förderung, die gleich- oder gegensinnig auf die mineralogisch-chemische und petrophysikalische Struktur der geförderten Materialien einwirken, bedingt letztlich deren immense Vielfalt. Erschwerend kommt hinzu, dass ein vulkanisches Fördergebiet im Verlaufe unterschiedlicher Ausbruchsphasen (mit oft Jahrhunderte langen Ruhepausen) sehr verschiedene Materialien liefern kann, abhängig von zwischenzeitlich geänderter Magmendifferenzierung sowie unterschiedlichen Ausbruchsszenarien.

Ein einheitlicher Baustoff bei nahe gelegenen Monumenten ist also nicht zu erwarten. Unter diesem Hintergrund ist auch die Interpretation von Schäden an Bauwerken äußerst komplex und erfordert eine differenzierte Vorgehensweise.

3 Fallbeispiele

3.1. Fuente de Lavapatas

(St. Agustín, Kolumbien)

Die vermutlich aus dem 10. Jh. n. Chr. stammende Fuente de Lavapatas (Abb. 3) befindet sich im archäologischen Park San Agustín im Süden Kolumbiens. Der Park enthält die größte Gruppe an religiösen und megalithischen Skulpturen Südamerikas und wurde 1995 in die UNESCO-Liste des Weltkulturerbes aufgenommen.

Die Fuente de Lavapatas war in ihrer ursprünglichen Funktion ein indianisches Brunnenheiligtum, in welchem menschliche und tierische Darstellungen, in einem kunstvoll aus dem weichen Ignimbrit herausgearbeiteten Kanalnetz, dauerhaft von Wasser umspült wurden. Innerhalb des archäologischen Parks nimmt sie, von ihren Erbauern in den anstehenden Fels gehauen, sowohl ingenieurtechnisch wie auch künstlerisch einen besonderen Stellenwert ein.

Geologisch ist die Situation eingebettet in eine vulkanisch aktive Zone (u. a. Pan de Azúcar, 4600 m ü. NN).

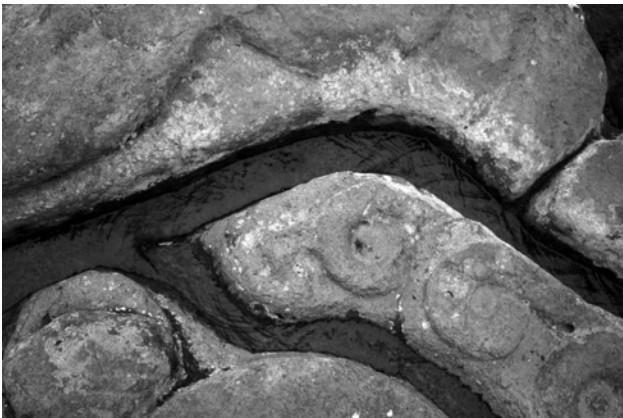


Abb. 3: Fuente de Lavapatas, auf ca. 1700 m ü. NN gelegen in einem Gebiet mit hoch explosivem, im Norden angrenzend noch aktivem Vulkanismus. Die Ignimbrite sind weit gestreut um die bis zu 5700 m hohen Vulkankegel. Das leicht zu bearbeitende Material war ein willkommener Baustoff.

Überwiegend stark differenzierte, silikatreiche Magmen haben über Glutwalzen breite Ignimbritströme hinterlassen, die als Baustein für Skulpturen sowie für die Anlage der Lavapatas Verwendung fanden. Die Brisanz und Weitläufigkeit der regionalen Eruptionen erlangte 1985 am weiter nördlich gelegenen Nevado del Ruiz (5390 m ü. NN) einen traurigen Höhepunkt, als Schuttstromablagerungen eines Lahars die über 50 km östlich gelegene Stadt Armero völlig zerstörten und 25.000 Menschenleben forderten.

Nach wahrscheinlich umfangreichen Substanzverlusten am Lavapatas infolge starker Nutzung direkt nach der Wiederentdeckung und Freilegung der Anlage im Jahr 1937 [4] wurde das Betreten 1944 verboten und zum Schutz des Objektes eine erste Überdachung aus Stroh geschaffen. Gleichzeitig wurde über den „vermutlich negativen Einfluss“ des immer fließenden Wassers diskutiert und im Ergebnis der Zufluss des Quellflusses durch eine manuell bedienbare Schranke eingeschränkt. Diese konnte bei Besuchen am Lavapatas geöffnet werden. 1972 wurde das Strohdach durch ein lichtdurchlässigeres Dach aus Acrylglass ersetzt, und heute wird der Lavapatas durch neuere Acrylschindeln mit UV-Schutzfilter abgeschildert. 1985 wurde der bis dahin manuell kontrol-

lierte Wasserzutritt vollständig verändert, wobei seitdem ein Großteil des Quellflusses über einen Kanal abgeleitet wird und nur ein geringerer Teil des Wassers in ein Kreislaufsystem eintritt. Dabei gelangt das abgeflossene Wasser in ein Becken und wird dann erneut nach oben gepumpt und gefiltert. Das Wasser fließt seitdem täglich während der Öffnungszeiten des Parks.

Trotz vergleichsweise hohem Aufwand für den Erhalt der Anlage ist die Situation aber nur scheinbar stabil: Mehrmals im Jahr kommt es auf Grund der heftigen, tropischen Regenfälle zu „nicht vorgesehenen“ Überschwemmungen der gesamten baulichen Situation.

In Zonen, die dauerhaft vom Wasser überdeckt bzw. überspült sind, hat sich eine zusammenhängender dunkler Biofilm auf der Oberfläche ausgebildet. Oberhalb davon existieren Zonen unterschiedlicher Durchfeuchtung, die durch entsprechende Unterschiede im Bewuchs (Moose, Flechten) voneinander unterscheidbar sind. Der Konturenverlust der Figur in Abbildung 4 links ist vor allem im oberen rechten Teil besonders ausgeprägt. Dieser ist zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht überspült und unterliegt starken Schwankungen im Feuchtegehalt.



Abb. 4: *Fuente de Lavapatas. Schäden durch Verlust der Oberflächen treten bevorzugt in den austrocknenden bzw. wechselfeuchten Bereichen auf. Zonen unterschiedlicher Durchfeuchtung geben sich durch Unterschiede im Bewuchs zu erkennen.*

Abbildung 5 zeigt das hygrische Quellmaß und die dazugehörige freie Wassersättigung des Ignimbrits im Vergleich zu anderen Tuffen aus unterschiedlichen Teilen der Welt (Moai-Figuren/Osterinsel, Cathedral Sé in Funchal/Madeira, verschiedene Bauwerke in Deutschland). Dabei wird die (erwartete) große Streubreite beider Parameter erkennbar. Das Material von den Lavapatas liegt dabei im zentralen Bereich und ist somit als sehr saugfähig und stark quellend zu bezeichnen.

Schroffe Wechsel im Feuchtegehalt des quellfähigen Tuffs sind daher mit Sicherheit gefügebelaastend und begünstigen die starke Verwitterung der originalen Oberflächen. Oberstes Ziel für den Erhalt muss also das Erreichen eines möglichst gleichmäßigen Feuchteniveaus sein. Da dies aus unterschiedlichen Gründen im trockenen Zustand nicht umsetzbar ist (s. o.), kann die Antwort nur in einer permanenten (und kontrollierten) Überspülung des gesamten Objekts zu finden sein.

Abbildung 6 zeigt die Querschliffaufnahme aus einem Gesteinsblock, der permanent vom Wasser überspült war. Der dichte Biofilm auf der Oberfläche wirkt sich mit Sicherheit günstig auf die Stabilität des Gesteinsmaterials aus, da von ihm eine Pufferwirkung im Feuchtetransport zu erwarten ist. Umgekehrt ist aber eine Schädigung durch den Biofilm nicht zu erwarten: Zwar hat die (einmalig erfolgte) Verankerung der Pilzhyphen die Oberflächenstruktur bis in mehrere Millimeter Tiefe hinein durch die Besiedlung verändert, insgesamt stellt der Film jedoch ein sich selbst stabilisierendes, lebendes System dar, welches nur durch eine extreme Austrocknung der Situation zerstört würde.

Eine Notwendigkeit zur „Bekämpfung“ der mikrobiellen Besiedlung besteht daher nicht. Abgesehen von der bekannten zeitlichen Begrenzung der Wirksamkeit solcher Maßnahmen würde ein steter Wechsel von Abtöten und Neubesiedlung die Oberflächen zusätzlich destabilisieren.

Abb. 5:
Ignimbritmaterial, Fuente de Lavapatas. Hygrisches Quellmaß [$\mu\text{m}/\text{m}$] und zugehörige freie Wassersättigung [$\text{m}\% \text{H}_2\text{O}$] nach 48 h Unterwasserlagerung (rotes Rechteck, 10 Einzelmessungen) im Vergleich zu Tuffen von der Osterinsel (gelb), aus Madeira (rot), aus Nordhessen (grün) und dem Rheinland (grau). Hellblau: Basalt- und Andesitlaven vom Borobudur (s. u.) zeigen im Gegensatz zu Tuffen trotz teilweise sehr hoher Wasseraufnahme praktisch kein hygrisches Quellen.

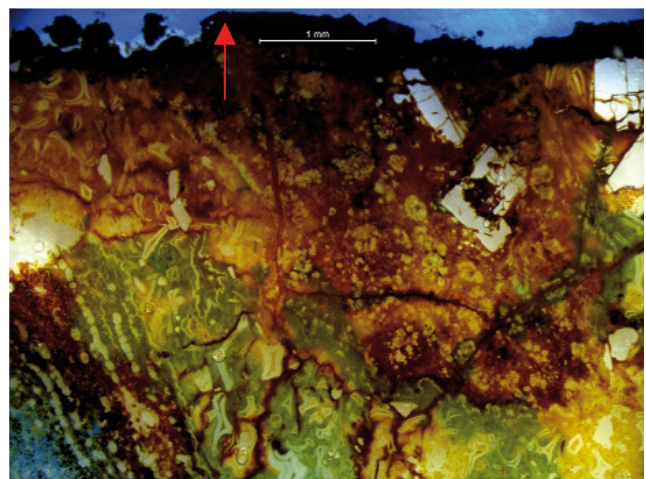
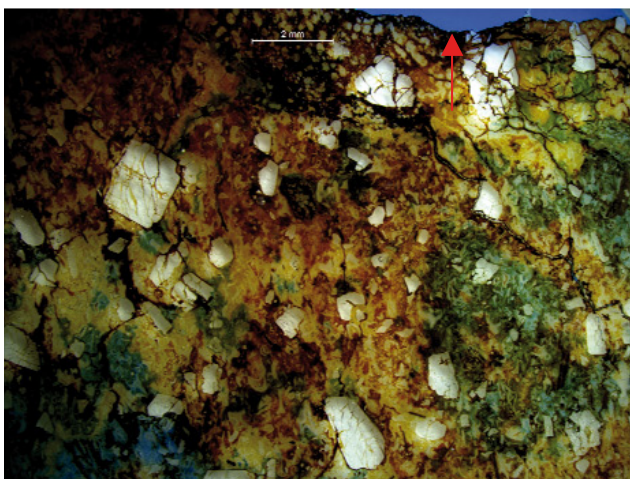
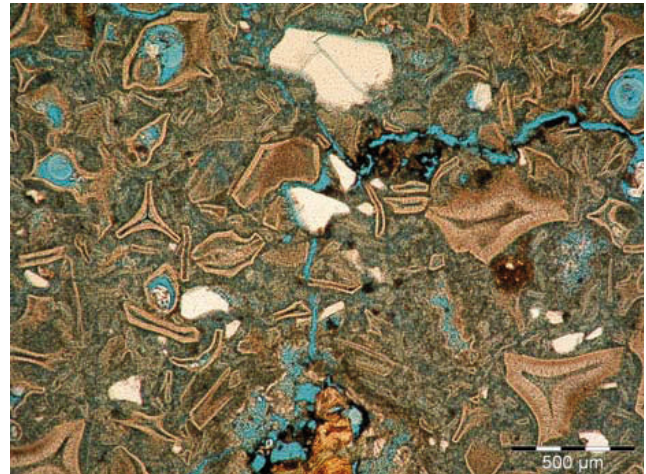
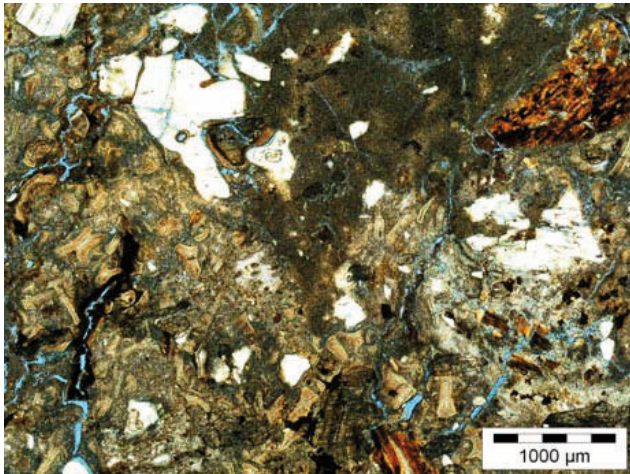
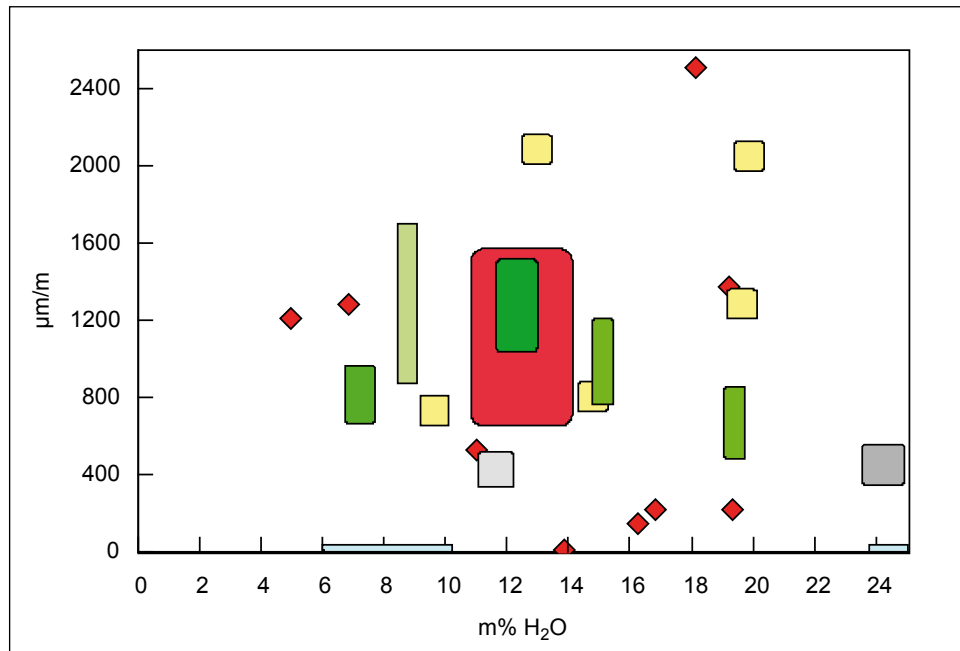


Abb. 6: Oben: Dünnschliffe des inneren Gesteinsgefüges mit einer heterogenen Glasmatrix, in der nach teilweiser Entglasung Fragmente mit unterschiedlicher Formgebung („shards“) dominieren [5]. Unten: Querschliffe eines dauerhaft vom Wasser umspülten Steins am unteren Auslass der Anlage. Ein dichter Biofilm auf der Oberfläche (rote Pfeile) verhindert die Austrocknung und sorgt so für eine konstante bauphysikalische Situation. Blau-/Grüntöne: eingefärbter Porenraum, d. h. wasserzugänglichere Gefügebereiche. Die stark gestörte Gefügestruktur des Ignimbrits erleichtert potentiell das Einwachsen von Pilzhyphen.

3.2 Candi Borobudur

(Provinz Yogyakarta, Java, Indonesien)

Auch die im 9. Jahrhundert aus basaltischen und andesitischen Laven [6] erbaute buddhistische Tempelanlage Candi Borobudur im Süden Javas (Abb. 7) war zunächst für viele Jahrhunderte in Vergessenheit geraten. Sie wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts wieder entdeckt und erfuhr zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine erste große Sicherungsmaßnahme unter Leitung des Holländers van Erp, in der u.a. die oberen Terrassen stabilisiert wurden [7]. Die Holländer wandten die Technik der Anastylose an, die einen Wiederaufbau unter Verwendung von geborgenen Originalsteinen fordert. 1973–1983 fand eine weitere große Erhaltungsmaßnahme statt, in der auch die Abführung des Regenwassers in die Tempelkonstruktion gelegt wurde. Seither werden immer wieder Eingriffe durchgeführt, um Probleme der Statik und der Wasserführung zu verbessern.

Candi Borobudur ist ein Bergtempel. Er wurde auf einem natürlichen Tuffhügel, der zusätzlich aufgeschüttet wurde, errichtet. Der Tempel besteht aus fünf Umgängen, deren Wände von Reliefdarstellungen geschmückt sind. Darüber folgen drei kreisförmige Terrassen mit kleinen Kapellen, in denen Buddha-Statuen sitzen.

Die sehr stabilen Laven unterschiedlicher Zusammensetzung erfahren durch Wassereintrag keine wesentliche Veränderung ihrer petrophysikalischen Eigenschaften und sind daher trotz intensiver, tropischer Witterung gegen Wechselfeuchte stabil. Hier ist es vielmehr der unkontrollierte Wassereintrag, der einen Transport löslicher Komponenten aus den Gesteinen und eingesetzten Baustoffen sowie letztlich die Deposition mineralischer Komponenten als Krus-

ten und partielle Absprengungen in den Oberflächen zur Folge hat.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft typische Schäden auf den Oberflächen der wertvollen Reliefs, die auf den schädigenden Einfluss von Wasser zurückzuführen sind. An der Oberfläche ablaufendes Regenwasser führt zu einem deutlichen Verlust der Konturen (rechts oben). Gelöste Bestandteile setzen sich als Sinter auf der Oberfläche ab (links oben). Deutlich ist auch die Zerstörung von Oberflächen durch die Ausbildung von Pusteln (rechts unten).

Bei der Suche nach den Ursachen fällt auf, dass insbesondere in den Regenzeiten Wasser zwischen den Fugen der Reliefblöcke austritt. Während der letzten großen Maßnahme in den 70er Jahren war unterhalb der Laufflächen in den Umgängen ein Drainagesystem installiert worden, welches eindringendes Regenwasser von den jeweils vertikal nach unten/außen angrenzenden Reliefdarstellungen fernhalten sollte. Für diese Maßnahmen wurden große Mengen von Portlandzement in die Tempelkonstruktion eingebracht. Der noch immer weit verbreitete Wasseraustritt aus den relieftragenden Wänden zeigt, dass das gewünschte Ziel der Verhinderung vagabundierender Wässer nicht erreicht wurde. Feuchtigkeit durchsetzt noch immer intervallweise in massivem Ausmaß die Darstellungen auf den Wandflächen. Zusätzlich stellen die großen Betonbauteile eine gefährliche Quelle löslicher Komponenten dar.

Die verschiedenen Lösungsprozesse, im Zusammenwirken mit angewendeten Farbbeschichtungen, resultieren in einem komplexen System unterschiedlichster Krusten auf den Reliefoberflächen. Von einer Verstärkung der Schadensprozesse, insbesondere

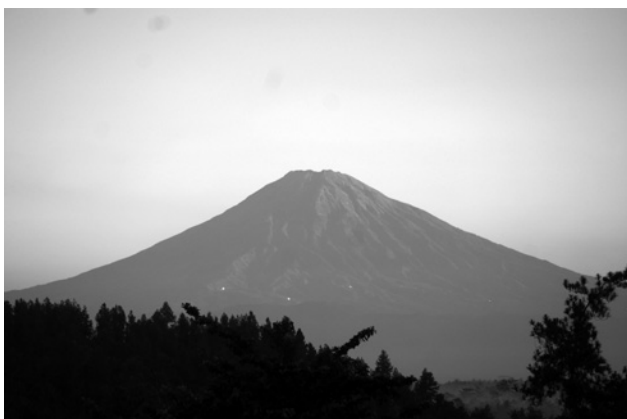


Abb. 7: Candi Borobudur. Erbaut aus basaltischen und andesitischen Laven, die von den umliegenden Vulkanen, darunter dem 25 km entfernten, hochaktiven Merapi (links) gefördert wurden.



Abb. 8: Candi Borobudur. Typische Schadensbilder im Bereich der Wandreliefs

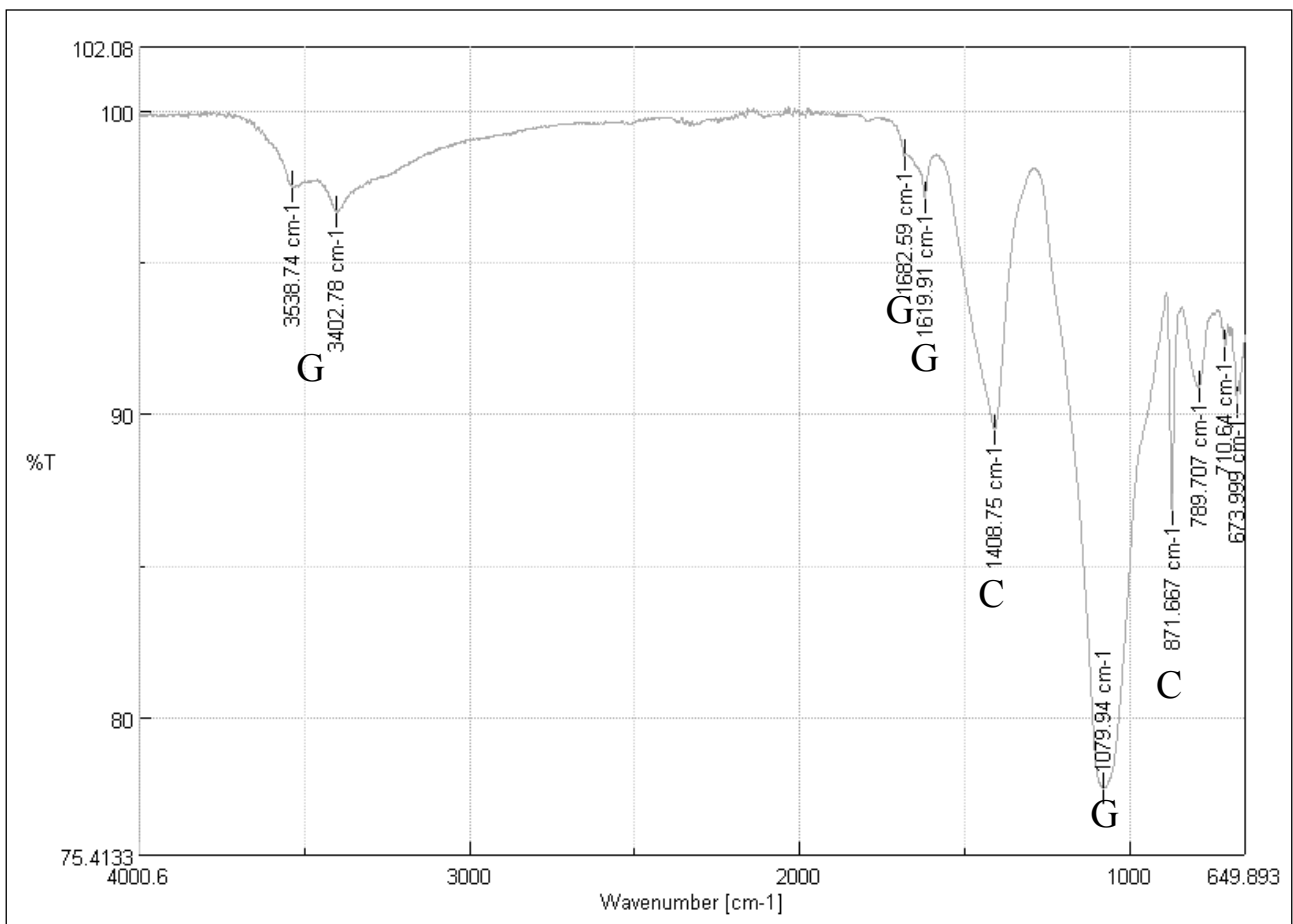


Abb. 9: Candi Borobudur. FTIR-Spektrum einer hellen Kruste. C = Calcit, G = Gips.

der o.g. Pustelbildung durch Salze und mikrobiologische Einflüsse wird ausgegangen [8, 9]. Eine infrarotspektrometrische Analyse von hellen Krusten (Abb. 9) zeigt, dass die hier untersuchten Proben (neben etwas Gips) im Wesentlichen aus Calcit bestehen.

Am Bergtempel Borobudur ist Wasser auf verschiedene Weisen an der Zerstörung der Steinreliefs beteiligt. Zum einen führt der hohe Wassereintrag in die Tempelkonstruktion zu einer Destabilisierung des Tempelbergs und dadurch bedingt zu großen statischen Problemen des gesamten Tempels. Der verwitterungs-resistente Baustein wird vor allem durch in den Tempelberg eindringendes und unkontrolliert wieder an Schwachstellen in den mit Reliefs geschmückten Wänden austretendes Wasser beeinträchtigt. Durch Lösungsprozesse in der Unterkonstruktion und den Bausteinen selbst bilden sich Krusten an den Reliefoberflächen, die zu Spannungen in den Gesteinsoberflächen und so zu Absprengungen führen können.

Die Schäden (und optischen Beeinträchtigungen) an den Reliefoberflächen sind hier durch Wasser als Transportmedium für Elektrolyte ausgelöst worden. Eine alleinige Durchfeuchtung der hygrisch äußerst stabilen Laven hat dagegen keine negativen Auswirkungen. Konservatorische Maßnahmen sind auch in diesem Fall nur dann sinnvoll und nachhaltig, wenn im Vorfeld die Wasserführung instandgesetzt wurde und sicher kontrolliert werden kann. Eine Erneuerung/Reparatur und Überwachung des Drainagesystems ist also unerlässlich.

4 Zusammenfassung

Die Rolle von Wasser bei der Entstehung vulkanischer Baustoffe trägt entscheidend zu deren Eigenschaften und somit zu ihrer Verwitterungsstabilität bei. Tuffe, insbesondere Ignimbrite, reagieren auf Wechselfeuchte ausgesprochen empfindlich, quellfähige Anteile im Gefüge bewirken Dehnungs- und Schrumpfprozesse, denen das eher weiche Gestein nicht standhalten kann. Eine weitgehende Konstanz der Feuchtebedingungen ist somit unerlässlich und Vorbedingung für die Sinnfälligkeit nachfolgender konservatorischer Schritte. Auch festere, hygrisch stabile Baumaterialien wie andesitische Laven unterliegen Veränderungen ihrer Oberflächen, die auch zu Verlusten an wertvoller Information führen können. Hier sind es eher die Transporteigenschaften des Wassers, welche Elektrolyte aus Baumaterialien in benachbarten Bereichen ungewollt in Reliefober-

flächen leiten und dort abscheiden. Eine Kontrolle der Wasserführung ist auch hier zwingende Vorbedingung, ohne die restauratorische Schritte zum Scheitern verurteilt wären.

Danksagung

Die Autoren danken Dr. Ralf Gertisser, Senior Lecturer an der Keele University, GB, für die freundliche Durchsicht der Abschnitte zur Gesteinspetrologie.

Literatur

- [1] Schmincke, H. U.: Vulkanismus. WBG Darmstadt, (2010). ISBN 978-3-534-23628-2.
- [2] Steindlberger, E., Sattler, L., Steyer, M., Wendler, E.: Das romanische Heidenportal des Wetzlarer Doms – neuartige Ansätze für das „Problemgestein“ Schalstein. In: Siegesmund, S., Auras, M. & Snethlage, R. (Hrsg.): Stein – Zerfall und Konservierung, S. 265–270, Leipzig (2005).
- [3] Steindlberger, E.: Vorkommen, Eigenschaften und Verwitterungsprozesse nordhessischer Tuffsteine. In: Ev. Kirche Kurhessen-Waldeck (Hrsg.): Konservierungskonzepte zum Erhalt von nordhessischem Tuffstein an historischen Bauwerken, Tagungsband, S. 5–18, Kassel (2005).
- [4] Pérez de Barradas, J: Arqueología agustiniana. Bogotá, (1943).
- [5] Álvarez, M. P. & Jacobsen, H.: Determinación del estado de conservación de la Fuente de Lavapa a partir de la evaluación de las características físicas y geológicas de la Fuente. Bogotá: ICANH, (2009).
- [6] Grissom, C.A.: The Deterioration and Treatment of Volcanic Stone: a Review of the Literature. In: Charola, A. E., Koester R. J., Lombardi, G. (Hrsg.): Lavas and Volcanic Tuffs, Proc. Int. Meeting Easter Island, Chile, 25.–31. Oct. 1990, S. 1–29, Rome (1994).
- [7] Soekmono, R.: Candi Borobudur – A Monument of Mankind. The UNESCO Press, Paris (1976).
- [8] Hyvert, G.: The conservation of the Borobudur Temple. Bericht UNESCO RMO.RD/2646/CLP., Paris (1972).
- [9] Meucci, C.: Candi Borobudur, Research Program. Degradation and Conservation of the Stones. Report, Rome (2007).

Suevit ein Gestein aus dem Nördlinger Ries – Restaurierung eines historischen Grabdenkmals am Friedhof St. Emmeram zu Nördlingen

von Oliver Hornung



Der Beitrag führt uns vom denkmalgeschützten Friedhof St. Emmeram in Nördlingen über die Entstehung eines einzigartigen Gesteins an der Schnittstelle zwischen schwäbischer und fränkischer Alb, zu einer Instandsetzungsmaßnahme an einem Denkmal aus Suevit. Aus handwerklicher Sicht werden Erfahrungen im Bereich der restauratorischen Steinmetz- und Bildhauerarbeiten an einem Kleindenkmal erläutert.



Abb. 1: Friedhof St. Emmeram mit Friedhofskirche

1 Der denkmalgeschützte Friedhof St. Emmeram

Der Friedhof St. Emmeram (Abb. 1) liegt auf einer Anhöhe vor Nördlingen, im Volksmund auch der Totenberg genannt. Umgeplant und erweitert wurde dieser Friedhof 1822 als großzügige Parkanlage im Englischen Stil von dem kunstbegeisterten Bürgermeister Friedrich Wilhelm Doppelmayr 1776–1845. „Zum Lustwandeln im Angesicht der Ewigkeit“ umgurtet der ganze parkähnliche Bereich mit zahlreichen Kastanien- und Lindenalleen Nördlingen bis zu einer Anhöhe, der so genannten Marienhöhe, einer Anhöhe aus kristallinem Grundgebirge.

Auf dem denkmalgeschützten Friedhof stehen noch sehr viele historische Gedenksteine von den Bürgern der ehemals freien Reichsstadt Nördlingen (Abb. 2). Die Denkmäler zeugen von einem ausgeprägten Totenkult verbunden mit hohem Stilempfinden gediegener Handwerkskunst und Heimatliebe (Abb. 3). Im Stil der Zeit vom Ende des 19. Jahrhunderts sind die Grabdenkmäler neoklassizistisch, neugotisch neuromanisch und bilden ein romantisches Ensemble der Stilepochen (Abb. 4).

Ebenso spiegeln die verwendeten Gesteine die gesamte Geologie Europas wider. Verwendet wurden Erguss- und Tiefengesteine wie Granit, Syenit, Basalt und Diabas, Sedimentgesteine wie Kalksteine,



Abb. 2: Denkmal von Hoven, Sandstein auf Tuffsteinsockel

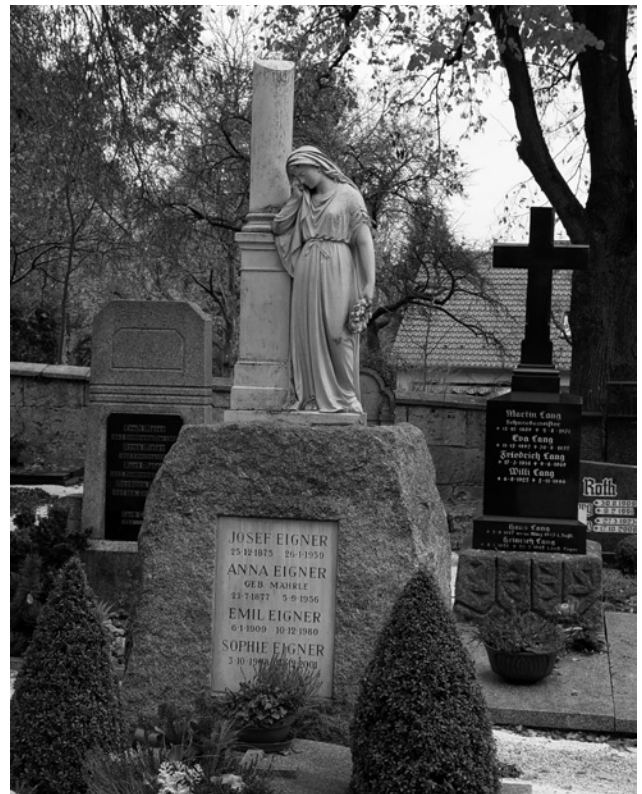


Abb. 3: Denkmal Eigner, Marmorskulptur auf Granitsockel



Abb. 4: Grabfeld



Abb. 5: Denkmal Frickinger, Suevit

Kalktuffe oder die zahlreichen Varietäten der Sandsteine. Oder auch die anzutreffenden Metamorphite wie Gneis, Marmor oder Schiefer lassen uns tief in die geologische Erdgeschichte blicken. Wären da nicht ein paar wenige Grabsteine oder Grabmonumente die aus einem eigenartigen Gestein bestehen und den geologisch interessierten Besucher irritieren (Abb. 5).

2 Suevit ein Gestein aus dem Nördlinger Ries

Das Gestein weist eine graugrüne feinkörnige Matrix auf. Beim näheren Betrachten fallen helle bis gelbliche und anthrazitfarbene Einschlüsse auf (Abb. 6). Betrachtet man Baudenkmale in und um das Nördlinger Ries fällt immer öfters das Gestein auf (Abb. 7). Gebrochen wurde der Werkstein in den Steinbrüchen hauptsächlich an den Rändern des Nördlinger Rieskessels (Abb. 8). Spontan denkt man beim Anblick des Steins an einen vulkanischen Tuff wie den Ettringer oder den Weiberner Tuff aus der Eifel (Abb. 9). Der Ettringer Tuff ähnelt dem Riesgestein sehr. So wundert es nicht, dass die Fachwelt beim Anblick des Nördlinger Rieses die Meinung vertreten hat, das Gestein sei vulkanischen Ursprungs und der Rieskessel ein riesiger Vulkanschlot (Abb. 10, Quelle Rieskrater Museum Nördlingen). Aber auch die Möglichkeit eines Meteoritenkrater wurde in den 1960er Jahren schon sehr emotional diskutiert.

Die Entdeckung der Hochdruckminerale Coesit und Stishovit durch die amerikanischen Wissenschaftler Shoemaker und Chao bewiesen das Nördlinger Ries als Asteroidenkrater. Seit den 1960er Jahren bis heute untersucht kann das Nördlinger Ries als der best erforschte und best erhaltene Asteroidenkrater der Welt bezeichnet werden. Sogar das Fieldtraining der Astronauten für den bemannten Raumflug auf den Mond wurde hier absolviert.



Abb. 6: Denkmal Woerner, Suevit



Abb. 7: St. Georgskirche Nördlingen Turm Daniel



Abb. 8: Suevitsteinbruch Alte Bürg



Abb. 9: Ettringer Tuff auf Suevit

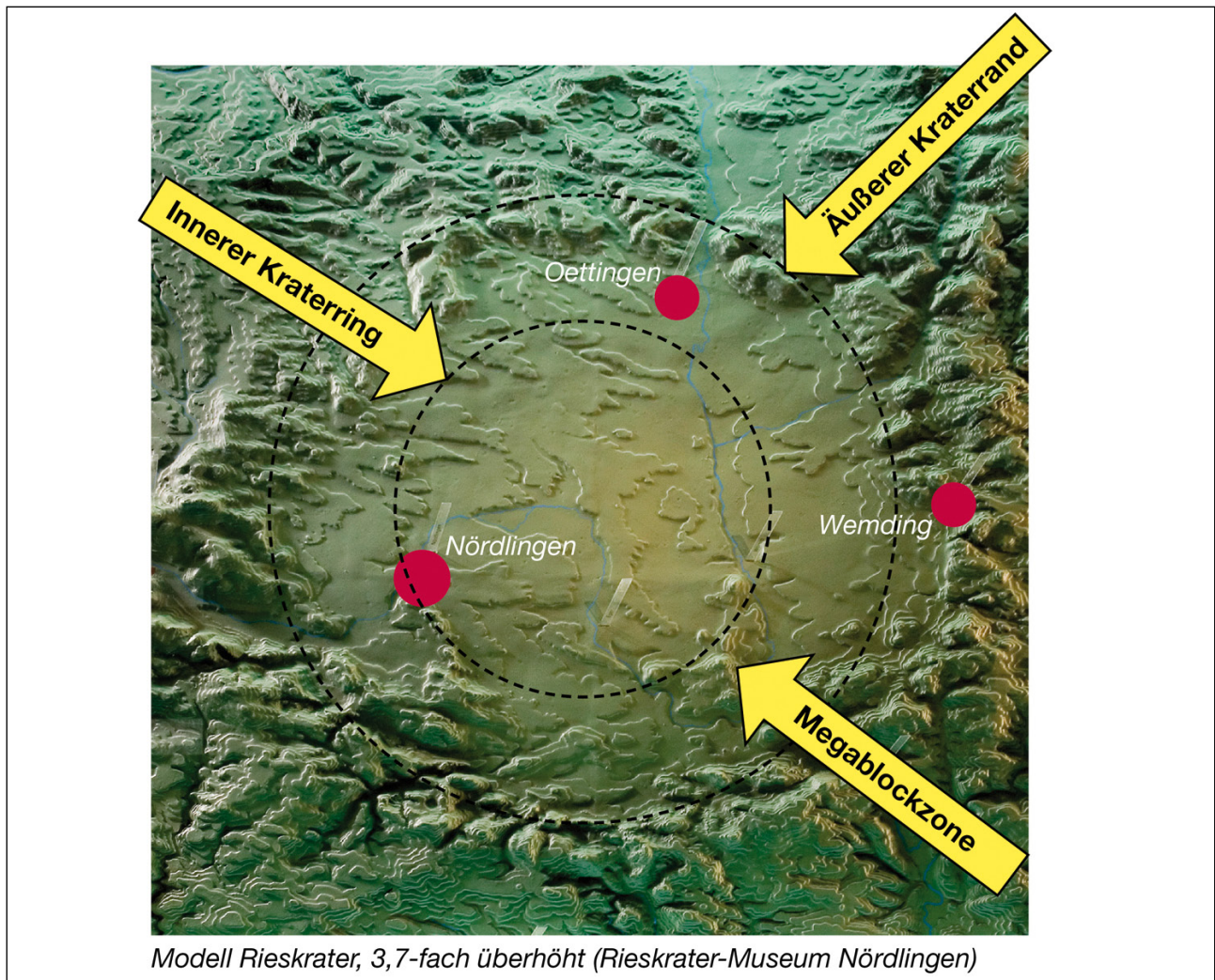


Abb. 10: Nördlinger Ries Relief

Vor etwa 14,4 Millionen Jahren schlägt ein Asteroid mit einem Durchmesser von ca. 1 km und einer Geschwindigkeit von ca. 20 km/s an der Schnittstelle zwischen schwäbischer und fränkischer Alb ein. Von da ab waren es nur noch wenige Minuten bis zur Entstehung eines neuen Gesteins. Den Namen erhält der Stein von den Schwaben oder Sueben. Suevit, der

Schwabenstein, wird seitdem für diesen Gesteinstyp, eine Impaktbreccie mit hohem Kristallin und Glasanteil, erstmals im Nördlinger Ries international gebräuchlich. Das gilt auch für die Glasfragmente in den Suevit, den so genannten Flädle. Die Aussprache stellt in nichtschwäbischen Regionen durchaus ihre Anforderungen.

2.1 Entstehung des Suevit (Abb. 11, Schaubilder, Geopark Ries Donauwörth)

1. Der Asteroid schlägt mit einer Geschwindigkeit von ca. 72.000 km/h in die Atmosphäre ein. Die zwischen dem Asteroid und der Erdoberfläche befindliche Luft wird so stark komprimiert und erhitzt, dass schlagartig Oberflächenablagerungen verdampfen und seitlich weggeschleudert werden. Dieses Material findet sich im heutigen, 450 km entfernten Böhmen als Moldavite wieder.
2. Der Aufschlag erfolgt nur eine Millisekunde später. Immer noch mit Überschallgeschwindigkeit dringt der Einschlagskörper bis ca. 1000 m in die Erdkruste ein. Sämtliche Gesteine verdampfen dann in einer Ausbruchswolke.
3. In den nächsten Sekunden kommt es zum Auswurf, Zertrümmerung und Aufschmelzen neuer Gesteine, so genannter Impaktgesteine. Diese Trümmersmassen bedecken in bis zu 50 km Entfernung die Landschaft um 100 m Höhe. Auch der Asteroid verdampft vollständig.
4. Zum anderen entsteht jetzt der Suevit, der als verdampftes Material und glühende Eruptionssäule 30 km in die Atmosphäre aufsteigt. Der Krater ist jetzt ca. 4 km tief und weist einen Durchmesser von ca. 13 km auf. Dieser Primärkrater ist jedoch nicht stabil und bricht von den Kraterrändern ein.

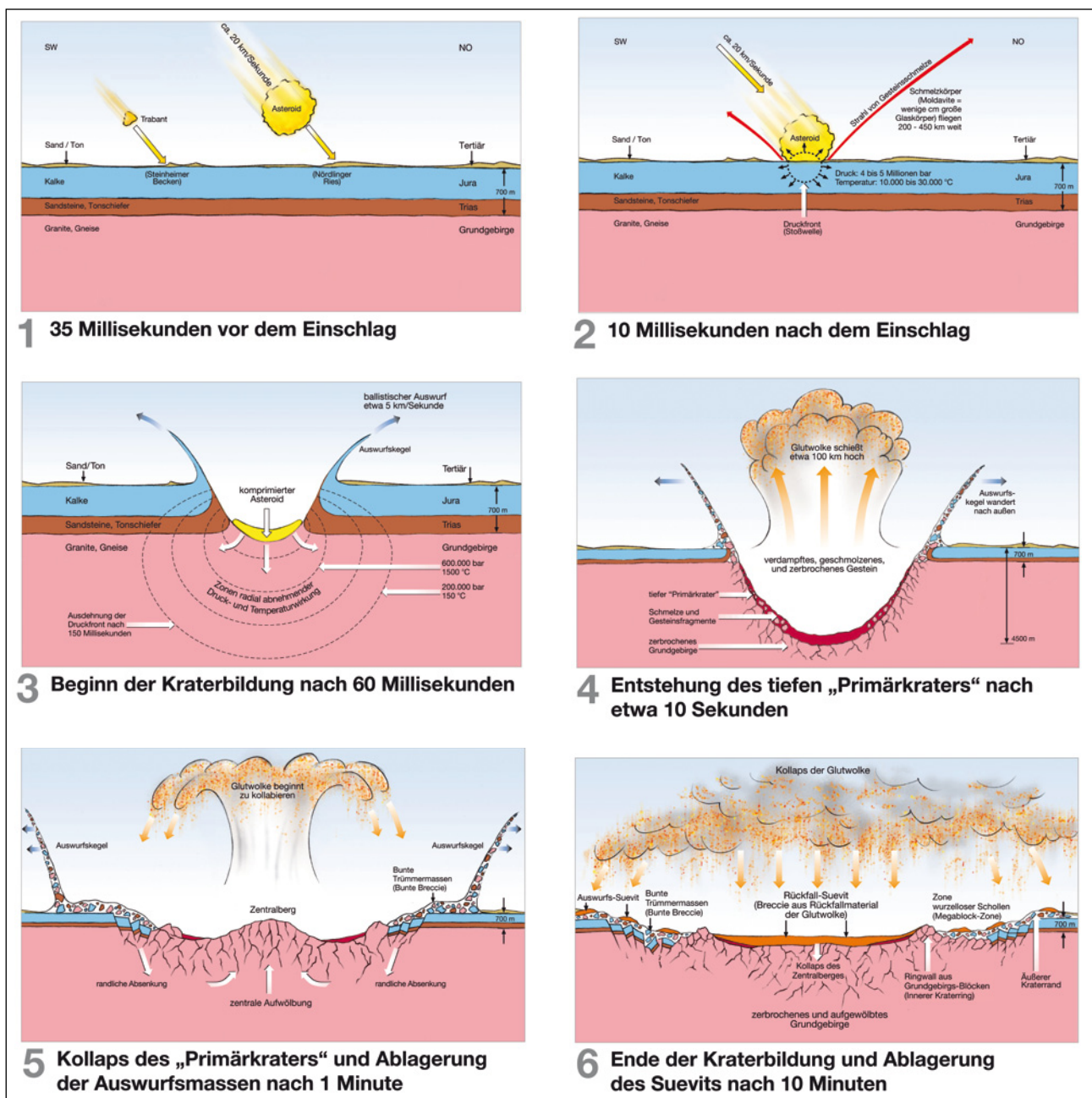


Abb. 11: Entstehung des Suevit

5. Von den Kraterrändern brechen große Gesteinschollen, sodass sich der Kraterdurchmesser auf 24 km erweitert. Durch Rückfederung des Grundgebirges kommt es zur Bildung eines inneren Zentralberges.
6. Wenige Minuten nach dem Einschlag kollabiert die Eruptionssäule und bedeckt die zuvor abgelagerten Trümmernmassen mit einer unregelmäßigen Decke Auswurfsuevits. Auch der Krater wird mit Suevit um mehrere 100 m verfüllt. Letzte Bewegungen im Untergrund schließen die Kraterbildung ab.

(Entstehung des Suevit, Schaubild 1 bis 6. Quelle der Textauszüge: Gisela Pösges: Vom Impaktkrater zum Nationalen Geopark. In: Wilfried Sponsel (Hrsg.): Landkreis Donau Ries, 2008)

Suevit wird als Werkstein bis weit über die Grenzen von Schwaben transportiert. So ist er an der Bundesbahnhauptdirektion in München an der Arnulfstraße oder am ehem. Postgebäude Grottenau in Augsburg zu finden. Sogar bis Berlin wird das Gestein ans ehem. Haupttelegrafenamts transportiert und verbaut. Heute wird in den Steinbrüchen kein Werkstein mehr gebrochen. Der Suevit wird von der Zementindustrie abgebaut und zu Hydraulefaktoren und Bindemittel verarbeitet. Der daraus hergestellte Trasszement wird weltweit in der Bauwirtschaft und Restaurierung als hochwertiger Baustoff verwendet. Durch die starke Erosion des Gesteins wird die Konservierung des Suevit und die Instandsetzung zu einer zentralen Aufgabe für die Erhaltung denkmalgeschützter Bauwerke.

3 Instandsetzung eines Kleindenkmals aus Suevit

Bei einer Ortsbegehung des Nördlinger Friedhofs durch Stadtarchivar und Stadtheimatspfleger Dr. Wilfried Sponsel wurden auf einer verfaulten Palette Werksteine aus Suevit entdeckt (Abb. 12). Durch Nachfragen bei der Friedhofsverwaltung stellte sich heraus, dass das Denkmal nach Ablauf der Ruhezeit und durch Desinteresse der Angehörigen abgebaut worden war. Dank dem technischen Friedhofspersonal wurden die Steine nicht wie üblich in den Container entsorgt, sondern in einer Ecke des Betriebshofs gelagert (Abb. 13). Nach einer Sichtung der Steinsubstanz wurde klar, dass es sich um einen denkmalgeschützten, erhaltenswerten Grabstein einer Nördlinger Familie handelt. Nach einem Ortstermin mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege und einem Restaurierungsvorschlag mit Kostenschätzung wurde der Auftrag zur Instand-

setzung des Denkmals von der Stadt Nördlingen an unsere Werkstatt vergeben.

Die Werksteine werden zur Restaurierung in die Fachwerkstatt gebracht. Um sich über das Aussehen des Denkmals klar zu werden, mussten die Werksteine erst einmal nach Steinschichten sortiert werden (Abb. 14). Es gab ja keine Pläne oder Unterlagen über den Abbau des Denkmals. Es wusste niemand so richtig, wie das Grabmal eigentlich aussieht. Außerdem brauchten wir für eine Instandsetzung Planzeichnungen zur Kartierung von Schäden und dem daraus folgenden Einsatz der erforderlichen Technologien und Materialien (Abb. 15).

Für die Instandsetzung des Denkmals erarbeiteten wir zuerst ein individuelles Sicherungskonzept, das dann anschließend systematisch abgearbeitet wurde.

Sicherungskonzept:

1. Werksteine sichten und sortieren
2. Planzeichnungen, Projektionen und Skizzen anfertigen
3. Fotodokumentation während der gesamten Maßnahmen, Vorzustand, Zwischenzustand, Endzustand
4. Schadenskartierung Vorzustand
5. Eventuell Vorfestigen
6. Konservierung und sichern von Fassungen
7. Reinigen Werksteine
8. Freilegen und Metallteile ausbauen
9. Schadenskartierung, Nachkartierung
10. Trocknungsphase Werkstein
11. Festigen und Nachfestigen
12. Konsolidieren Bruchstellen
13. Instandsetzen Risse
14. Instandsetzen Fehlstellen, Vierungen, Ergänzungen
15. Retusche und Vergoldung
16. Fundament erstellen
17. Denkmal versetzen
18. Dokumentation in Wort und Bild, Maßnahmenkartierung
19. Prävention Bewuchs



Abb. 12: unsachgemäß gelagerte Werksteine



Abb. 13: unsachgemäß gelagerte Werksteine



Abb. 14: Werksteine zur Sichtung aufgereiht

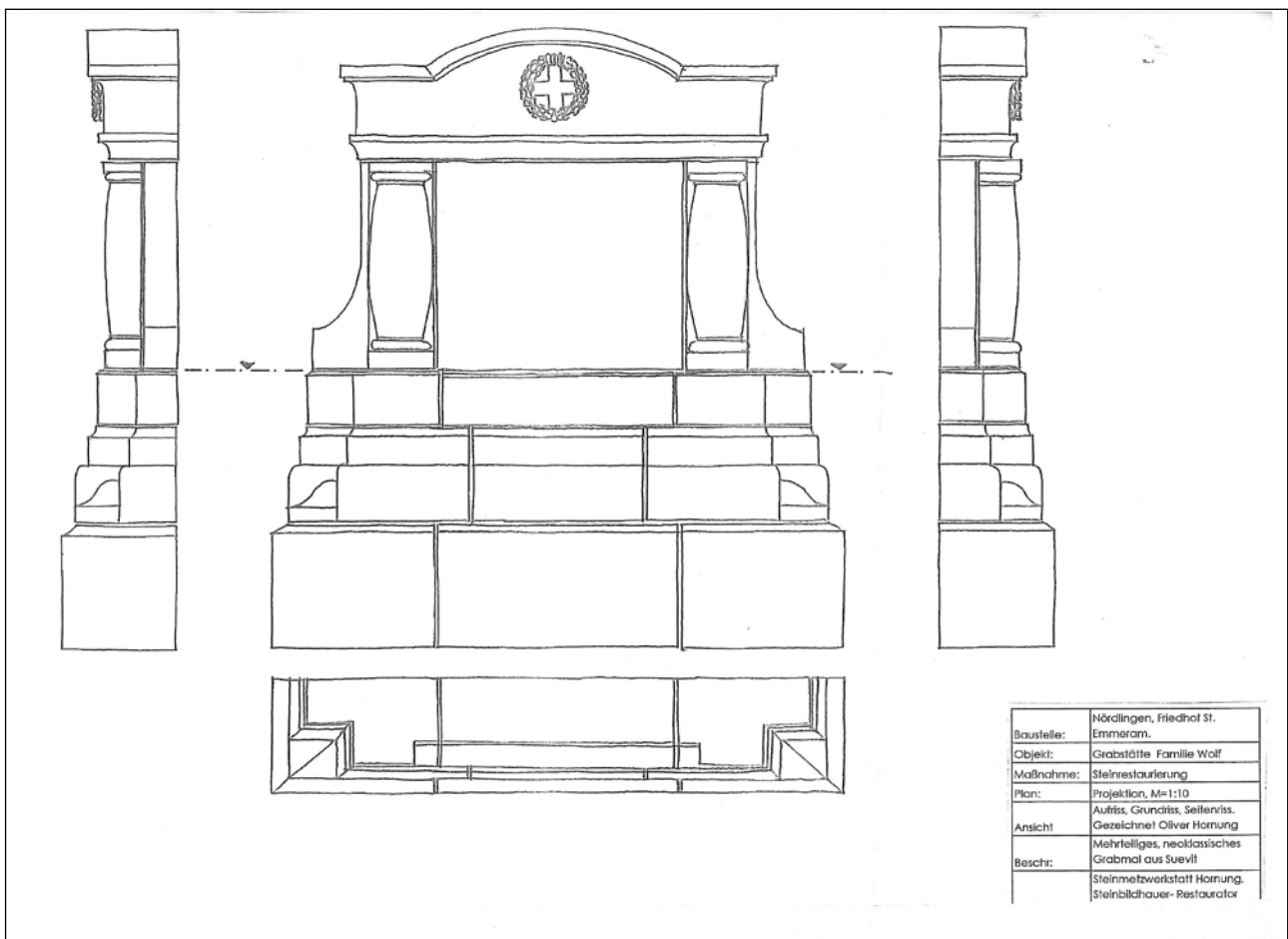


Abb. 15: Planzeichnung des Denkmals

3.1 Reinigen/Freilegen

Vorab werden alle Oberflächen mit einem fungizid und algizid wirkenden Produkt (Remmers BFA) eingelasen. Nach einer Einwirkdauer erfolgte die Reinigung ausschließlich mit Heißdampf und geringem Druck. Hier konnte ein modifizierter Heißdampfreiniger (zusätzlich eingebautes Druckventil für noch geringeren Heißdampfdruck) erfolgreich eingesetzt werden. Anhaftender Setz und Fugenmörtel ließen sich im auf-

geweichten Zustand manuell rückstandslos und ohne Beschädigung des Untergrunds entfernen.

Altbefestigungen wie glatte Edelstahldollen wurden mit einem Kernbohrgerät überbohrt und ausgebaut (Abb. 16 und 17). Die gereinigten Werksteine werden schichtenweise palletiert und mindestens 6 Wochen zum Trocknen eingelagert.



Abb. 16, 17: Werksteine vor und nach der Reinigung

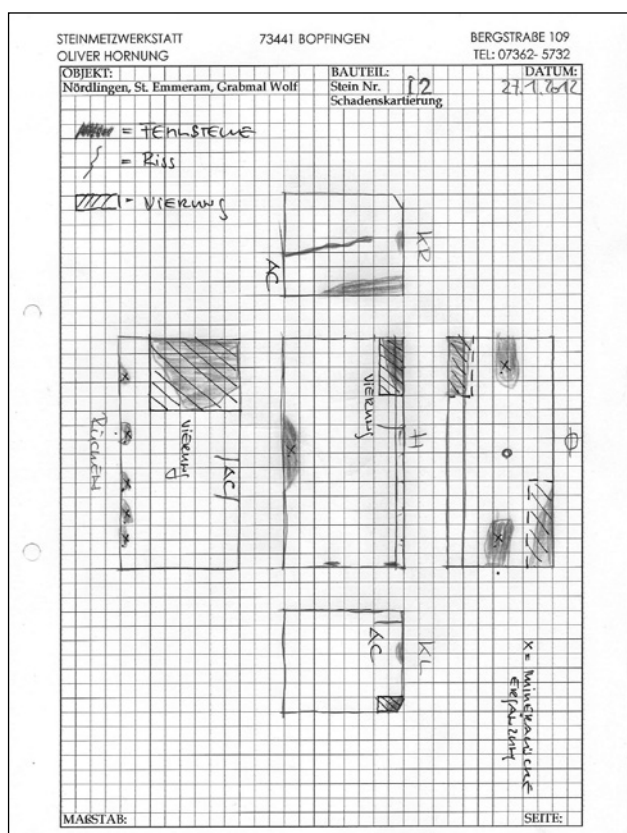


Abb. 18: Tafelprojektion des Werksteins mit Kartierung

3.2 Schadenskartierung

(Abb. 18, Projektionszeichnung mit Kartierung)

Vorab erstellten wir eine Ansichtszeichnung, die uns weitere Informationen für das anstehende Maßnahmenkonzept geben sollte. (Steinschnitt und Lage der Werksteine). Außerdem wurde für jeden einzelnen Werkstein eine Projektionszeichnung gefertigt. Darauf sind die zu bearbeitende Oberflächen des Werkstücks dargestellt. Diese Kartierung begleitete jedes einzelne Werkstück bei seiner Instandsetzung. Es wurden sämtliche, mit dem unbewaffnetem Auge sichtbaren und durch abklopfen des Werksteins hörbaren Schäden beschrieben und kartiert (Abb. 19 und 20). Anschließend wurde anhand des gesamten Schadensbildes das Maßnahmenkonzept entwickelt.

3.3 Konservierung

Vorfestigen/Substanzsicherung:

Stark absandende und instabile Mürbzonen wurden vor der Reinigung partiell mit KSE 100 vorgefestigt. Auch wurden hier vor der Reinigung einzelne Kittungen zur Konsolidierung von losen und noch leicht anhaftenden Bruchstellen vorgenommen.

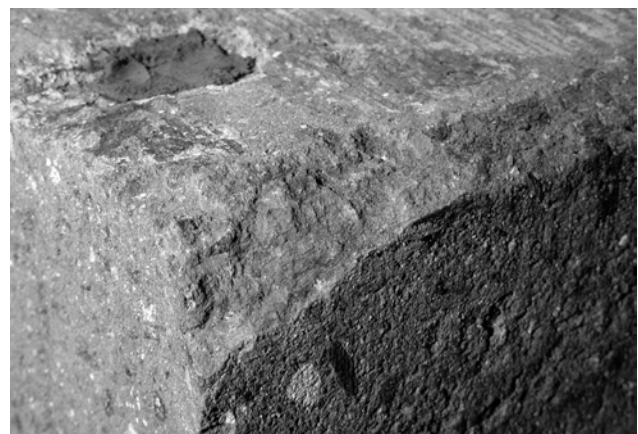


Abb. 19, 20: Schäden an den Werksteinen



Abb. 21: partielles Festigen

Festigung nach der Reinigung mit Trocknungsphase im beheizten trockenen Raum

Im Bereich von tiefen Rissflanken und in stark entfestigten und offenporigen Bereichen haben wir KSE 300 OH verwendet. Für leicht entfestigte Bereiche wie sandende Oberflächen mit krakeleeartigem Rissbild bei geschlossenem Gefüge wurde mit KSE 100 OH gefestigt. Beide Steinfestiger können in Kombination verwendet werden. Abbildung 21 zeigt, wie der Stein bereichsweise über Kanüle in mehreren Applikationen mit KSE geflutet wird. Bei starker Aufnahme von Steinfestigern wurde die Oberfläche partiell mit Lösemittel nachgereinigt. Nach einer Reaktionszeit von min. 5 Wochen sind die Ergebnisse der Steinfestigung aus handwerklicher Sicht zufriedenstellend. Die Steinoberfläche wirkt bei einer Ritzprobe wesentlich fester. Eine höhere Festigkeit der Steinsubstanz ist bei allen weiteren Bearbeitungen spürbar. Kanten können beim Aushauen der Vierungen besser gehalten werden. Die Haftzugfestigkeit mit Ergänzungsmassen an den gefestigten Oberflächen ist wesentlich höher als bei nicht gefestigten Bereichen.

Entscheidend für die Verwendung von KSE bei Suevit ist die Trocknung des Gesteins. Die Austrocknung ist bei einzelnen Werksteinen oder Kleindenkmalen wesentlich einfacher. Hier kann unter Laborbedingungen getrocknet werden. Bei Großbauwerken ist das nur bedingt möglich. Auch die unterschiedlichen Varietäten des Suevit sollten bei der Auswahl der Steinfestiger berücksichtigt werden. Bei dichtem Rückfallsuevit mit hohen Feinanteilen und krakeleeartigem Rissbild ist die Aufnahme von KSE wesentlich geringer als bei Auswurfsuevit mit breiten Rissen, starken Mürbzonen und großen Flädle. Zwischen den beiden Varietäten kann der Unterschied bei der Aufnahme von KSE zwischen 0,5l und 5,0l pro qm liegen.



Abb. 22: Verfüllen von breiten Rissen

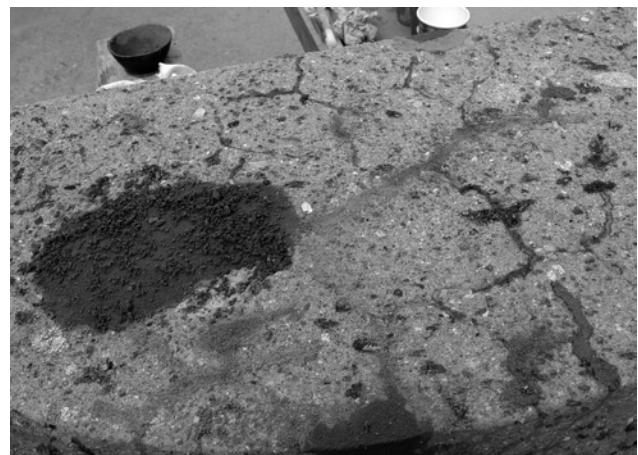


Abb. 23: Verfüllen von schmalen Rissen

3.4 Instandsetzung

Risse breiter 1 mm instand setzen (Abb. 22):

Zur Kittung der breiten Risse kamen konfektionierte dünnflüssige Epoxydharze zum Einsatz. Vorab wurden die Risse mit einem Verschlussmörtel verdämmt, sodass überschüssiges Harz nicht ausläuft und die Rissflanken verunreinigt. Dann wurden die Risse mit Druckluft ausgeblasen.

Nach einer Abbindezeit des Verschlussmörtels wurden die Risse über Spritze und Kanüle in mehreren Applikationen verfüllt.

Risse schmaler 1 mm instand setzen (Abb. 23):

Hier erwiesen sich wasserlöslich eingestellte Kunstharze (Reinacrylat) als sehr wirkungsvoll. Feinste Risse saugen sich fast selbstständig voll. Überschüssige Material kann einfach mit dem Schwamm abgenommen und gereinigt werden.

Die Risse wurden auch hier vorher verdämmt. Anschließend wurden die Risse mit Mischungsverhältnissen von MV 1:5 bis 1:1 in mehreren Intervallen verfüllt.



Abb. 24–26: Schäden an den Werksteinen



Abb. 27: Anpassen einer Vierung

Fehlstellen instand setzen:

Größere Fehlstellen mit Vierungen instand setzen:

Stärker beanspruchte und belastete Bereiche wie mehrseitig bewitterte Profiglieder und Ausladungen im Traufbereich, d.h. ständig durchnässte Bereiche, wurden durch Natursteinpasstücke ausgebessert. Hier wurde der geschädigte Bereich rechtwinklig oder schwalbenschwanzförmig ausgehauen, ein Passtück aus Naturstein punktuell mit Epoxydharz eingesetzt und steinmetzmäßig mit den entsprechenden Werkzeugen nach Form und Struktur bearbeitet (Abb. 24, 25 und 26).

Das Erstellen von Vierungen ist eine traditionelle, handwerkliche Instandsetzungsweise, bei der das Wissen und Können der handwerklichen Bearbeitung am Werkstein weitergegeben wird. Vierungen sind sehr haltbar und farb- und formstabil. Da Steinmaterial verwendet wird, ist die Druckfestigkeit gegenüber einer Mörtelergänzung in der Regel wesentlich höher (Abb. 27).

Die Voraussetzung ist jedoch, dass der erforderliche Ersatzstein in der passenden Varietät und das handwerkliche Know how vorhanden sind.

Nachteilig wirkt sich der hohe Substanzverlust beim Aushauen einer Vierung aus.

Kleinere Fehlstellen instand setzen mit Steinersatzmörtel:

Zur Herstellung der entsprechenden Restauriermörtel passend in Farbe und Struktur müssen die erforderlichen Zuschläge vorhanden sein. Hier können Zuschläge wie farbige Sande und Steinmehle selbst aus dem Ursprungsgestein hergestellt werden (Abb. 28).

Für die Herstellung größerer Mengen an Restauriermörteln haben wir als Matrix einen konfektionierten Restauriermörtel verwendet, den wir mit unserem Steinmehl optisch aufgebessert haben. Aus einem konfektionierten Restauriermörtel erreichten wir durch



Abb. 28: Herstellen der Suevitzuschläge

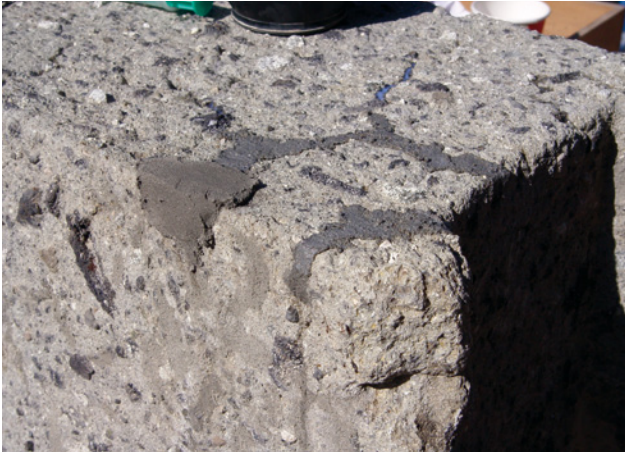


Abb. 29–31: Ergänzungen mit Steinersatz



Abb. 32: vergoldete Schrift



Abb. 32–35: Denkmal versetzt

das Abmagern mit den entsprechenden Steinmehlen eine auf den Naturstein angepassten Ergänzungsmörtel. Für die kleineren Ergänzungen und den oberflächigen Verschluss der Risse wurde eine Rezeptur aus Suevitsanden und Donausand verwendet. Als Bindemittel diente uns ein hochwertiges Reinacrylat. Die Schadstellen wurden zuerst mit einer Haftbrücke grundiert. Anschließend wurde die Ergänzung Nass in Nass mit dem Restauriermörtel aufgebaut (Abb. 29, 30 und 31).

Für größere Ergänzungen kann eine Stützschalung verwendet werden. Die Stützschalung verhindert, dass sich der Ergänzungsmörtel löst. Nach einer Abbindezeit kann die Ergänzung an die bauzeitliche Oberfläche handwerklich angepasst werden. Durch das Verwenden von farbigen Steinmehlen kann in den meisten Fällen auf eine Retusche verzichtet werden. Vorteilhaft bei der Instandsetzung mit Ergänzungsmörteln ist der geringe Substanzverlust am Originalstein. Viele Restauriermörtel können auf Null auslaufend ergänzt werden. Ein weiterer Substanzverlust durch Ausarbeiten entfällt. Ein fester tragfähiger Untergrund reicht in den meisten Fällen. Die generelle Frage, ob Natursteinvierung oder Ergänzung mit Steinersatz, kann nur durch Abwägen aller am Objekt gestellten Fragen geklärt werden. Ein allgemein gültiges Rezept ist schwer möglich. Durch das Sammeln der Fakten während der Schadenskartierung, aufgrund der Funktion der Bauteile und des kunsthistorischen Wertes des Objekts, wurde bei dieser restauratorischen Instandsetzung ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Vierung und Ergänzung erzielt.

3.5 Fassungen ergänzen

Nach der Instandsetzung der Werksteine wurde die Inschrift nachvergoldet (Abb. 32). Der raue Untergrund wurde zunächst mit Schellack angelegt. Nach der Trocknung wird die Schrift mit Anlegeöl ausgeschrieben und nach einer weiteren Trockenphase mit Blattgold vergoldet.

3.6 Versetzen Denkmal

Das erforderliche Fundament wurde erstellt und der Gedenkstein wieder auf den Friedhof transportiert und versetzt.

Das Fundament wurde aus geschaltem Ortbeton B 25 frosttief gegründet. Als Setzmörtel kam ein Trasskalkmörtel M5 zum Einsatz.

Der Setzmörtel wurde zurückgekratzt und die Fugen werden einheitlich mit einem an den Naturstein angepassten Mörtel verschlossen. Der Setzmörtel muss für eine Nachverfugung bis mindestens die 3-fache Tiefe der Fugenbreite herausgekratzt werden. Der Fugengrund muss für einen hochwertigen Kraftschluss rechtwinklig ausgekratzt werden. In diesem Fall haben wir sofort nach dem Auskratzen verfugt, sodass der Setzmörtel noch Eigenfeuchtigkeit besaß. Die seitlich am Schriftstein stehenden Säulen sind zusätzlich mit V4A Stahldollen M16 verankert (Abb. 33, 34 und 35).

Abschließend wurden einzelne Retuschen angelegt und das gesamte Denkmal noch einmal mit einem Algizid (Remmers BFA) eingelassen. Die Behandlung mit Algizid sollte alle 3–4 Jahre wiederholt werden, um den Bewuchs von schädigendem Moos und Flechten zu verhindern.

3.7. Eine Hydrophobierung der Werksteine wurde abgelehnt da möglicherweise Schädigungen bei Suevit auftreten können.

Quellen

Für den Beitrag wurden Schaubilder und Fotos mit freundlicher Unterstützung des Geoparks Nördlinger Ries, des Rieskratermuseums in Nördlingen und des Stadtarchivs Nördlingen verwendet. Besonderer Dank gilt Frau Heike Burkhardt von der Geschäftsstelle Geopark Ries; Frau Gisela Pösges vom Rieskratermuseum Nördlingen und Herrn Dr. Wilfried Sponsel Stadtheimatspfleger und Archivar der Stadt Nördlingen.

Abb. 10: Rieskrater-Museum Nördlingen

Abb. 11: Geopark Nördlinger Ries

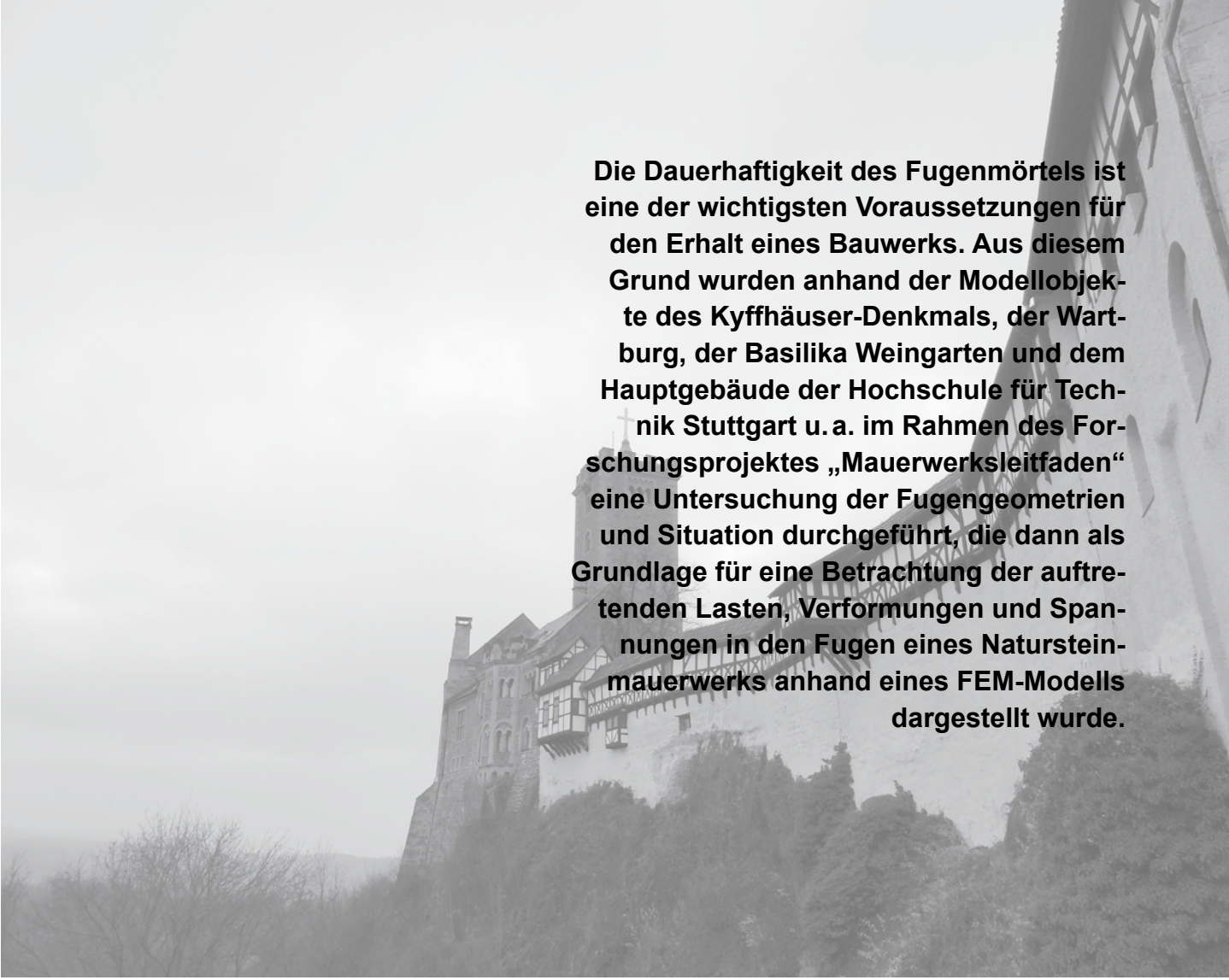
Alle anderen Fotos und Zeichnungen stammen vom Verfasser.

Außerdem möchten wir noch auf folgenden Beitrag hinweisen:

Wolfgang Schneider: Suevit und Restaurierungsmaßnahmen. In: Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.): Beiträge des 2. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg, 14. November 2008 in Potsdam.

Welcher Fugenmörtel ist bei Sanierungen von historischen Mauerwerken aufgrund der Belastungen am besten?

von Daniel Lehn, Roland Fink und Gabriele Grassegger



Die Dauerhaftigkeit des Fugenmörtels ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erhalt eines Bauwerks. Aus diesem Grund wurden anhand der Modellobjekte des Kyffhäuser-Denkmals, der Wartburg, der Basilika Weingarten und dem Hauptgebäude der Hochschule für Technik Stuttgart u. a. im Rahmen des Forschungsprojektes „Mauerwerksleitfaden“ eine Untersuchung der Fugengeometrien und Situation durchgeführt, die dann als Grundlage für eine Betrachtung der auftretenden Lasten, Verformungen und Spannungen in den Fugen eines Natursteinmauerwerks anhand eines FEM-Modells dargestellt wurde.

1 Einleitung

Bei historischen Bauwerken ist die Intaktheit und die Dauerhaftigkeit der Fugenmörtel, eines der wichtigsten Voraussetzungen für den Erhalt des Bauwerks. Die Fugenmörtel zeigen häufig sehr frühzeitig Risse, schlechte Haftung und Schäden, so dass Wasser und Schadstoffe eindringen können. Als einer der maßgeblichen Faktoren wurde hier die mechanische Kompatibilität zwischen den Verformungen und Lasten im Mauerwerk angesehen. Deswegen wurden die Lasten, Verformungen und Spannungen in den Fugen in Abhängigkeit von den konkreten Natursteineigenschaften als FEM-Modell simuliert. Dies soll ermöglichen, für die jeweilige Fugensituation und den konkreten Naturstein den mechanisch richtigen Fugenmörtel auszuwählen. Die materialtechnische und baustofftechnologische Rezeptierung erfolgt als 2. Schritt gemeinsam mit den Partnern des Forschungsprojektes „Mauerwerksleitfaden“, dies in Anlehnung an die historischen Mörtel, mit der Zielrichtung optimaler Erhalt des Mauerwerks. Die Untersuchung erfolgte überwiegend im Rahmen einer Masterarbeit (Lehn, 2013) an der HFT-Stuttgart, Masterstudium Konstruktiver Ingenieurbau (KI). Es wurde in dieser Studie auf die hygrische Dehnung (unter Luftfeuchteinfluss) und die Feuchtedehnung (bis zur Wassersättigung) wegen der Komplexität der Modelle von Simulationsseite und den anspruchsvollen Feuchteprozessen zunächst verzichtet. Dies ist für einen weiteren Schritt geplant.

2 Die Finite-Elemente Parameterstudie

Es soll nun anhand einer Parameterstudie mit FE-Modellen die Fugentragfähigkeit verschiedener Mörtel in Verbindung mit unterschiedlichen Gesteinsarten verglichen und bewertet werden. Um einen Vergleich der verschiedenen Materialien (hier Schilfsandstein, Muschelkalk, Granit und Vollziegel) sowie verschiedenen Mörteln bilden zu können, wurde ein Regelmauerwerk mit den Abmessungen 301,00 cm auf 188,30 cm für die 2 mm-Fuge, 302,50 cm auf 189,50 cm für die 5 mm-Fuge, 305,00 cm auf 191,50 cm für die 1 cm-Fuge und 310,00 cm auf 195,50 cm für die 2 cm-Fuge (Abb. 1) gebildet. Es handelt sich hierbei um ein einschaliges Mauerwerk. Die Steinmaße für sämtliche verwendete Materialien haben dabei eine Länge von 50 cm und eine Breite und Höhe von 37,50 cm. Zur Modellierung des Mauerwerks kam das FEM-Programm RFEM 3D 4.10 von Dlubal zum Einsatz. Die Wahl eines regelmäßigen einschaligen Mauerwerks ermöglicht einen guten Vergleich der verschiedenen Materialien anhand ihrer mechanischen Eigenschaften.

Sämtliche Steinvolumen und Fugenvolumen haben ein 2 cm Volumenelement vorgesetzt. Für die Modellierung des Mauerwerkes wurden sämtliche Flächen als Nullelemente definiert. Dieses vorgesetzte Element wurde für die Lasteinleitung der Temperaturbelastungen als Volumenlast benötigt, da ansonsten Temperaturlasten vom Programm zentrisch in das Steinvolumen gelegt werden würden, was nicht der tatsächlichen Oberflächenerwärmung entsprechen würde. Dieses wurde für sämtliche Fugenbreiten verwendet.

Gelagert ist das Mauerwerkselement mittels einer Flächenbettung mit sehr steifen Federkonstanten sowohl für die Weg- als auch die Schubfedern. Eine kurze Übersicht der Wegfedersteifigkeiten $C_{1,x}$, $C_{1,y}$, $C_{1,z}$ sowie der Schubfedersteifigkeiten $C_{2,x}$ und $C_{2,y}$ befindet sich in Tabelle 1.

2.1 Materialkennwerte

Für die FEM-Berechnung wurden vier verschiedene, an den untersuchten Baudenkmalen verwendete Steinarten (hier Schilfsandstein, Muschelkalk, Granit und als Vergleichswert ein moderner Vollziegel) ausgewählt. Diese betrachteten Gesteine wurden wegen ihrer unterschiedlichen Materialeigenschaften und wegen ihrer verbreiteten Verwendung bei historischen Bauwerken gewählt.

Die Eigenschaften des jeweiligen Materials wurden von der Materialforschungs- und -Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA) im Rahmen der Forschungsinitiative ‚Zukunft Bau‘, zu der auch diese Arbeit gehört, mit allen Projektpartnern aus vielen Praxisuntersuchungen zusammengestellt. Ergänzend wurden Kennwerte aus [1] und die Materialkennwerte von Vollziegeln aus der DIN 1053-1 als Eingangswerte für das FEM-Programm verwendet.

Wie in Tabelle 2 mit den Materialkennwerten zu erkennen ist, werden drei verschiedene Natursteine betrachtet. Als vierte Gesteinsorte und als Vergleich zu den Natursteinen wurde der Vollziegel gewählt, der hier die Steifigkeitsklasse 12 nach DIN 1053-1 hat.

Für den Vergleich wurden des weiteren fünf verschiedene Mörtelarten ausgewählt, die materialtechnisch den Mörtelgruppen I bis IIIa für Normalmörtel nach DIN 1053-1 entsprechen (Tab. 3). Dabei stellen die Werte von $\beta_{D,M0}$ und $\beta_{Z,M0}$ (die Druck- und Zugfestigkeit der Mörtel) in den folgenden Ausnutzungsdiagrammen mit 100 % Ausnutzung den Grenzwert der Belastungen dar.

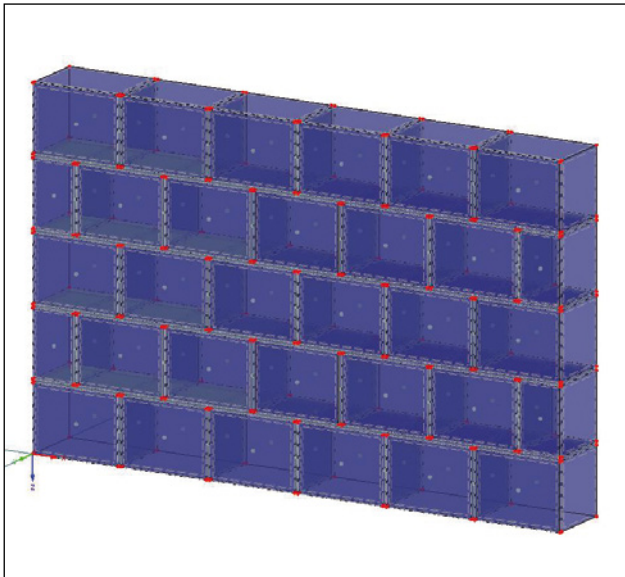


Abb. 1: Darstellung des Mauerwerksmodells in RFEM 3D 4.10

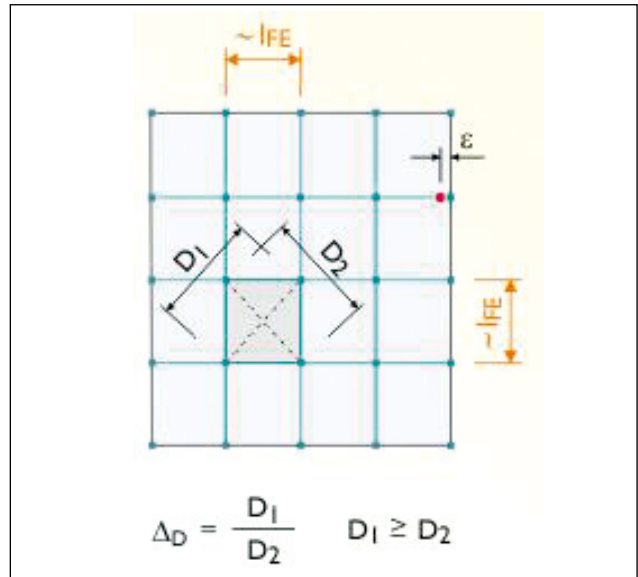


Abb. 2: FE-Netz Kennwerte wie definiert in RFEM 3D 4.10

Tab. 1: Federsteifigkeiten Flächenbettung des Mauerwerks

Bettung Nr.	$C_{1,x}$ [kN/m³]	$C_{1,y}$ [kN/m³]	$C_{1,z}$ [kN/m³]	$C_{2,x}$ [kN/m]	$C_{2,y}$ [kN/m]	Ausfall der Bettung
1	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	100000,00	Kein

Tab. 2: Materialkennwerte der Steine für das FE-Modell: Elastizität, Querdehnzahl μ und Temperaturdehnung α_T

Steinart	E-Modul [N/mm²]	μ [-]	α [m/m °C]
Schilfsandstein	19800	0,026	$7,32 \times 10^{-6}$
Granit	80000	0,27	$8,0 \times 10^{-6}$
Muschelkalk Oberdorla	32640	0,05	$8,0 \times 10^{-6}$
Vollziegel (SFK 12 Steinfestigkeitsklasse)	28000	0,2	$6,0 \times 10^{-6}$

Tab. 3: Materialkennwerte Mörtel genannt 1-5 für die FE-Modelle, Zusammensetzung in Anlehnung an die DIN 1053 und Gegenüberstellung mit Normalmörtelbenennungen (μ = Querdehnzahl)

Mörtel	Zusammensetzung	Druckfestigkeit $\beta_{D,M0}$ [N/mm²]	Zugfestigkeit $\beta_{Z,M0}$ [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	μ [-]
	Mögliche Komponenten				
Mörtel 1	Kalkteig, Kalkhydrat, Hydraulischer Kalk	1,0	0,1	500	0,20
Mörtel 2	Kalkteig, Kalkhydrat, Hydraulischer Kalk, Hochhydraulischer Kalk, Zement	5,0	0,5	2000	0,20
Mörtel 3	Kalkhydrat, Hochhydraulischer Kalk, Zement	5,0	0,5	10000	0,20
Mörtel 4	Zement	10,0	1,0	4000	0,20
Mörtel 5	Zement	10,0	1,0	15000	0,20

Die für die FEM-Berechnung benötigten E-Module wurden aus den Projektdaten und aus [1] übernommen, die Zugfestigkeiten der jeweiligen Mörtel betragen 1/10 der Druckfestigkeiten nach DIN 1053-1. Eine Übersicht der verwendeten Mörtелеigenschaften befindet sich in Tabelle 3.

2.2 FE-Netz

Für das FE-Netz wurde eine Netzfeinheit mit einer finiten Elementlänge von $l_{FE} = 4,00 \text{ cm}$ gewählt, da dieser Wert eine hinreichende Genauigkeit bei noch akzeptablen Berechnungszeiten ermöglicht. Der maximale Abstand zwischen dem Knoten und der Linie, um den Knoten in die Linie zu integrieren, beträgt $\epsilon = 0,10 \text{ cm}$. Das maximale Verhältnis der FE-Viereck-Diagonalen beträgt $\Delta_D = 1,8$ (Netzkennwerte s. Abb. 2.).

Eine Vergleichsrechnung mit einer Elementlänge von $l_{FE} = 2,00 \text{ cm}$ hat nur minimale Abweichung im Vergleich zur größeren Elementlänge ergeben, jedoch hat sich durch das feinere Netz die Rechenzeit um den Faktor Acht erhöht, was generell eine unzumutbare Rechendauer für die 80 verschiedenen Rechenmodelle darstellt.

2.3 Berechnungsparameter

Für die Vergleichsstudie wird das Mauerwerk mit drei verschiedenen Lastfällen LF 1 bis LF 3 sowie zwei Lastfallkombinationen LK 1 und LK 2 belastet. Die verschiedenen Lastfälle werden in Tabelle 4 dargestellt.

Diese Lastfallauswahl und -kombination wurde aufgrund vorheriger Simulationen in [2] durchgeführt. In [2] wurden FEM-Berechnungen an Schilfsandsteinen aus Baden-Württemberg durchgeführt und mit experimentellen Daten verglichen. Bei diesen Versuchen ging es lediglich um das thermisch-hygrische Steinverhalten mit Belastungen bis zum Bruch bei anisotropen baden-württembergischen Schilfsandsteinen; Fugen wurden dabei nicht berücksichtigt. Bei diesen

vorherigen Berechnungen hatte sich jedoch bereits herausgestellt, dass Schäden am Naturstein vor allem durch Temperaturschwankungen und Wassergehaltsänderungen beim Frost-Tau-Wechsel auftreten. Aus diesem Grund werden hier zunächst nur je ein Erwärmungs- und ein Abkühlungslastfall angesetzt. Der Lastfall der senkrechten Flächenlast wurde so gewählt, dass er ungefähr die gleiche Größenordnung wie das Eigengewicht des Modellmauerwerks hat.

Die beiden Temperaturlasten wurden als Volumelasten in den vorgesetzten Volumenelementen aufgebracht.

Die senkrechte Auflast wurde als zusätzliche Flächenlast aufgebracht. Sie beschreibt die senkrechte Vorbelastung bei höheren Mauern.

Die beiden Lastfallkombinationen LK 1 und 2 stellen dabei die Überlagerungen von jeweils Erwärmung bzw. Abkühlung mit dem Lastfall der senkrechten Auflast dar.

3 Berechnungsergebnisse und Auswertung

3.1 Normalspannung σ

In Abbildung 4 wird die Ausnutzung (d. h. das Verhältnis der vorhandenen Spannung σ_{vorh} zur aufnehmbaren Grenzspannung σ_{Grenz}) der Normalspannungen σ_x exemplarisch am Beispiel des Sandsteins als Maß für die gleichgerichtete Beanspruchung in den Normalenrichtungen für die unterschiedlichen Mörtelgruppen dargestellt. Es wurden zusätzlich noch die Spannungsrichtungen σ_y und σ_z betrachtet. Wie zu erwarten war, ist die Beanspruchung auf Zug im Mörtel in allen Fällen verantwortlich für ein Mörtelversagen, während die Druckbeanspruchung zumindest bei den höherwertigen Mörteln meist unter 100 % bleibt.

Es werden nachfolgend die jeweiligen Gesteinsarten einzeln betrachtet und die Ergebnisse dargestellt.

Tab. 4: Lastfälle für das Berechnungsmodell, Erwärmung bzw. Abkühlung der Oberfläche und Auflast auf dem Mauerwerk

Lastfall	Bezeichnung	Belastung
Erwärmung	LF 1	+27 °C
Abkühlung	LF 2	-17 °C
Senkrechte Flächenlast	LF 3	500 kN/m ²
Erwärmung + senkrechte Flächenlast	LK 1	[-]
Abkühlung + senkrechte Flächenlast	LK 2	[-]

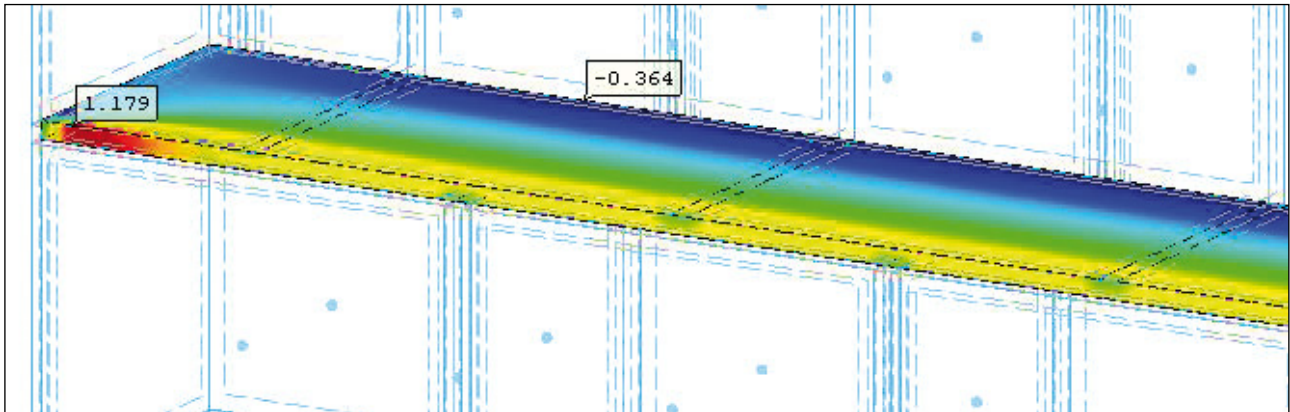


Abb. 3: Fugenversagen für 2 cm-Fuge; LF 1; Mörtel 5;
Normalspannung σ_x , Verlauf von blau (Druck) nach rot (Zug)

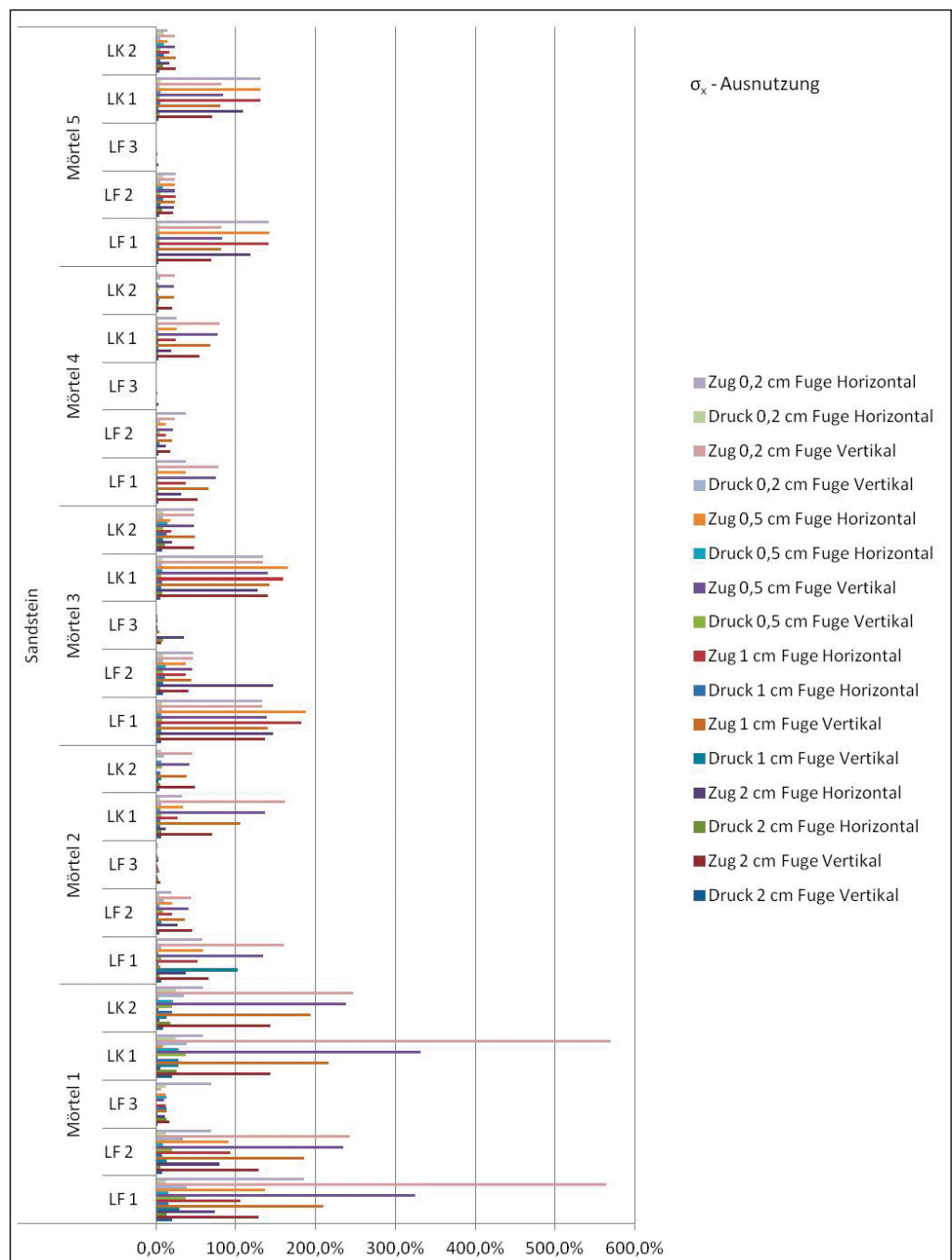


Abb. 4:
Ausnutzung Sand-
stein für Normal-
spannung σ_x

3.1.1 Verhalten des Sandsteins

Beim Sandstein ist der Einfluss der Fugendicke relativ gering, was die Normalspannungen angeht.

Als einziger Mörtel hält hier der Mörtel 4 (siehe Tabelle 3) die Ausnutzung für alle Spannungsrichtungen ein. Für alle anderen Mörtelarten kommt es unter der betrachteten Beanspruchung zu Überschreitungen der Grenzspannungen und damit zumindest zu lokaler Schädigung.

Der höhere E-Modul des Mörtels 5, verbunden mit einer gleichbleibenden Druck- und Zugfestigkeit, sorgt dafür, dass gerade bei der horizontalen Fuge, die maximalen Normalspannungen σ_x des Mörtels überschritten werden. Der Lastfall 1 stellt sich dabei als maßgebend heraus. In der Lastfallkombination mit der senkrechten Auflast wirkt sich diese positiv auf die Normalspannungen aus, wobei der Einfluss eher gering ausfällt. Dies kann man gut an der Ausnutzung im Lastfall 3 erkennen.

Für Sandsteine kann in diesem Fall klar gesagt werden, dass ein Mörtel mit hoher Festigkeit, sprich im Bereich der Mörtelgruppe III, Verwendung finden sollte. Gleichzeitig ist der E-Modul des Mörtels I im Verhältnis zum E-Modul des Steins ein ausschlaggebender Faktor. Die Vermutung liegt nahe, dass, wenn Mörtel 3 mit einem niedrigeren E-Modul ausgestattet wäre, dieser ebenfalls eine ausreichende Zugfestigkeit bieten würde.

In Abbildung 3 wird der Lastfall 1 für die 2cm-Horizontalfuge mit Mörtel 5 dargestellt. Man erkennt auf dem Bild das Überschreiten der maximal aufnehmbaren Normalspannung um $0,179 \text{ N/mm}^2$, was einer Ausnutzung von 117,9% entspricht. Der betroffene Bereich ist jedoch in diesem Fall sehr klein. Lediglich der in der Graphik (Abb. 3) rot eingefärbte Bereich ist tatsächlich über dem Grenzwert und er erreicht eine Tiefe von nicht einmal 1,0cm, während sich die gelb eingefärbten Bereiche bei einer Ausnutzung von knapp 60% bewegen. Im roten Bereich wird der Mörtel aufgrund der hohen Zugkräfte versagen. Einen generellen Überblick über die Belastung für alle Lastfallkombinationen bei Mörtelfugen in Sandstein gibt Abbildung 4, wobei 100% Ausnutzung der Belastungsgrenze des Mörtels entspricht.

3.1.2 Verhalten des Granits

Bei Granit macht sich der Einfluss der Fugendicke deutlich stärker bemerkbar.

Betrachtet man die Fugen 2mm und 2cm, beide für den Mörtel 4 und die Normalspannung σ_x im Lastfall 1, zeigt sich, dass in beiden Fällen die maximal

aufnehmbaren Zugspannungen überschritten werden, jedoch ist der Wert bei der 2mm-Fuge beinahe um den Faktor vier größer als bei der 2cm-Fuge. Dies wird im Falle des Granits auf den extrem hohen E-Modul Wert und der Querdehnzahl $\mu=0,27$, die sich damit in der Nähe der Querdehnzahl des Mörtels befinden, zurückzuführen sein.

Eine Betrachtung der Steine zeigt, dass die Spannungen bei der größeren Fuge im Wesentlichen im Stein auftreten, während bei der kleineren Fuge ein großer Teil der Spannungen über die Fugen abgebaut werden kann.

Beim Granit erfüllt keiner der ausgewählten Mörtel die Anforderungen. Mörtel 4 erfüllt dabei jedoch erneut am ehesten die Anforderungen. Hier wäre allerdings eine Erhöhung der Zugfestigkeit des Mörtels erforderlich, da diese bei sämtlichen Fugendicken überschritten wird.

3.1.3 Verhalten des Muschelkalk

Das Materialverhalten bei der FEM-Simulation mit Muschelkalk ähnelt dem des Granits. Bei den Fugengrößen im Bereich 2cm und 1cm werden die maximalen Spannungen eingehalten. Bei kleineren Fugengrößen überschreitet die Ausnutzung jedoch wieder für alle fünf Mörtelarten den Grenzwert. Wie bei den vorangegangenen Steinarten stellt sich der Mörtel 4 als einziger Mörtel heraus, der für alle Spannungsrichtungen die Grenzwerte einhält, zumindest bei der Fugendicke 2cm.

Eine auffällige Anomalie stellt sich jedoch bei der Fugenstärke 5mm ein: Unabhängig von der Mörtelwahl stellt sich bei dieser Fugenstärke eine vielfach höhere Normalspannung ein als bei den Fugen mit 2mm oder 1cm Stärke. Bei einer Betrachtung der Fugen für den Spannungsverlauf σ_x im Erwärmungslastfall mit Mörtel 4 zeigt sich, dass während sich die Werte bei 2mm und 1cm in den zu erwartenden Bereichen bewegen (mit einer jeweils höheren Normalspannung bei kleiner werdender Fugenstärke), ist der Wert bei der 5mm-Fuge im Zugbereich beinahe um den Faktor 16 größer als bei der 1cm-Fuge und der 2mm-Fuge. Ein Modellfehler konnte nach einer Überprüfung der Eingangswerte ausgeschlossen werden, vor allem da sich der Fehler bei Anwendung der Gesteinsdaten vom Sandstein am selben Modell nicht wiederholen ließ.

Dadurch dass sich keine Ursachen für die großen Abweichungen bei 5mm-Fugenstärke finden ließen, werden die Werte für diese Fugenstärke beim Muschelkalk ignoriert, da die Größenordnung der Abweichung im unrealistischen Bereich ist.

Betrachtet man die anderen Fugenstärken beim Muschelkalk, ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei Granit: Mit abnehmender Fugenstärke nimmt die Ausnutzung (Belastung) der Fugen zu. Mörtel 1 bis 3 scheiden aufgrund der fehlenden Zugbelastbarkeit aus, bei den Mörteln 4 und 5 zeigt sich wieder der positive Einfluss des geringeren E-Moduls bei gleichbleibender Druck- und Zugfestigkeit des Materials.

Die maßgebende Bereiche des Mörtels befinden sich in den ersten 5 cm der Fuge. Der betroffene Bereich ist selbst bei der 5 mm-Fuge praktisch identisch zu den anderen Fugenstärken.

3.1.4 Verhalten von Vollziegel

Beim Vollziegel bestätigt sich das Materialverhalten der anderen Gesteinsarten. Wie bei den vorherigen Modellen nimmt die Ausnutzung der Fugen bei abnehmender Fugenstärke zu. Mörtel 1 bis 3 erweisen sich auch beim Vollziegel als ungeeignet, ihre Festigkeiten wurden überschritten, während Mörtel 4 bis zur 1 cm-Fuge uneingeschränkt anwendbar ist. Bei Mörtel 5 wurde zumindest bei der 2 cm-Fuge die Grenzausnutzung nicht überschritten. Bei der 1 cm-Fuge werden zudem zumindest die Normalspannungen von σ_y und σ_z der Grenzwerte eingehalten und auch bei σ_x wird der Grenzwert nur knapp überschritten. Es lässt sich auch eine unterschiedliche Belastung der Fugen im Vergleich von Mörtel 4 und Mörtel 5 beobachten: Während beim Mörtel 4 in der vertikalen Fuge die Grenzausnutzung überschritten wird, versagt beim Mörtel 5 die Horizontalfuge.

In Abbildung 5 sind von links nach rechts die Vertikalfugen für den Lastfall 1 (Temperaturerhöhung um 27°C) und der Normalspannung σ_x für jeweils die 2 mm breite Fuge und die 5 mm breite Fuge mit dem Mörtel 4 und dem Mörtel 5 dargestellt. Beim Mörtel 4 ist die Steigerung der Normalspannung bei abnehmender Fugenstärke gut zu erkennen, während die Steigerung beim Mörtel 5 minimal ausfällt. Da der E-Modul der einzige Faktor ist, welcher die beiden Mörtel unterscheidet, kann man die Ursache für den unterschiedlichen Spannungsverlauf im Verhältnis des E-Moduls von Stein zum Mörtel finden.

Wie in den anderen Modellen wird auch hier wieder die Zugbeanspruchung maßgebend für das Versagen. Auf Druck wird selbst der Mörtel 1 nicht annähernd ausgenutzt.

3.1.5 Zusammenfassung Ergebnisse für Normalspannung

Wie die Spannungsverläufe im Mauerwerk für die verschiedenen Gesteinsarten zeigen, hat die Art des Gesteins einen großen Einfluss auf die Beanspruchung des Mörtels. Dies ergibt sich primär aus den Steifigkeitsunterschieden zwischen Stein und Mörtel. Auch die Fugenstärke spielt eine entscheidende Rolle bei der Ausnutzung der aufnehmbaren Normalspannung. Bei abnehmender Fugenstärke nahmen die Normalspannungen je nach Gesteinsmaterial moderat bis stark zu, was aufgrund der Spannungsumlagerung zu erwarten war. Wenn das Materialverhalten des Muschelkalks bei der 5 mm Fugenstärke vernachlässigt wird, verhalten sich die Fugen auch bei sämtlichen getesteten Steinen erwartungsgemäß. Der Granit, mit dem im Abstand höchsten E-Modul und der höchsten Festigkeit, benötigt einen entsprechend festen Mörtel. Bei allen Steinen waren die Druckfestigkeiten sämtlicher Mörtel, außer der des Mörtel 1, vollkommen ausreichend und wurden oft nur minimal ausgenutzt. Wie erwartet ist die Zugfestigkeit des Mörtels maßgebend, vor allem in den ersten 5 cm der Fuge.

Es hat sich überdies herausgestellt, dass der Mörtel 4 für sämtliche Gesteinsarten der geeignetste Mörtel ist. Sein Hauptmerkmal, der im Vergleich zum ansonsten identischen Mörtel 5 viel kleinere E-Modul, wirkte sich in allen Belastungsfällen günstig auf das gesamte Mauerwerk aus. Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei den Mörteln 2 und 3 beobachtet werden, die untereinander ein ähnliches Verhältnis von E-Moduli aufweisen wie Mörtel 4 und 5.

Ein Grund für dieses Verhalten wird das Verhältnis des E-Moduls von Stein und Mörtel sein. Der E-Modul des Steins liegt in der Regel um ein vielfaches höher als der des Mörtels.

Was mit dem Spannungsverlauf geschieht, wenn sich die E-Moduli annähern, konnte man im Falle des Vollziegels im Zusammenspiel mit dem Mörtel 5 erkennen: Das Verhältnis des E-Moduls vom Mörtel zum Stein betrug hier knapp über 0,5, was zu einem Spannungsverlauf wie in Abbildung 5 führte. Ein ähnlicher Verlauf konnte auch beim Muschelkalk mit dem Mörtel 5 beobachtet werden.

Der ideale Mörtel für sämtliche hier betrachteten Modelle wäre also ein hochzugfester Mörtel, mit einem zum Stein verhältnismäßig niedrigen E-Modul.

Tab. 5: Mindesthaftscherfestigkeit für Normalmörtel [3] nach DIN 1053-100

Mörtelart	Mörtel 1	Mörtel 2	Mörtel 3	Mörtel 4	Mörtel 5
f_{vk0} [N/mm ²]	0,02	0,08	0,18	0,22	0,26

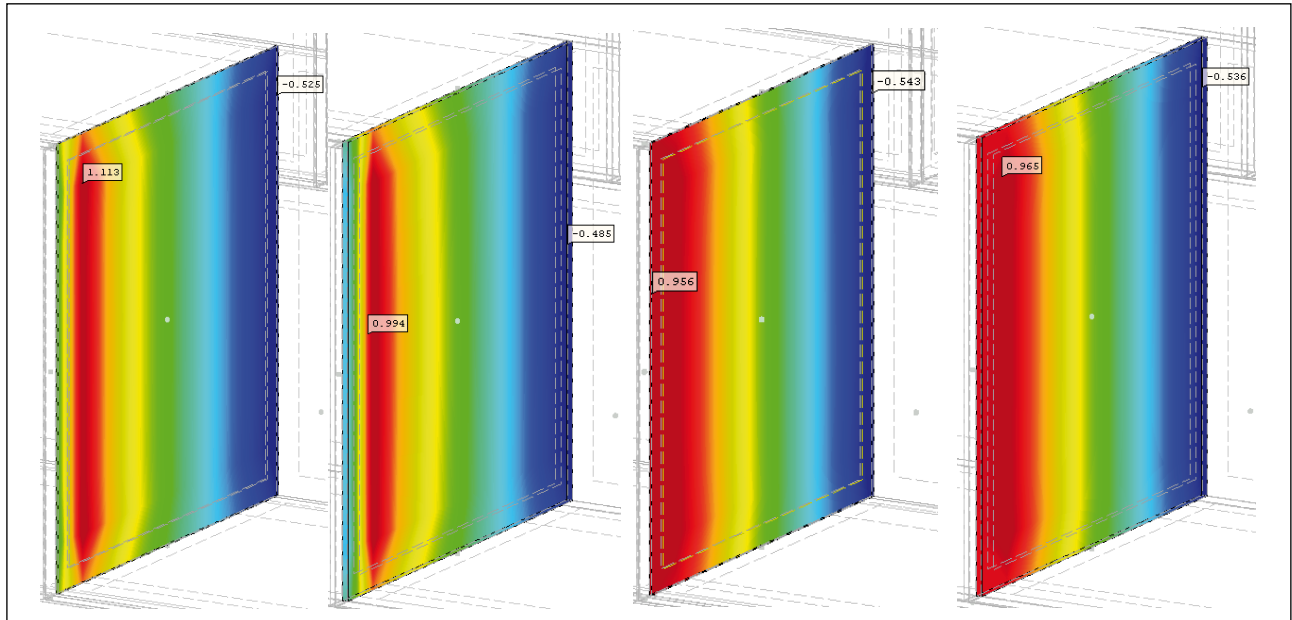


Abb. 5: Vollziegel, Vergleich der 2mm-Stoßfugen mit 5mm, Temperaturlastfall LF 1, mit Mörtel 4 und Mörtel 5, σ_x Verlauf von blau (Druck) nach rot (Zug). Beispiele von links nach rechts: 2mm- und 5mm-Fuge mit Mörtel 4, 2mm- und 5mm-Fuge gefüllt mit Mörtel 5

3.2 Zusammenfassung Ergebnisse für Schubspannung τ

Für die Ausnutzung der Schubspannungen als Maß für die Scherbeanspruchung im Mauerwerk wurde die abgeminderte Haftscherfestigkeit f_{vk0} des Mörtels zum Gestein, im Sinne einer Verbundfestigkeit nach DIN 1053-100 angewendet (Tab. 5). Die normgemäßen Mörtel NM I bis NM IIIa (NM= Normalmörtel) entsprechen dabei den im Modell verwendeten Mörteln 1 bis 5. Im Allgemeinen verhalten sich die Schubspannungen für alle Materialien analog zu den Normalspannungen.

Auffällig sind auch hier wieder die Spannungen beim Muschelkalk bei einer Fugenstärke von 5 mm.

Lässt man die Werte für die 5 mm Fugenbreite außer Acht, verhalten sich die Ausnutzungen der einzelnen Mörtel unter Schub ähnlich wie bei den Normalspannungen. In Abbildung 6 wird repräsentativ die Ausnutzung τ_{yz} für den Sandstein dargestellt:

Gut zu erkennen ist hier, dass sich die Ausnutzungsgrade ab Mörtel 3 nur noch marginal unterscheiden. Für alle Schubspannungsrichtungen gilt, dass die

Ausnutzung der Horizontalfugen mit abnehmender Fugenstärke maßgebend wird.

Der E-Modul hat im Falle der Schubspannung einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Ausnutzung, was auf den Einfluss der Haftscherfestigkeit f_{vk0} als Verbund zwischen Stein und Mörtel zurückzuführen ist. Der Sprung der Haftscherfestigkeit von Mörtel 1 zu Mörtel 2 und von Mörtel 2 auf Mörtel 3 ist wesentlich größer als der Sprung von Mörtel 3 zu Mörteln 4 und 5. Mörtel 2 kann das Vierfache an Schubkräften aufnehmen, im Vergleich zu Mörtel 1.

Mörtel 3 kann immer noch knapp die doppelte Schubkraft von Mörtel 2 aufnehmen. Die Steigerung von Mörtel 3 auf 4 und von Mörtel 4 auf 5 beträgt nur noch knapp 20 %, weshalb der Unterschied bei der Ausnutzung der Mörtel 3 bis 5 relativ gering ausfällt.

Aufgrund der bei der Simulation angenommenen geringen aufnehmbaren Schubspannung liegen die Mörtel 1 und 2, wie schon bei den Normalspannungen, weit außerhalb der Grenzausnutzungsbereiche. Der Vorteil des geringeren E-Modul von Mörtel 4 gegenüber Mörtel 5 wird hier durch die geringere Mindesthaftscherfestigkeit wieder aufgehoben.

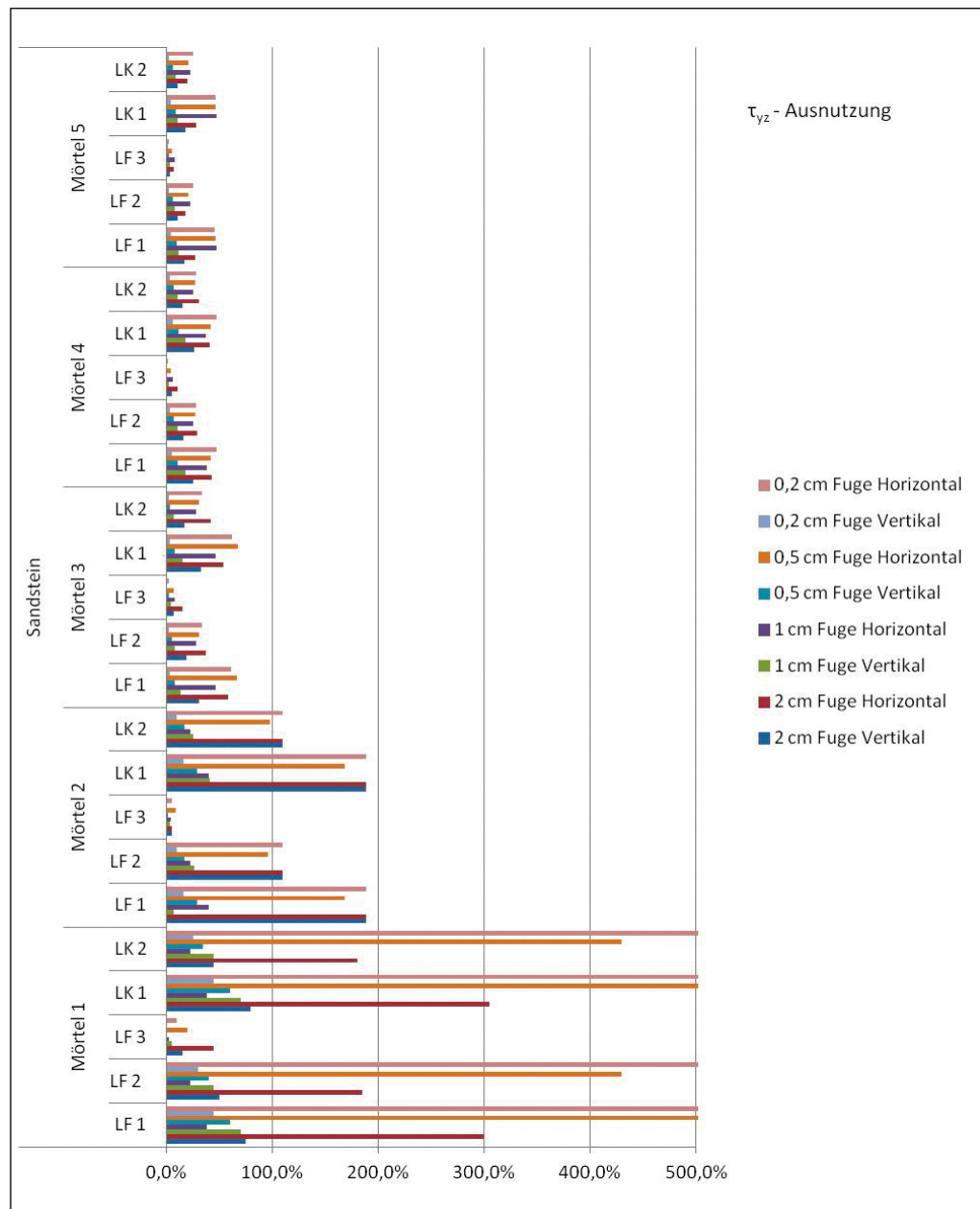


Abb. 6:
Ausnutzung Sand-
stein für Schub-
spannung τ_{yz}

Im Falle der Schubspannung τ_{xy} stellt sich jedoch für sämtliche Steinarten ein umgekehrtes Bild dar, dargestellt in Abbildung 7 am Beispiel des Sandsteins. Plötzlich wirken die Mörtel 1 und 2 sowie der Mörtel 4 wesentlich günstiger. In dieser Spannungsrichtung ist der E-Modul des Mörtels wieder der ausschlaggebende Einflussfaktor.

Zusammenfassung der Effekte bei Schubspannungen

Die Schubspannungen können bei größeren Fugenbreiten leichter aufgenommen werden als bei schmalen Fugen, dies ist ähnlich wie bei den Normalspannungen. Anders als bei den Normalspannungen spielt das E-Modul jedoch nur in einer Spannungsrichtung

eine maßgebende Rolle. Dies führt wiederum dazu, dass der Mörtel 4 mit seiner hohen Haftscherfestigkeit bei gleichzeitig niedrigem E-Modul am besten für sämtliche Steine geeignet ist.

Beim Granit (und unter Vorbehalt Muschelkalk bei der 5 mm-Fuge) werden für alle Mörtel die Mindesthaftscherfestigkeit überschritten. Lediglich für die 2 cm-Fuge sind die Ausnutzungsüberschreitungen bei Mörtel 4 noch im akzeptablen Bereich. Das Versagen tritt in den ersten 1 bis 2 cm der Fugenoberfläche auf.

Letztendlich ist das Versagen bei Normalspannung (also hohen Lasten) jedoch aussagekräftiger für die Fugen, als das Schubversagen, da sich dieses auch in wesentlich größeren Tiefen der Fuge abspielt. Dies be-

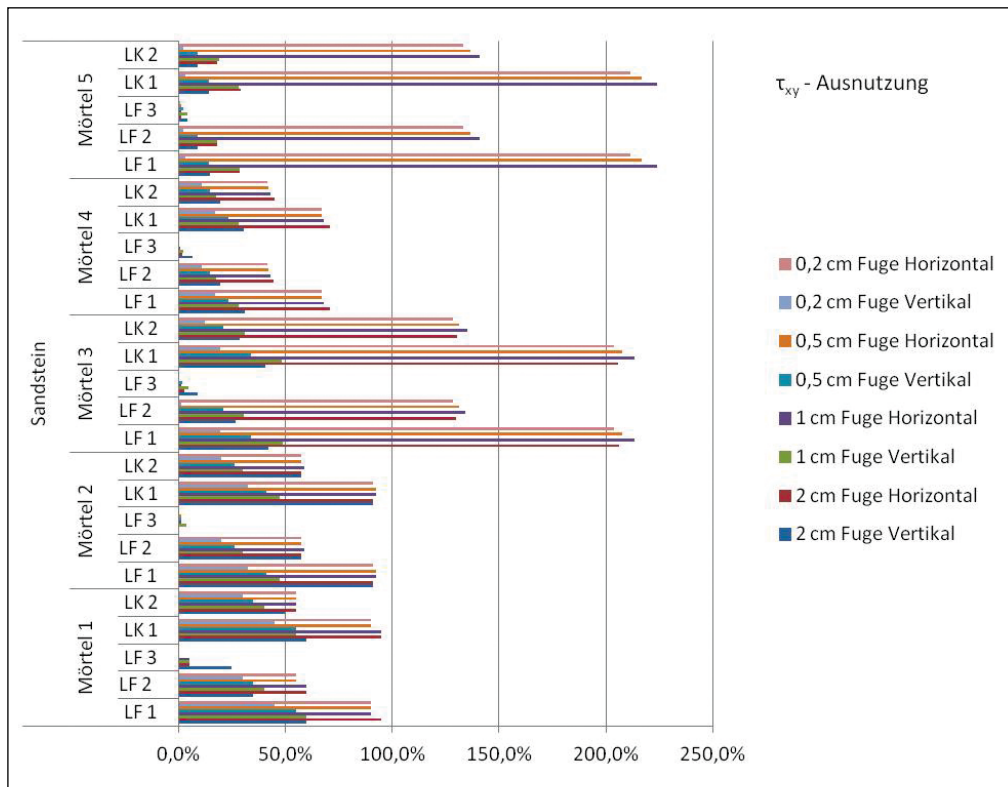


Abb. 7:
Ausnutzung Sand-
stein für Schub-
spannung τ_{xy}

deutet jedoch nicht, dass ein Schubversagen vernachlässigt werden darf. Ein Haftversagen der Fuge in den Randschichten führt zu weiteren Schäden in der Tiefe des Mauerwerks und ist vor allem für die Oberflächenansicht des Mauerwerks unzumutbar, da gerade diese bei einer Sanierung das sichtbare Ergebnis der Arbeiten ist und bei Oberflächen Wassereintritt die Entstehung potentieller schadhafter Schwachstellen erhöht.

4 Zusammenfassung

Bei der FEM-Parameterstudie an Mauerwerken mit verschiedenen Gesteinen und Mörteln erwiesen sich vor allem die Mörtelfestigkeit auf Zug sowie der E-Modul des Mörtels im Verhältnis zum E-Modul des Steins für die Normalspannung als ausschlaggebend bei der Ausnutzung bis zur Belastungsgrenze der Fugen, diese entspricht 100% Ausnutzung in den Graphiken. Bei abnehmender Fugenstärke nahmen die auftretenden Fugenspannungen bei sämtlichen Modellen zu. Der wichtigste Faktor bleibt jedoch die Zugbeanspruchbarkeit des Mörtels. Im Randbereich der Fuge wurde diese vor allem bei Gesteinen mit hohen E-Moduli überschritten, wenn der E-Modul in der Fuge gleichzeitig ebenfalls relativ hoch war. Als geeignetster Mörtel für alle Gesteine stellte sich der

Mörtel 4 mit dem größten Festigkeit-zu-E-Modul Verhältnis heraus (Tab. 3).

Ein ähnliches Bild bietet der Vergleich der Schubspannungen: Hier hatte die Haftscherfestigkeit der einzelnen Mörtel den größten Einfluss auf das Tragverhalten der Fuge, wobei sich für die Schubspannung τ_{xy} der E-Modul wieder als entscheidender Faktor bei sämtlichen Mörtel und Gesteinskombinationen einstellte.

Am Ende ist auch bei den Schubspannungen derselbe Mörtel 4 wie bei den Normalspannungen als günstiger anzusetzen.

Das Ergebnis der Parameterstudie bestätigte auch die bereits aus zahlreichen experimentell durchgeführten Versagensfällen des Mörtels bekannten Effekte an den Fugenrändern. Die Spannungsspitzen bilden sich generell immer im Randbereich der Fuge, also an den Mauerwerksoberflächen (Abb. 3 und 5).

Aufgrund seiner günstigen Eigenschaften mit relativ geringem E-Modul und hoher Druckfestigkeit lässt sich für alle Steine und Fugenstärken übergreifend lediglich Mörtel 4 aus den Simulationsdaten empfehlen. Je nach Stein und Fugenstärke sind zwar auch noch weitere Mörtel anwendbar, jedoch eben auch nur bei einer Fugenstärke von 1 bis 2 cm.

Ab der Fugenstärke 5 mm abwärts, also bei sehr dünnen Fugen, werden die Gesteinseigenschaften maßgebend und die Gesteine mit den größeren E-Moduln (hohe Steifigkeit) verursachen aufgrund ihres Dehnungsverhaltens unter Temperaturbelastungen die größten Fugenschäden. Insbesondere der Granit verlangt einen Mörtel, der sehr hohe Zugkräfte aufnehmen kann.

Die FEM-Studie im Rahmen dieser Arbeit deckte einen Vergleich vier verschiedener Natursteine in einem Regelmauerwerk mit Normmörteln ab. Eine weitere Untersuchung des Materialverhaltens bei unregelmäßiger Mauerwerksgeometrie und eine Erweiterung der verschiedenen Mörtel Eigenschaften wären ebenfalls wünschenswert, um ein besseres Bild über das allgemeine Fugenverhalten zu erhalten.

Die derzeitigen normativen Bemessungsmethoden betrachten das Mauerwerk lediglich als Ganzes, mit dem Wissen, dass durch die wesentlich höheren Festigkeitswerte der Steine die geringeren Werte der Fugen teilweise wieder aufgehoben werden und somit die Grenzbelastung für das Mauerwerk irgendwo in der Mitte der beiden Materialtragfähigkeiten liegt. Um einen guten und dauerhaften Verschluss der vorderen Fugenabschnitte zu gewährleisten, sollte also nicht nur auf die gewöhnlichen Bemessungsmethoden zurückgegriffen werden, da dieser Bereich bei der Bemessung nicht genau genug berücksichtigt wird. Für einen dauerhaften Fugenverschluss ist die handwerkliche Ausführung maßgebend.

Wichtigste Ergebnisse/Fazit:

- Bei abnehmender Fugenstärke nehmen die Fugenspannungen im Mörtel zu.
- Das Verhältnis der Elastizitätsmodule von Stein und Mörtel haben einen starken Einfluss, d.h. idealerweise ist ein weicher Mörtel mit hoher Festigkeit einzusetzen.
- Die Zugfestigkeit des Mörtels ist maßgebend für das Versagen, da die Druckfestigkeitsgrenze des Mörtels um ein 10-faches höher ist.
- Bei zusätzlicher Feuchtedehnung ist mit erhöhten Spannungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt zu rechnen. Dies ist für eine weitere Simulation vorgesehen.

5 Ausblick

Eine weitere Betrachtung der verschiedenen Fugengeometrien und deren Einfluss auf das Fugenverhalten wäre wünschenswert, da es bei historischen Mauerwerken oft auch konkav oder konvex angeordnete

Fugenbilder und unregelmäßige Fugen gibt, deren Verhalten bei hoher Ausnutzung der Grenzspannungen hier nicht untersucht wurde.

Diese Arbeit hat sich nur mit dem Teil des mechanischen Verhaltens der Fugen auf Belastungen beschäftigt. Für einen aussagekräftigen Leitfaden zur Sanierung historischer Mauerwerksfugen werden jedoch noch weitere Parameterstudien erforderlich sein.

Literatur

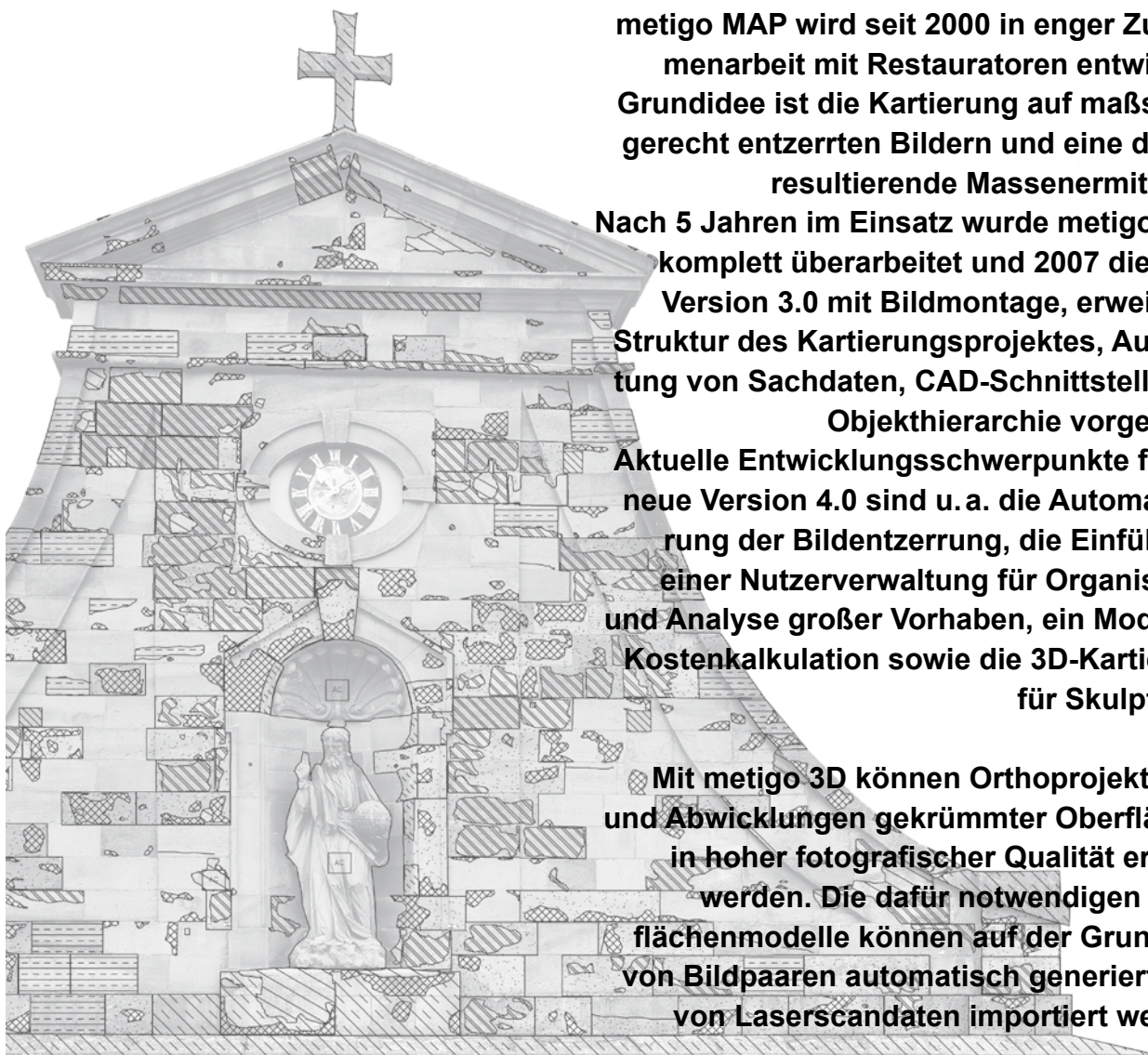
- [1] Huster, U. (2000): „Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung: Entwicklung und Anwendung eines Finite-Elemente-Programmes,“ Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, Kassel.
- [2] Grassegger, G., Ožbolt, J. und Reinhardt, H.-W. (2009): „Wie belastbar und heterogen ist Sandstein? Ergebnisse von experimentellen Daten und FE-Simulationen an baden-württembergischen Schilfsandsteinen, In Tagungsband ARKUS 2009, Grassegger, G., Werner, W. und Wölbert, O. (Hrsg.) Die Naturwerksteinvorkommen Baden-Württembergs und ihr Einsatz für die Denkmalpflege, Technik und Architektur, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, S. 59–80.
- [3] DIN 1053-100:2006-08: Mauerwerk. Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts, Berlin: NABau im DIN, 2006.
- [4] Lehn, Daniel (2013): Bemessung von Fugen in historischem Mauerwerk – rechnerische Simulation verschiedener Einflüsse auf die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von Fugenmörteln im Mauerwerk, 99 Seiten, Masterarbeit an der HFT Stuttgart, Masterstudium KI, WS 2012/13, Erstbetreuer Prof. Dr.-Ing. Roland Fink, Zweitbetreuer Prof. Dr. rer. nat. Gabriele Grassegger (unveröffentlicht)

Danksagung

Für die Förderung durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) über den Projektträger Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Programm „Zukunft Bau“, Thema: „Entwicklung eines Leitfadens für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerksoberflächen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit“ (Langtitel) als Partner der MFPA/Weimar (Projektleiter Dipl.-Ing. Heike Dreuse, Dr.-Ing. Hans-Werner Zier).

Moderne Methoden der Dokumentation für die Restaurierung – Digitale Kartierung und automatisierte 3D-Objektdokumentation mit der Software metigo®

von Gunnar Siedler und Sebastian Vetter



metigo MAP wird seit 2000 in enger Zusammenarbeit mit Restauratoren entwickelt. Grundidee ist die Kartierung auf maßstabsgerecht entzerrten Bildern und eine daraus resultierende Massenermittlung. Nach 5 Jahren im Einsatz wurde metigo MAP komplett überarbeitet und 2007 die neue Version 3.0 mit Bildmontage, erweiterter Struktur des Kartierungsprojektes, Auswertung von Sachdaten, CAD-Schnittstelle und Objekthierarchie vorgestellt. Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte für die neue Version 4.0 sind u. a. die Automatisierung der Bildentzerrung, die Einführung einer Nutzerverwaltung für Organisation und Analyse großer Vorhaben, ein Modul für Kostenkalkulation sowie die 3D-Kartierung für Skulpturen.

Mit metigo 3D können Orthoprojektionen und Abwicklungen gekrümmter Oberflächen in hoher fotografischer Qualität erzeugt werden. Die dafür notwendigen Oberflächenmodelle können auf der Grundlage von Bildpaaren automatisch generiert oder von Laserscandaten importiert werden.

Dank langjähriger Erfahrung in der Dokumentation für die Denkmalpflege haben die Autoren das Hintergrundwissen, Methoden für die digitale Dokumentation von der Bildauswertung bis hin zur Kartierung zu entwickeln. Ein Ergebnis ist die Entwicklung einer 2D-Kartierungssoftware mit integrierter Bildentzerrung, die bereits über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren vertrieben wird.

metigo MAP wurde in enger Zusammenarbeit mit Restauratoren und Bauforschern entwickelt. Mit einfacher Ausstattung, bestehend aus Digitalkamera, Laser-Entfernungs-Messgerät und einem Standard-Notebook wird die Kartierungssoftware in vielen Restaurierungsfirmen eingesetzt.

2007 wurde die komplett überarbeitete Version metigo MAP 3.0 mit Bildentzerrung und Montage, erweiterte Struktur des Kartierungsprojektes sowie verschiedenen neuen statistischen Auswertemöglichkeiten, vorgestellt. Ende 2012 wurde auf der Denkmalmesse Leipzig die Version 4.0 mit neuen Entwicklungsschwerpunkten wie der 3D-Kartierung und der Kostenkalkulation erstmals vorgestellt.

Digitale Stereophotogrammetrie erlaubt dem Anwender die dreidimensionale Auswertung auf der Objektoberfläche. Die Integration von Bildanalysetechniken vereinfacht die automatisierte Auswertung von großen Bildverbänden in hoher Genauigkeit.

In einem ersten Schritt werden identische Punkte im Bildverband gesucht, auf deren Grundlage Bildpaare zu Stereomodellen verknüpft werden, wodurch die Berechnung der photogrammetrischen Orientierung für jedes Bild ermöglicht wird.

Mit Hilfe eines angepassten Expansions- und Matching-Algorithmus kann die Objektoberfläche im Stereomodelle automatisch „gescannt“ werden. Im Ergebnis entsteht je Stereomodelle eine 3D Punktwolke, die mit der Textur der Bilder eingefärbt wird.

Nach Erstellung eines triangulierten digitalen Oberflächenmodells (DOM) wird die Textur der zum „Scannen“ verwendeten Bilder automatisch auf dieses aufgetragen. Dieses texturierte Oberflächenmodell kann für die Berechnung von maßstabsgerechten Orthofotos oder als Grundlage für die 3D-Kartierung verwendet werden.

1 Moderne Methoden der 2D-Dokumentation

1.1 Bildentzerrung/Kartierungsgrundlage

Die Bildentzerrung und die Montage (Abb. 1) erlauben die Erstellung von Bildplänen als maßstabsgerechte Kartierungsgrundlage. Wird die Objektoberfläche durch eine hinreichend genaue Ebene beschrieben, kann die projektive Bildtransformation angewendet werden.

Für die Bildentzerrung werden am Objekt gemessene Strecken sowie die Informationen der Objektgeometrie (Rechteck, parallele Linien) benötigt. Alternativ dazu ist Bildentzerrung mit Koordinaten (Messung der Koordinaten in vorhandener CAD-Zeichnung bzw. skalierte Planvorlage, Import von 3D-Koordinaten tachymetrisch gemessener Punkte) im Programm integriert. Die Bildmontage erlaubt das Zusammenfügen entzerrter Teilbilder zu einem Bildplan. Im Kartierungsprojekt ist die Kombination von Bildern unterschiedlicher Qualität (Auflösung, Maßstab, Graustufen/Farbe) und unterschiedlichem Inhalt (Infrarot-, UV-Fluoreszenz-Aufnahme, historische Fotografien) möglich.

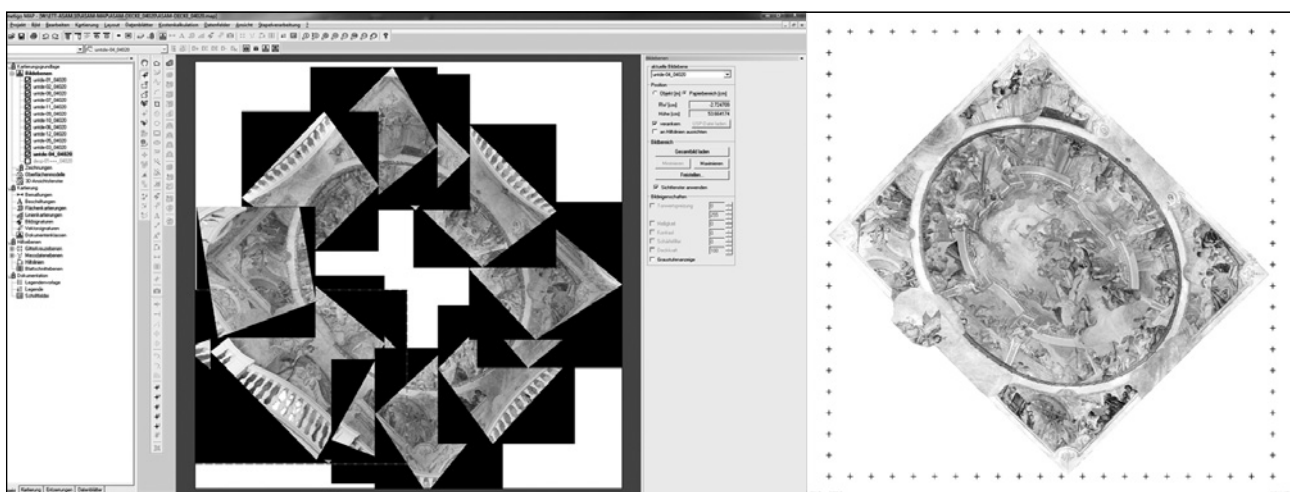


Abb. 1: Bildentzerrung und Montage (links) erlaubt maßstabsgerechte Objektdokumentation, rechts: Bildplan der Decke (Original im Maßstab 1:20, 400 dpi), Mittelteil als Orthoprojektion, Schloss Ettlingen, Asamsaal, fokus GmbH Leipzig, 2011

Historische Pläne können über die Maßstabsleiste mit Hilfe von Skalierungsfunktionen ebenso in das Kartierungsprojekt eingefügt werden.

Mit einer CAD-Schnittstelle (Open Design Alliance) können CAD-Dateien im DWG/DXF-Format importiert und als Kartierungsgrundlage verwendet werden. Importfunktionen unterstützen zudem das Fortsetzen bereits vorhandener CAD-Kartierungen. Abschließend kann die Kartierung als CAD-Datei exportiert werden.

1.2 Aufbau eines Kartierungsprojekts

In einem Kartierungsprojekt können vom Anwender für jedes Kartierungsthema Klassen mit verschiedenen Typen für Flächen- und Linienkartierung, Detailfotos, Vektorsignaturen, Beschriftungen sowie Bemalungen angelegt werden. Für deren Gestaltung steht eine umfangreiche Bibliothek von Schraffuren, Linientypen und Farben zur Verfügung.

Kartierungsklassen können themenbezogen gruppiert werden. Kartierungsgruppen können zudem mit unterschiedlichen Bildern (z. B. historische Bildpläne, Dokumentationen vor und nach der Restaurierung, Infrarot-, UV-Fluoreszenz-Aufnahmen ...) kombiniert werden. Für jede Kartierungsgruppe können Legenden automatisch generiert werden.

Ein bereits fertiges Kartierungsprojekt kann als „Kartierungsvorlage“ für neue Kartierungsprojekte verwendet werden.

Mit Hilfe der GAEB-Schnittstelle ist eine LV-bezogene Kartierung möglich.

1.3 Digitale Kartierung

Im Programm stehen eine Vielzahl von Zeichen- und Konstruktionsbefehlen sowie Objektfangmodi zur Verfügung. Dank verschiedener CAD- und Flächenverschneidewerkzeuge können Konturen benachbarter Flächen miteinander verschnitten und Einschlüsse eingearbeitet werden.

Dadurch ist ein effektives und genaues Kartieren möglich. Da alle kartierten Elemente vektorbasiert vorliegen, ist deren nachträgliche Bearbeitung, der Austausch von Schraffuren und Linientypen sowie die Ausgabe in unterschiedlichen Skalierungen jederzeit möglich.

Auf der Grundlage der maßstabsgerechten Kartierung werden Mengen von Flächen und Linien automatisch berechnet und in nutzerdefinierten Größenklassen sortiert. Damit kann die Massenstatistik aktuell ausgewertet und exportiert werden. Die Statistik kann in der Legende eingeblendet werden (Abb. 3).

Parallel dazu besteht die Möglichkeit für die kartierten Elemente Handaufmasswerte – z. B. mit Tablett PC

vor Ort – zu erfassen und diese für die Massenabrechnung zu verwenden.

Für jede Kartierungsklasse können Datenfelder in unterschiedlichem Umfang angelegt (z. B. für Probenentnahmen, Befunde oder technologische Informationen zur geplanten Restaurierung) und individuell mit Werten belegt werden.

1.4 Objekthierarchie

Mit Hilfe der Objekthierarchie können große Restaurierungsvorhaben mit vielen Kartierungsprojekten verwaltet und umfassend ausgewertet werden. Teilprojekte werden mittels einer zentralen Kartierungsvorlage angeglichen. Die Komplexität einer Objekthierarchie hängt vom jeweiligen Vorhaben ab und kann vom Anwender frei definiert werden.

Im ersten Schritt wird ein Projektbaum mit Kartierungsvorlagen sowie Kartierungsprojekten angelegt. Dabei organisiert die Software die Projekte mit deren Bildern auf der Festplatte. Im nächsten Schritt kann der Anwender Navigationskarten importieren um darauf Links (Flächen, Linien, Signaturen) für die Teilprojekte zu definieren, wodurch eine einfache Navigation ermöglicht wird.

Durch Zuweisen von nutzerdefinierten Projektinformationen, wie z. B. Materialien, Maßnahmen, Verantwortlichkeiten, können Übersichtskarten zu verschiedensten Themen erstellt werden. Hierfür werden die Links der Teilprojekte mit den zuvor zugewiesenen Farben der zugehörigen Dateninhalte eingefärbt (Abb. 4).

Auf die gleiche Weise ist die Anzeige des relativen Anteiles eines Kartierungsthemas oder die absolute Stückzahl einer Maßnahme über alle Kartierungsprojekte möglich.

2 Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte

Die Kartierungssoftware wurde stets in enger Zusammenarbeit mit Anwendern an konkreten Restaurierungsvorhaben weiterentwickelt. Einige der aktuellen Entwicklungsthemen für die neue Version metigo MAP 4.0 werden im Folgenden vorgestellt.

2.1 Automatisierte Detailentzerrung mit Bildmatching

Aufgrund der Ähnlichkeit von Bildern des gleichen Objektes können Korrelationstechniken zum automatisierten Messen identischer Punkte mit Subpixelgenauigkeit angewendet werden. Auf der Grundlage solcher identischen Punkte können Bilder passgenau entzerrt werden.

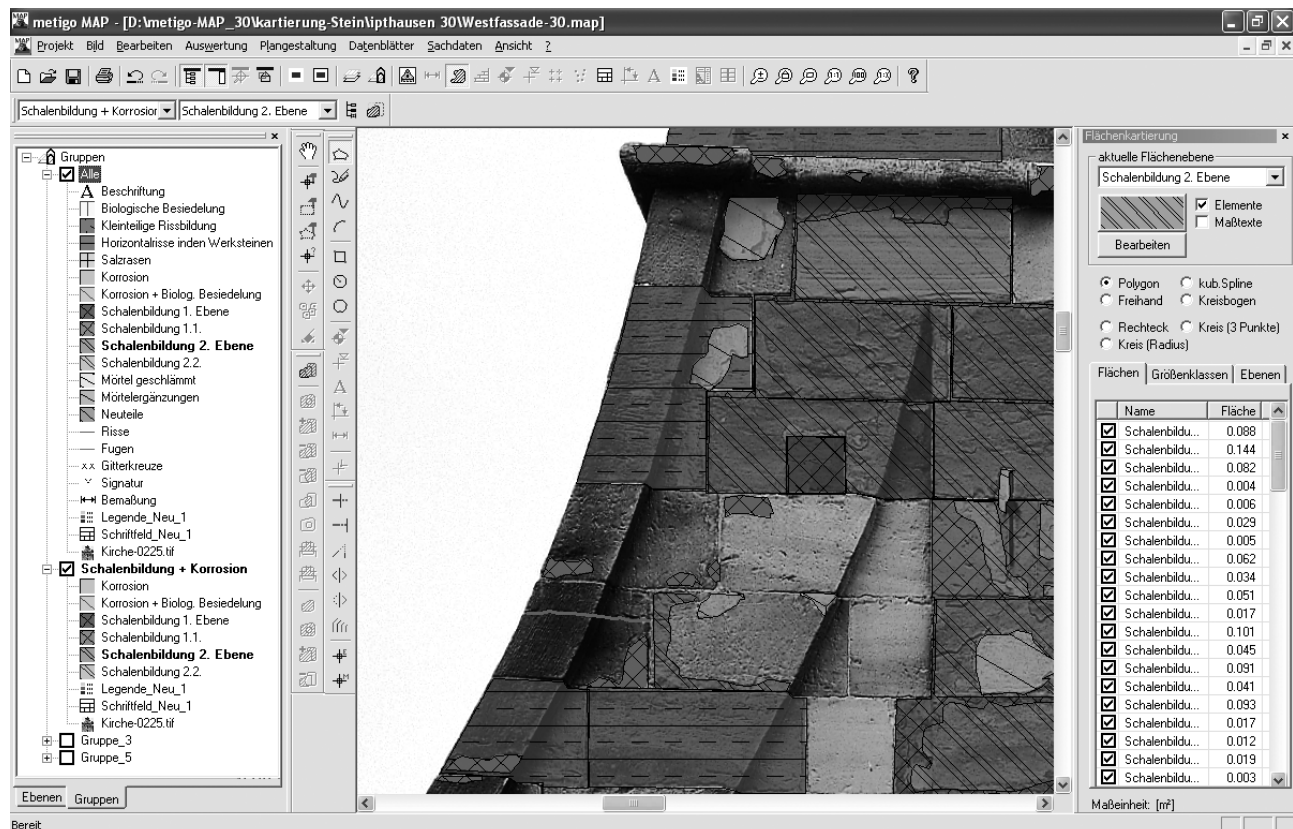


Abb. 2: Kartierungsdetail, Westfassade der Wallfahrtskirche Ipthausen, H. Romstedt, Kirchheim/Thür.

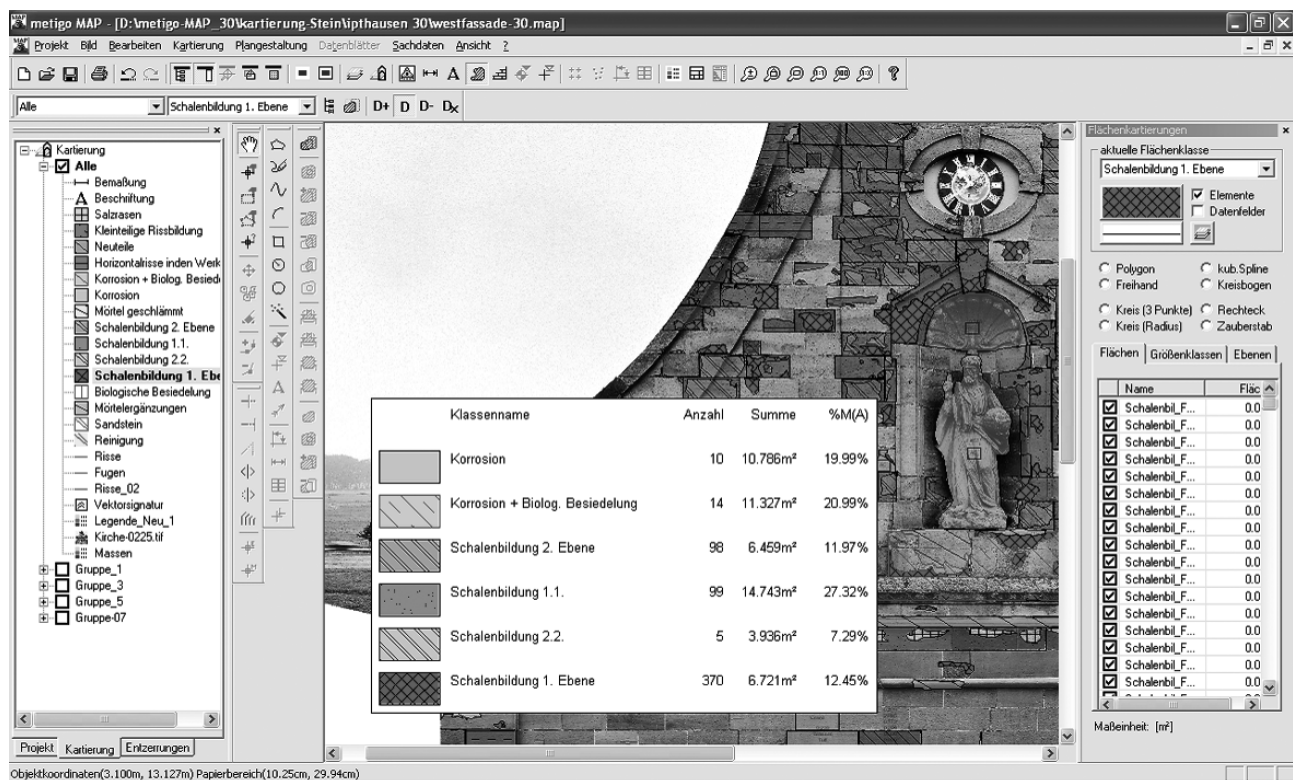


Abb. 3: Kartierungslegende mit aktueller Massenstatistik der Kartierung, Wallfahrtskirche Ipthausen, H. Romstedt, Kirchheim/Thür.

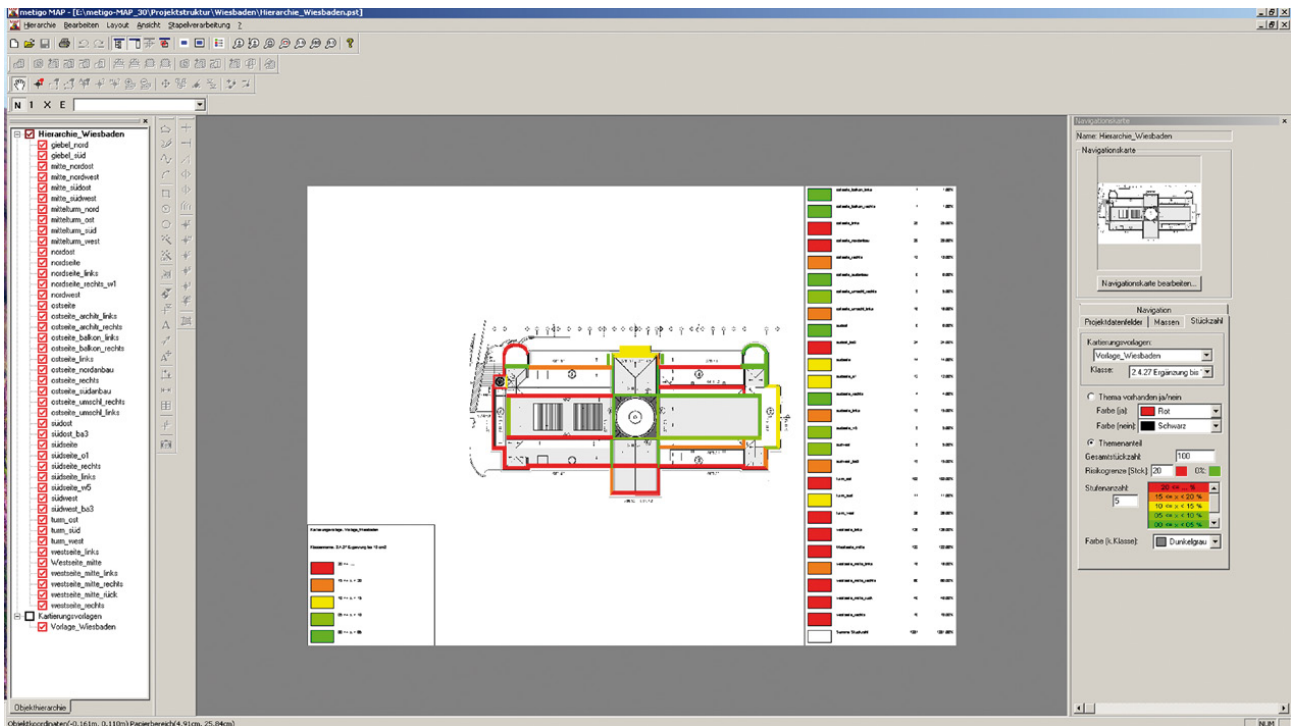


Abb. 4: Navigationskarte der Objekthierarchie mit eingefärbten Linkflächen für die Auswertung nach Stückzahl; Kartierung Kurhaus Wiesbaden, J. Kaminsky, Plauen

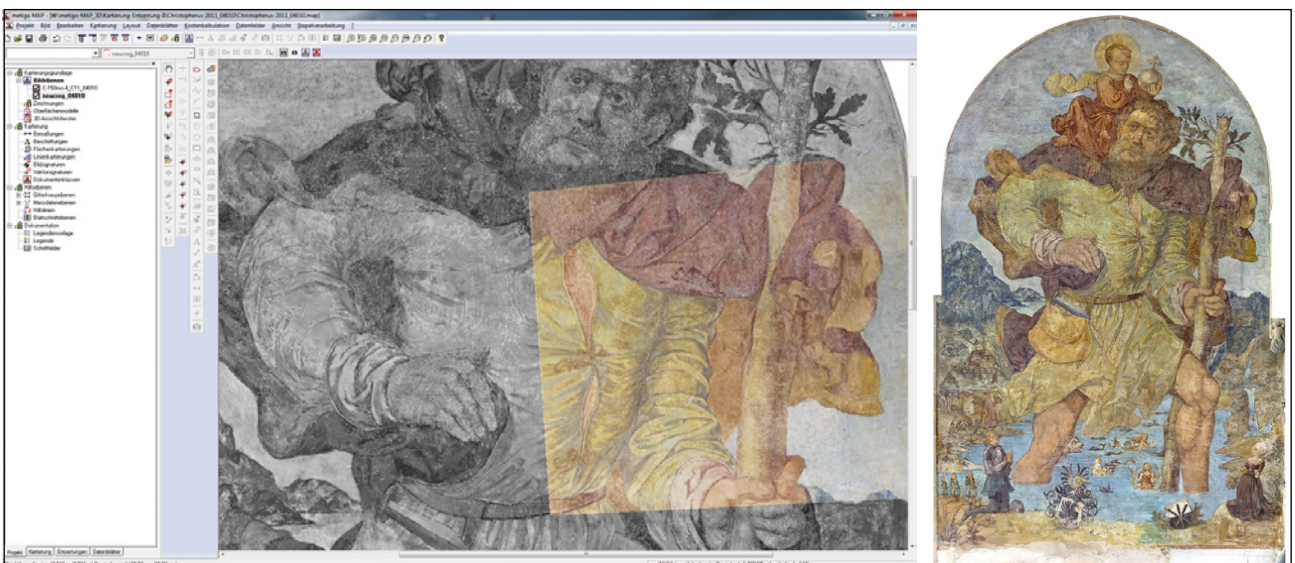


Abb. 5: Detailentzerrung mit Bildmatching; Herrgottskirche Creglingen, Heiliger Christopher, fokus GmbH Leipzig (links: farbiges Detail auf SW-Bildplan; rechts: farbiges Bildplan Original im Maßstab 1:10)

Voraussetzung dafür ist ein bereits vorhandener Bildplan oder ein eigenes maßstabsgerecht entzerrtes Übersichtsbild. Das entzerrte Bild wird dann als Matching-Referenz für die Entzerrung weiterer Detailbilder verwendet. Dafür muss der Anwender auf dem Referenzbild nur den ungefähren Bereich für jedes weitere Detailbild festlegen. Auf der Grundlage einer bereits vorhandenen Dokumentation (z.B. Vorzustand) können so zusätzliche Zwischenstände während der Restaurierungsmaß-

nahme dokumentiert und mit Hilfe von Bildmatching auf das Referenzbild transformiert werden. Damit lassen sich verschiedene Bildpläne vergleichend in einem Kartierungsprojekt auswerten. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist die Entzerrung von Detailbildern hoher Auflösung auf einen vorhandenen Bildplan (Abb. 5). Das Ergebnis ist ein maßstabsgerechtes Detail oder ein komplett neuer Bildplan mit höherer Bildauflösung.

2.2 Automatisierte Auswertung thermografischer Bildsequenzen

Zur berührungslosen Detektion von Hohlstellen an Wandmalereien wird ein Wandbereich gleichmäßig mit Wärmestrahlern erwärmt. Diese Vorgänge der Erwärmung bzw. die anschließende Abkühlung werden mit einer Infrarotkamera als Bildsequenz mit festem Zeitintervall dokumentiert. Die unterschiedliche Wärmeüberleitung zum darunter liegenden Mauerwerk erlaubt Rückschlüsse auf die Ablösung des bildtragenden Putzes vom Mauerwerk [9].

Durch Verwendung von thermografischen Passpunkten wird die automatisierte Bildentzerrung der gesamten Bildsequenz ermöglicht (Abb. 6). Anschließend wird die entzerrte Bildsequenz in das Kartierungsprojekt übernommen und kann so übergreifend ausgewertet werden.

2.3 Modul für Kostenkalkulation

Lange Zeit wurde die erfasste Massenstatistik vom Anwender in Tabellenkalkulationen exportiert, um dort weitere Auswertungen vorzunehmen. Da dieser Prozess sehr vielschichtig ist und im Kartierungsprojekt bereits sehr viele Informationen dafür vorhanden und klar strukturiert sind, war es naheliegend weiterführende Kalkulationsfunktionen zu entwickeln und diese in metigo MAP zu integrieren.

In der Vorbereitung des Kartierungsprojektes kann der Anwender beim Anlegen der Kartierungsklassen zusätzliche Daten für den Arbeitsaufwand und die Materialien berücksichtigen. Dabei kann z. B. der Arbeitsaufwand in verschiedenen Arbeitsschritten und mit Personen unterschiedlicher Qualifikationen beschrieben werden (Abb. 7).

Mit Hilfe der GAEB-Schnittstelle ist die LV-bezogene Kalkulation möglich.

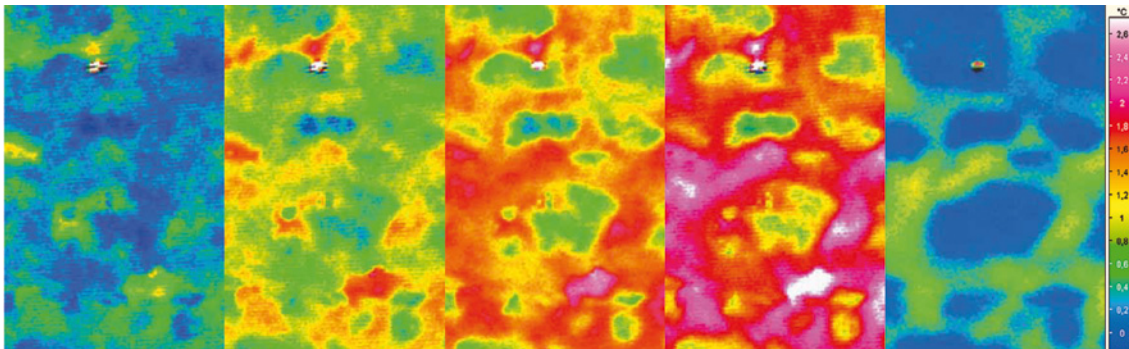


Abb. 6: thermografische Bildsequenz (5 von 132 Aufnahmen) eines Wandfeldes, aufgenommen mit einer Infrarotkamera [9]; Evangelische Kirche Kühren, C. Franzen, IDK Dresden, 2011

Kostenkalkulation Klasse

aktuelle Klasse: 5.5.10 - Vierungen Kalkulationseinheit: m3

Tätigkeit | Material | Gerät | Nachunternehmer

verwendbare Daten

Tätigkeit	Qualifikation
Antragen	Steinmetz
Mauerwerk Ausstemmen m2	Maurer
Reinigung JOS	Facharbeite
Reinigung HD	Facharbeite
Oberflächen mit Chemikalien behandeln	Facharbeite
Loch bohren, Naturstein bis 12mm	Steinmetz
Kompressen aufbringen	Facharbeite
Ziegel ausstemmen	Maurer
Ziegel einmauern	Maurer
Ziegel verfugen Handverfugung zurückklappend	Maurer

zugewiesene Daten

Menge	Tätigkeit	Qualifikation	Preis	Zeiteinheit
2400	Vierun...	Steinmetz	0.60	min
2400	Vierun...	Steinmetz	0.60	min
2400	Vierun...	Steinmetz	0.50	min

Kalkulationsmenge

GAEB-Import: 2.20 kartiert: 0.722113 individuell: 2.00

Preise der Klasse

	pro Einheit	mit Zuschlag	GAEB-Import	mit Zuschlag	Kartierung	mit Zuschlag	GAEB-Export	mit Zuschlag
Tätigkeiten	4080.00 €	4202.40 €	8976.00 €	9245.28 €	2946.27 €	3034.64 €	8160.00 €	8404.80 €
Materialien	1420.34 €	1784.80 €	3124.75 €	3926.56 €	1025.72 €	1288.90 €	2840.68 €	3569.60 €
Geräte	13.00 €	13.39 €	28.60 €	29.46 €	9.45 €	9.74 €	26.00 €	26.78 €
Nachunternehmer	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €	0.00 €
Summe	5513.34 €	6000.59 €	12129.35 €	13201.30 €	3981.44 €	4333.28 €	11026.68 €	12001.18 €

Abb. 7: verschiedene Berechnungsvarianten (eingefärbte Tabelle) für ein Kartierungsthema

Mit unterschiedlichen Kosten für Material und Arbeitszeit können verschiedene Varianten berechnet und gegenübergestellt werden. Mit Hilfe dieses Werkzeugs kann der Anwender die Restaurierungsmaßnahme effektiver vorbereiten, kontrollieren und abrechnen.

Diese Kalkulationsfunktionen sind in einem separaten Modul zusammengefasst und können optional für metigo MAP erworben werden.

2.4 3D-Kartierung

Ab Version 4.0 der Kartierungssoftware können 3D-Oberflächenmodelle (STL, VRML, SHP) als Kartierungsgrundlage importiert werden. Diese Oberflächenmodelle können mit 3D-Scansystemen oder photogrammetrischen Anwendungen mit automatischem Bildmatching wie metigo 3D erstellt werden. Diese liefern die Grundlage für die maßstabsgerechte Kartierung auf der Objektoberfläche.

Für die maßstabsgerechte 2D-Ausgabe kann der Anwender verschiedene Ansichten mit Orthogonalprojektion der Objektoberfläche anlegen (Abb. 8).

Wie bei vielen Technologien, die für metigo MAP entwickelt und darin integriert worden sind, wurden hier die Grundlagen für neue Arbeitstechniken geschaffen um diese dann gemeinsam mit den Anwendern an konkreten Projekten weiterentwickeln zu können.

3 Automatisierte 3D-Objektdokumentation

Vor der Integration der 3D-Kartierung in metigo MAP, stand in den Jahren 2010–2012 die Weiterentwicklung der Software metigo 3D, die es ermöglichte, mit einfachen Mitteln 3D-Oberflächenmodelle alternativ zu kostenintensiven Scansystemen zu generieren. Das Ergebnis ist eine 3D-Auswertesoftware, in der auf der Grundlage von Stereobildpaaren photogrammetrische Messtechniken mit Funktionen der digitalen Bildanalyse kombiniert werden.

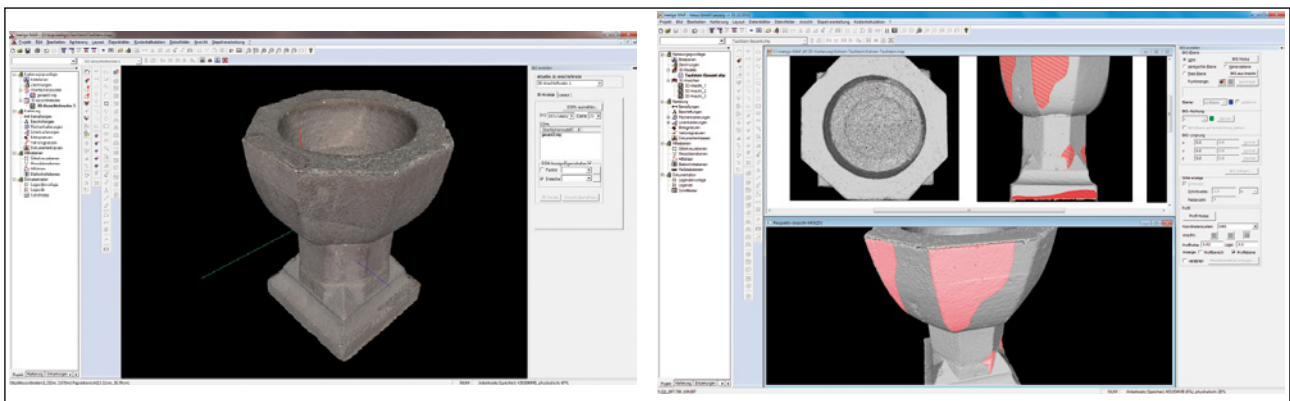


Abb. 8: Kartierungsprojekt mit perspektiver Ansicht auf 3D-Oberflächenmodell (links) und orthogonaler Projektion (rechts); Taufstein in evangelischer Kirche Kühren, fokus GmbH Leipzig



Abb. 9: Aufnahmeschiene für Stereomodelle mit definierter Basis (links); Bildaufnahme von Hand (rechts)

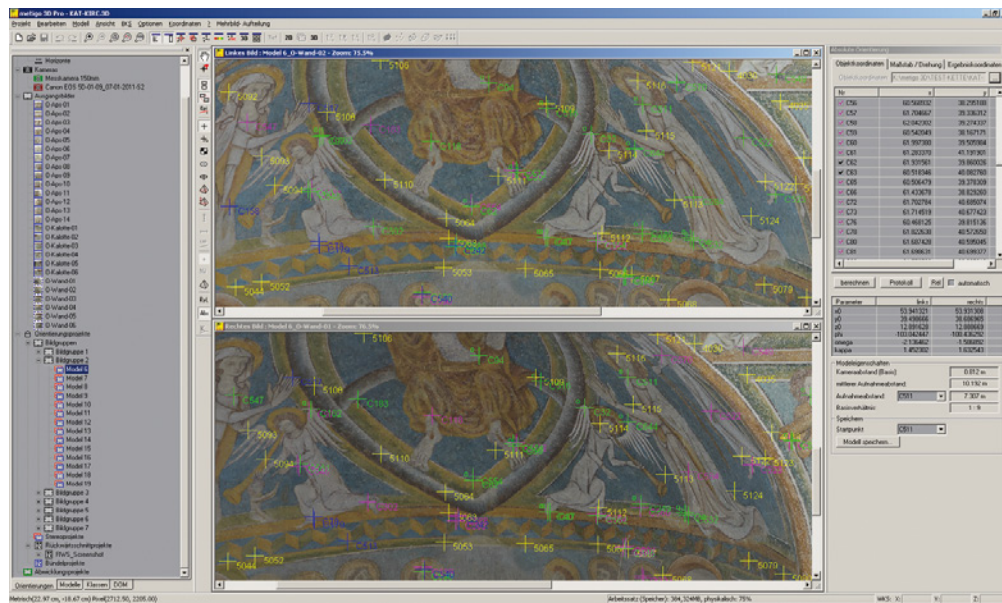


Abb. 10:
orientiertes Stereo-
modell (farbige
Bildkoordinaten mit
unterschiedlichen Sta-
ti); Burg Katzenstein,
fokus GmbH Leipzig

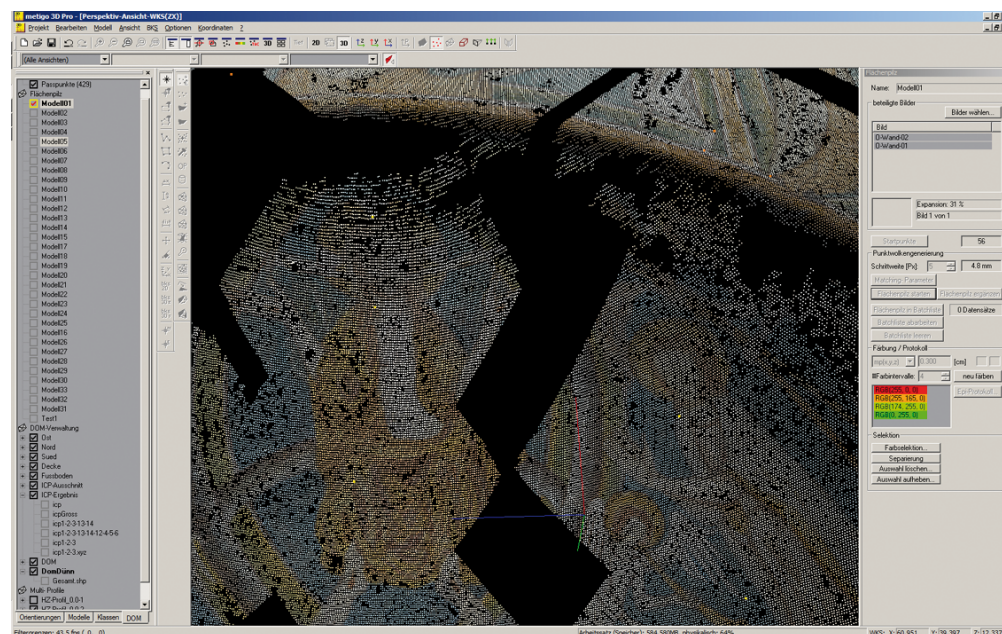


Abb. 11:
Berechnung von
3D-Koordinaten im
Stereo-Modell mittels
Matching; Burg Kat-
zenstein, fokus GmbH
Leipzig

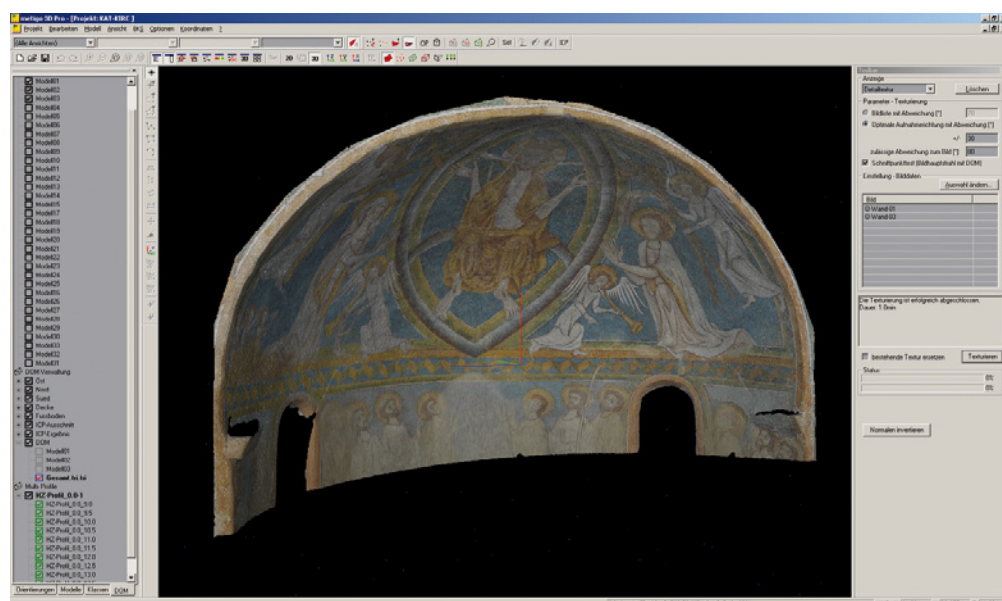


Abb. 12:
3D-Oberflächenmodell
mit Bildtextur; Burg
Katzenstein, fokus
GmbH Leipzig

3.1 Bildaufnahme

Mit einer DSLR-Kamera (Vollformatsensor) kann ein Objekt allein auf der Grundlage von Stereobildpaaren dreidimensional dokumentiert werden. Die verwendeten Kameras/Objektive sollten vorher für eine höhere Auswertegenauigkeit photogrammetrisch kalibriert werden.

Die Bilder können aus der Hand aufgenommen werden. Durch die Verwendung einer Aufnahmeschiene mit zwei fest montierten Kameras auf einem Stativ können Arbeitsablauf und Auswertegenauigkeit verbessert werden (Abb. 9).

Für den Maßstab müssen Strecken am Objekt oder zwischen beiden Kameras gemessen werden. Bei Architekturprojekten empfiehlt sich die tachymetrische Messung von 3D-Passpunkten am Objekt. Durch Bildmaßstab und Bildqualität kann der Anwender objektabhängig die Genauigkeit der Auswertung beeinflussen.

Eine weitere Möglichkeit für kleinere Objekte ist die Verwendung eines Drehtellers und die Aufnahme einzelner Bilder in geeigneter Schrittweite.

3.2 Automatisierte Modellzuordnung und -orientierung

Nach dem Anlegen eines Projektes werden in der Software die Auswertegenauigkeit und Auflösung definiert und die Bilder in das Projekt geladen. Die innere Orientierung für jedes Bild wird durch die Verknüpfung zur jeweiligen Kamera hergestellt.

Verknüpfungspunkte werden durch die Auswertesoftware automatisch im Bildverband gesucht (identische Punkte am Objekt). Die Berechnung der Orientierung der beiden Stereobilder erfolgt unter Einbeziehung der gemessenen Strecken oder Passpunkte auf der Grundlage der gefundenen Punkte (Abb. 10).

3.3 Automatisierte Generierung von Punktwolken

Aufgrund der Ähnlichkeit der Bilder eines Stereomodells können Korrelationstechniken zum automatisierten Messen identischer Punkte mit Subpixelgenauigkeit angewendet werden. Die Objektoberfläche im Stereomodell kann mit einem angepassten Expansions- und Matching-Algorithmus automatisch „gescannt“ werden (Abb. 11).

Unter Berücksichtigung der Auswertegenauigkeit wird für jedes Stereomodell in Abhängigkeit des jeweiligen Bildmaßstabs die Schrittweite (Punktabstand) bestimmt und angewendet. Mit Hilfe einer Stapelverarbeitung können alle Stereomodelle im Batchbetrieb „gescannt“ werden.

3.4 Automatisierte Auswertung eines Oberflächenmodells

Mit einem Triangulationsalgorithmus [6] wird auf der Grundlage der Punktwolke ein digitales Oberflächenmodell berechnet, das im zweiten Schritt mit den für die Punktwolkengenerierung verwendeten Bildern texturiert werden kann (Abb. 12). Somit ist eine dreidimensionale Dokumentation der Objektoberfläche in hoher fotografischer Qualität möglich.

3.5 Abwicklung/digitale Orthoprojektion

Zur Projektion der Bilder auf eine Ebene oder Abwicklungsgeometrie können mit Hilfe einer Punktauswahl (ausgleichende Ebene) oder von tachymetrisch gemessenen Passpunkten Benutzerkoordinatensysteme im übergeordneten Koordinatensystem angelegt werden.

Die Orthoprojektion erfolgt nach Eingabe von Maßstab und Auflösung auf der Grundlage der Projektionsgeometrie, der orientierten Bilder sowie dem Oberflächenmodell.

Bei der Abwicklung gekrümmter Oberflächen (Abb. 13, 14) können über das Oberflächenmodell lokale Deformationen oder Abweichung von der Projektionsgeometrie bei mehrfach gekrümmten Oberflächen „berücksichtigt“ werden.

3.6 Deformationsanalyse

Mit Hilfe von Benutzerkoordinatensystemen können nicht nur die texturierten Oberflächenmodelle sondern auch Deformationen bezogen auf eine Ebene analysiert werden (Abb. 15).

Solche Deformationsanalysen (farbcodierte Orthophotos) können auch als 2D-Kartierungsgrundlage für die maßstabsgerechte und deckungsgleiche Auswertung in der Kartierungssoftware metigo MAP verwendet werden.

4 Technische Informationen

Die Kartierungssoftware metigo MAP wird seit 2000 von der fokus GmbH Leipzig entwickelt und vertrieben. Inzwischen sind über 600 Lizenzen verkauft und sie wird an über 20 Hochschuleinrichtungen in der Restaurierungsausbildung eingesetzt.

Die Software ist in den Sprachen deutsch, englisch, französisch, spanisch und polnisch erhältlich.

Die Kartierungssoftware ist ab Version 4.0 als 32-Bit und 64-Bit Version erhältlich, nutzt Mehrkernprozessoren und kann auf MAC Rechnern unter Verwendung von Parallels® oder VMware Fusion® eingesetzt werden.

Die beschriebenen Funktionen für automatisierte Generierung von 3D-Oberflächenmodellen sind in der Software metigo 3D integriert.

Beide Programme sind eigenständige Anwendungen, so dass keine weitere Software für deren Einsatz notwendig ist.

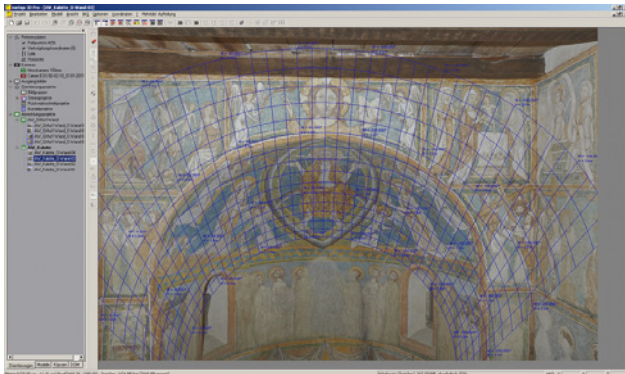


Abb. 13: links: orientiertes Bild der Kalotte mit Projektion des Zylinders; rechts: abgewickelter Bildplan der Kalotte (Orthogonale Projektion auf den Zylinder); Burg Katzenstein, fokus GmbH Leipzig

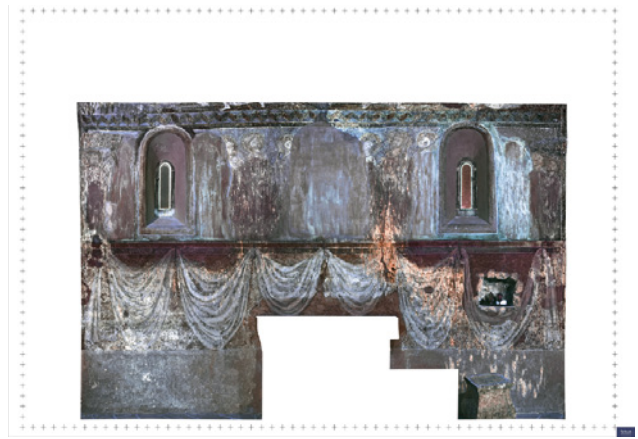
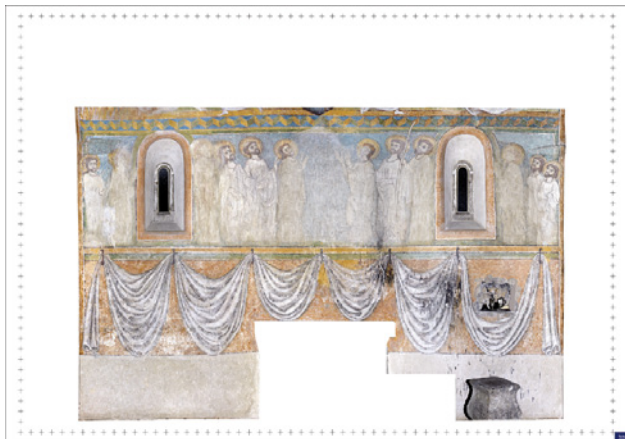


Abb. 14: deckungsgleiche abgewickelte Bildpläne der Apsis mit Orthoprojektion auf Zylinder; links: Farbaufnahme; rechts: UV-Fluoreszenz-Aufnahme (Original im Maßstab 1:10, 400 dpi); Burg Katzenstein, fokus GmbH Leipzig

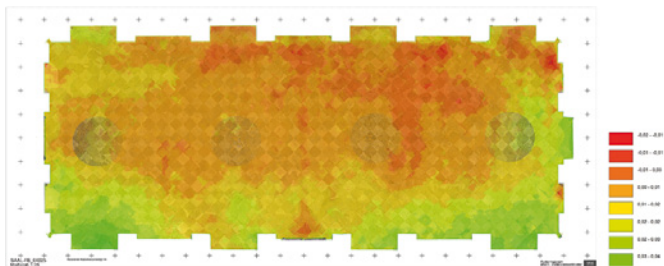
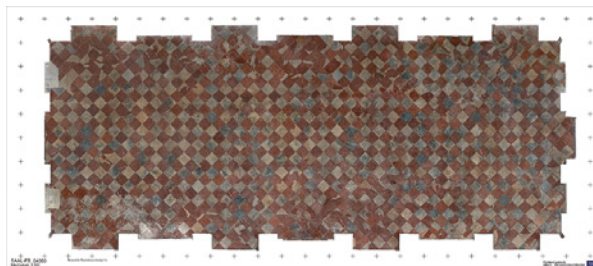


Abb. 15: deckungsgleicher Bildplan und farbcodierte Deformationsanalyse eines Fußbodens; links: digitaler Bildplan bearbeitet in metigo MAP (Original im Maßstab 1:10, 400 dpi); rechts: Deformationsanalyse auf der Grundlage einer Punktwolke (3D-Laserscanner); Kloster Raitenhaslach, Steinerner Saal, fokus GmbH Leipzig, 2012

Literatur

- [1] R. Godding, G. Sacher, G. Siedler, Einsatz von digitalen Aufnahmesystemen zur Gewinnung von Multispektralaufnahmen für die Erkundung von Bauwerkschäden, ISPRS Commission V, S. 794–798, New York 1992
- [2] Gruen, A., 1996. Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: K. Atkinson (ed.), Close Range Photogrammetry & Machine Vision, Whittles, pp. 217–255.
- [3] Hemmleb, M., Siedler, G., Sacher, G., Digitale Bildentzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in der Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung (963 KB) Von Handaufmaß bis High Tech, Interdisziplinäres Kolloquium, TU Cottbus, 23.–26. Februar 2000 (S. 74–82)
- [4] Hemmleb M., Siedler G., Sacher G.: Documentation of the basilica of maxentius in rome – methods for providing foundations for monument research, CIPA International Symposium, Potsdam, 2001
- [5] Hastedt, H., Luhmann, T., Tecklenburg, W.: Modellierung hochauflösender digitaler Kameras im Hinblick auf ihre Verifizierung nach VDI/VDE 2634. Luhmann (ed.): Photogrammetrie, Laser-scanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2004
- [6] Vetter, S.: Generierung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) im Bereich der Architekturphotogrammetrie, Diplomarbeit (unveröffentlicht), HTWK Leipzig, 2005
- [7] Henze, F., Siedler, G., Vetter, S., 2006: Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem, 26. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Berlin, Band 15, S.239–246
- [8] Heinrich, M.: Markante Punkte und 3D- Objekten in einem Oberflächenmodell; Diplomarbeit, HTWK Leipzig, 2010
- [9] Franzen, C.: New developments in IR-investigation of cultural heritage, PROCOPE-workshop: Etude par thermographie infrarouge stimulée des variations de diffusivité des biens culturels avec la profondeur, July 6th, 2012, Marseille, 2012

Abbildungen

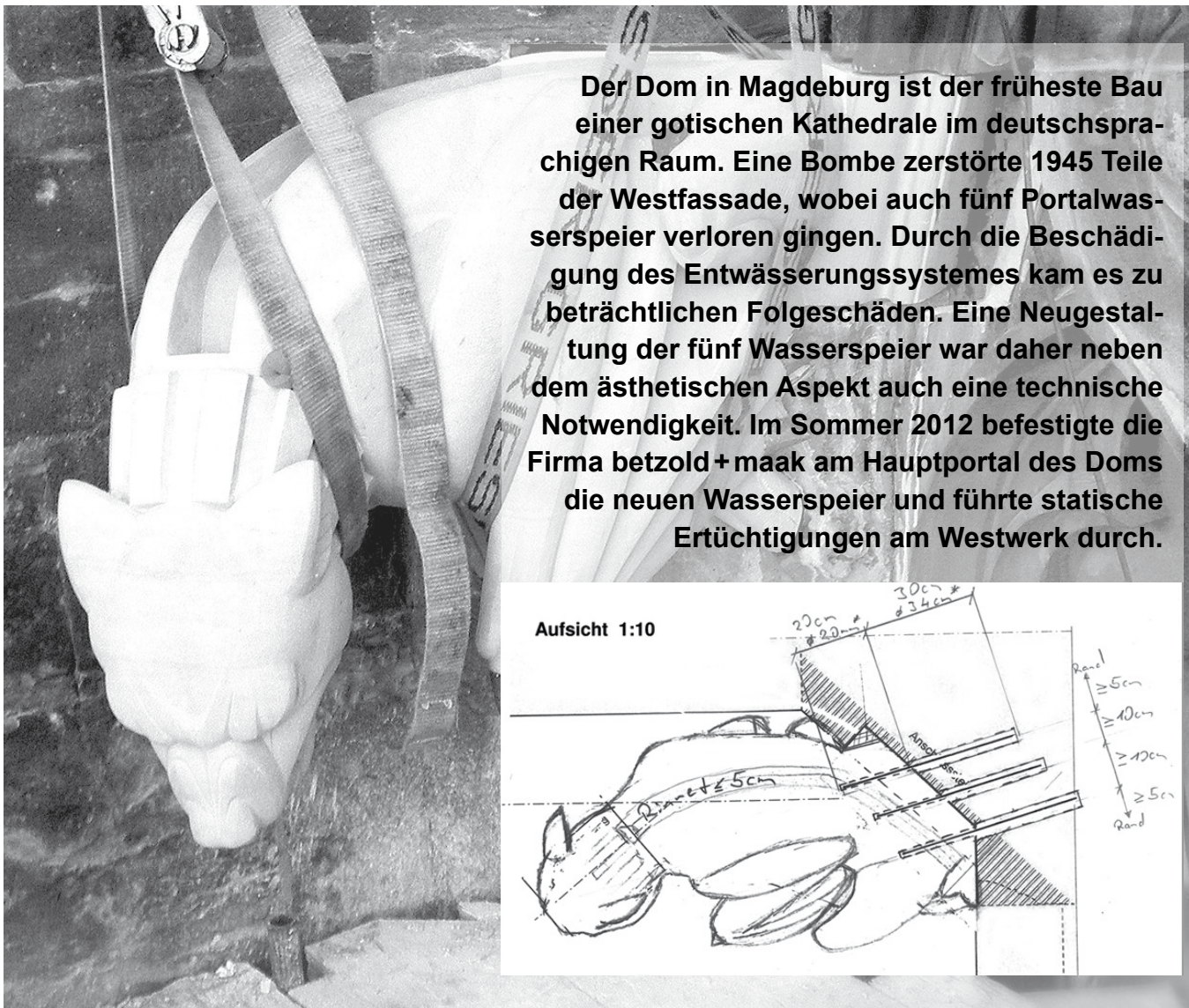
Alle Abbildungen sind von den Autoren
Kartierung Titelblatt: Wallfahrtskirche Ipthausen,
H. Romstedt

Magdeburger Dom

Statische Ertüchtigungen am Westwerk

Spezialverankerung der Hauptportal-Wasserspeier

von Ronald Betzold



1 Baugeschichte – Auszüge

1.1 Die Türme des Magdeburger Domes

Der Magdeburger Dom ist der erste Dom in Deutschland, der im Stile der Gotik nach einem französisch-gotischen Kathedralschema erbaut wurde. Der Bau wurde 1209 begonnen, nachdem die ottonische Vorgängerkirche zwei Jahre zuvor einem Brand zum Opfer fiel. Der Dom gilt damit als die früheste gotische Kathedrale in Deutschland. Die Bauarbeiten dauerten mit Unterbrechungen über 300 Jahre an. Im Gegensatz zu vielen anderen deutschen und europäischen Kathedralen, deren Turmfassaden nie oder erst in der Neuzeit des 19. und 20. Jahrhunderts vollendet wurden (Dom in Regensburg: 1869, Kölner Dom: 1880, Münster in Ulm: 1890, Dom in Meißen: 1909, Veitsdom Prag: 1929) grüßen die Magdeburger Domtürme nunmehr seit fast 500 Jahren weit in das Land hinein. Die Maße des Bauwerks beeindrucken: Mit 120 Metern Gesamtlänge, knapp 33 Metern Innenhöhe des Mittelschiffs und einer Turmhöhe von etwa 105 Metern gehört der Magdeburger Dom zu den größten mittelalterlichen Kathedralbauten. Die imposante Westfassade ist als Doppelturmfassade ausgebildet. Äußerlich gleich aussehend unterscheiden sich die beiden Türme der Westfassade jedoch: Der Nordturm ist massiver ausgeführt. Er trägt die Glocken und seine Spitze wird von der gewaltigen steinernen Kreuzblume bekrönt. Der Magdeburger Dom steht nicht, wie häufig angenommen wird, komplett auf dem sogenannten Domfelsen, der bis in die Elbe hineinragt, sondern zu einem gewissen Teil auf einer Grünsandschicht, die bei hoher Belastung zu fließen beginnt. Als um 1500 am Nordturm weitergebaut wurde, traten die Schwierigkeiten zu Tage. Der Turm drehte sich um einige Zentimeter und die Verankerungen zum Mittelteil lösten sich. Die Baumeister versuchten dem Einhalt zu gebieten, indem sie den entstandenen Riss mit besonders großen querliegenden Bindersteinen überbrückten. Das ist jetzt an der Nahtstelle zwischen Turm und Mittelbau zu erkennen. Die Bewegung des Bauwerks hält bis heute an. Der Südturm wurde deshalb vermutlich durch die geringere Wandstärke leichter ausgeführt und trägt keine Glocken.

1.2 Preußen und Schinkel

Als Glücksfall erwies sich der Besuch des preußischen Königs Friedrich Wilhelm III im September 1825. Als dieser den Dom besuchte und seinen beklagenswerten Zustand sah, bewilligte er spontan 60.000 Reichstaler aus seiner Privatschatulle für dessen Wiederherstellung. Die bis dahin nicht finanzierbare, durch eine bereits vorliegende Kostenschät-

zung auf 204.000 Reichstaler veranschlagte Restaurierung, konnte nun in Auftrag gegeben werden. Ihre konkrete Durchführung gestaltete der preußische Architekt Karl Friedrich Schinkel.

1.3 Zweiter Weltkrieg

Der letzte schwere Einbruch in die Bausubstanz des Domes erfolgte im Zweiten Weltkrieg. Erste Wunden brachte der Bombenangriff vom 12. September 1944 mit sich. Am 16. Januar 1945, an dem die Magdeburger Altstadt zu 92 % zerstört wurde, erlitt auch der Dom seine schwersten Schäden in Form von mehreren Sprengbomben-Treffern in die Seitenschiffe. Am 2. März 1945 setzten alliierte Bomber noch einen einzelnen gezielten Treffer ab, der die Westfassade durchschlug und die große Orgel zerstörte (Abb. 1, 2).

2 Schadbild am Südturm

Am Südturm gibt es im Gegensatz zum Nordturm eine überraschend hohe Anzahl von Einzelrissen sowie ganze Rissssysteme an den Ecken, vor allem an der Süd-West-Ecke und der Süd-Ost-Ecke (Abb. 11). Die großen Einzelrisse in den Flächen der Fassaden



Abb. 1: Bombentreffer, Westfassade

verlaufen teilweise über die gesamte Mauerstärke. Zwei ausgedehnte flächenhafte Ausbauchstellen befinden sich in ca. 30 m Höhe, direkt unterhalb des Umganges (Abb. 10).

3 Ausgeführte Arbeiten

Unsere Leistungen zur Instandsetzung des Südturm-mauerwerkes beinhalteten Injektions- und Vernadelungsarbeiten sowie den Einbau von Gewebestrumpfkern. Durch diese Maßnahmen wurde angestrebt, eine Ausweitung der Rissbildungen sowie eine Verstärkung der Ausbauchungen zu verhindern. Die ausgewölbten Teile der Außenschale in den Bereichen unterhalb des Umganges wurden konstruktiv wieder an das Kernmauerwerk angebunden. Am Hauptportal des Westwerkes erfolgte die Befestigung von vier modern gestalteten Wasserspeiern. Die Tragwerksplanung wurde durch das Büro HAZ Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH aus Kassel erbracht. Herr Peter Hegewaldt leitete die statisch konstruktiven Sicherungsarbeiten sowie die Befestigung der Wasserspeier. Die Restaurierungsplanung oblag Herrn Martin Pomm von der Pro Denkmal GmbH Bamberg-Berlin (Abb. 9).

3.1 Statische Ertüchtigungen am Westwerk – Instandsetzung des Südturm-Mauerwerkes

Der Dom zu Magdeburg steht unter Denkmalschutz, alle Maßnahmen waren so auszuführen, dass am Bestand und an den angrenzenden Flächen Verschmutzungen, Schäden und unbeabsichtigte Veränderungen des Erscheinungsbildes ausgeschlossen wurden. Es waren Maßnahmen zum Schutz angrenzender Bauteile, z.B. Abdeckungen des Bauschmucks gegen Verschmutzung oder mechanische Beschädigung, während der Ausführung zu erbringen. Alle Leistungen wurden mit staubarmen Arbeitsverfahren und -geräten ausgeführt. Schnellaufende und trocken arbeitende Geräte ohne Absaugung wurden nicht verwendet. Es wurden zusätzliche Absaugungen gegen Verschmutzungen durch Feinstaub eingesetzt. Erhöhte Anforderungen bestanden an den Erschütterungs- und Schwingungsschutz. Es wurden ausschließlich erschütterungsarme Bohrverfahren angewendet. Im Vorfeld der Sicherungsarbeiten wurde mittels Endoskopie (Abb. 3) ein relativ dichtes Gefüge des Turmmauerwerkes nachgewiesen. Eine Kapselung des Verbundmörtels im Gewebestrumpf war daher nur zur Überbrückung von Spalten sowie zur Begrenzung des Durchtritts bei kleinen Klüften



Abb. 2: Gesamtansicht des Dom, Instandsetzungsarbeiten 1954

Profil

Südseite vergleichsweise dichtes Gefüge

Gerüstlage 31,
unter Altane,
über Fenster,
im Rissbereich

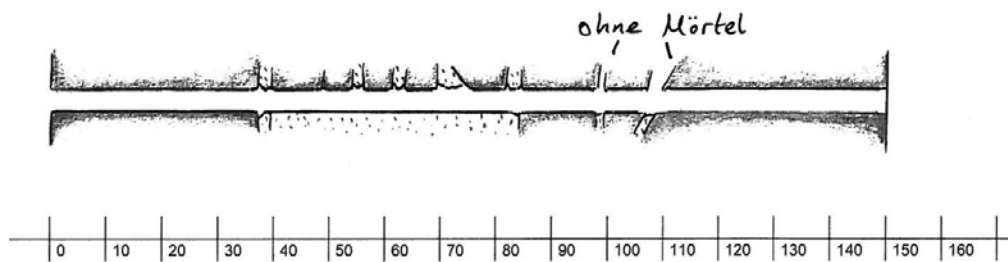


Abb. 3: Endoskopie Bohrkanal

Bohrloch

normalerweise doppelter
Ankerdurchmesser

Ankerkörper

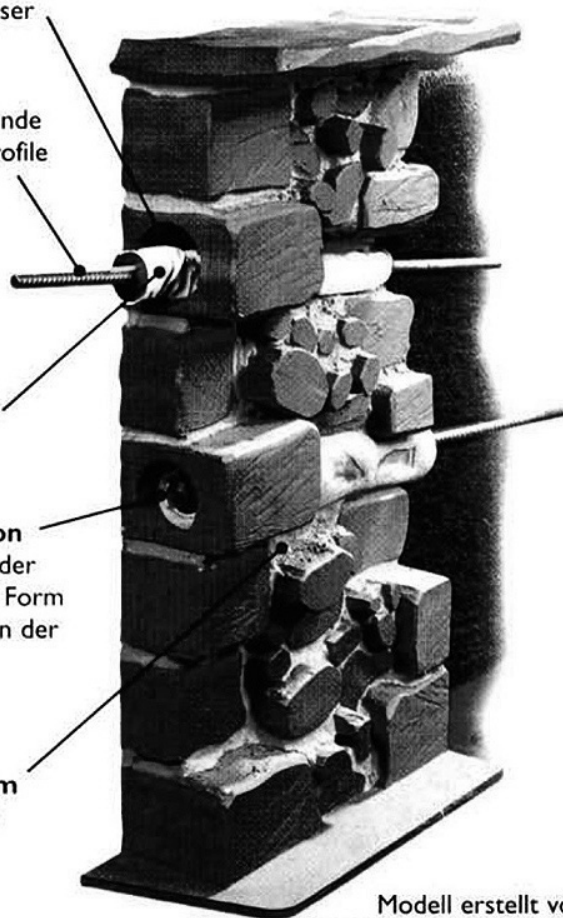
quadratische, runde
Hohloder Vollprofile
erhältlich

Gewebehülle

Mörtelinjektion

dabei paßt sich der
Anker in seiner Form
den Hohlräumen der
Umgebung an

Untergrund im Wandinneren



Modell erstellt von
WT Fixings & Combi-tec

Abb. 4: Wirkungsprinzip des Gewebestrumpfankers

erforderlich. Im Regelfall führt die optimale werkseitige Abstimmung der Gewebestrumpf- und Verbundmörtelkomponente zum angestrebten Scherverbund zwischen Anker und Bohrkanal (Abb. 4, 5). Das Anpressen des Gewebestrumpfes aus hoch reißfestem Geotextil sowie die Benetzung der Strumpfoberfläche waren auf jeden Fall erforderlich. Abhängig vom, speziell am Dom in Magdeburg, anspruchsvollen Verhältnis zwischen Verankerungslänge und -durchmesser erfolgte die Erstellung von zwei Arbeitsproben durch freies Aufpumpen des Strumpfkankers sowie durch eine Verpressung im Kunststoffrohr (HT-Rohr).

Muster 1 – Verfüllung mit äußerer Begrenzung (HT-Rohr, Abb. 6)

Damit wurde das Zusammenwirken der Einzelkomponenten im (nichtsaugenden) Stein nachgebildet. Ein „Ausschalen“ erfolgte nach 2 Tagen. Der Trennschnitt durch das Muster bestätigte die zentrische Lage des Stahlzuggliedes und die vollständige Verpressung des Strumpfes. Eine Optimierung des Systems wurde

durch die direkte Anbindung des Verfüllrohres an den Zugstab erreicht (Abb. 8). Die vorherige dezentrale Lage des Verfüllrohres bedingte durch eine partielle Abschirmung eine streckenweise Nichtbenetzung des Gewebestrumpfes. Dies hatte zur Folge, dass hier lediglich ein Reibungsverbund vorlag.

Muster 2 – Verfüllung ohne äußere Begrenzung (freies Aufpumpen, Abb. 7)

Hierbei wurde das Zusammenwirken der Einzelkomponenten in einer Kluft/Spalte nachgestellt. Eine geringe Menge Wasser und Zementleim durchflossen erwartungsgemäß den aufgeblähten Strumpf. Basierend auf den endoskopischen Untersuchungen konnte eine eventuelle unkontrollierte Ausbreitung des Verpressgutes ausgeschlossen werden. Der beobachtete Bindemitteldurchfluss wurde auch aufgrund der nachgewiesenen chemischen Verträglichkeit toleriert. Der begrenzte Durchfluss garantierte andererseits einen besseren mineralischen Verbund zur Bohrlochwand.



Abb. 5: aufgeblähter Gewebestrumpf (Bauvorhaben Ilmenau, historisches Amtshaus)



Abb. 6: Muster 1 – Gewebestrumpf im HT-Rohr ausgeschalt



Abb. 7: Muster 2 – Gewebestrumpf frei aufgepumpt

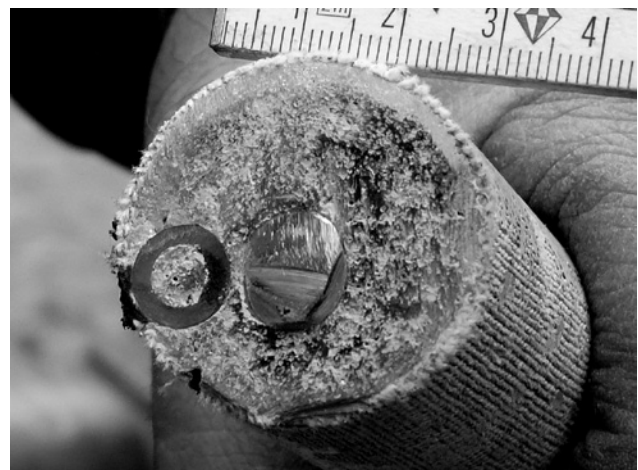


Abb. 8: Gewebestrumpf mit Zugstab und Verfüllrohr


			
MDOM_3516_A_O+S_a			
BAUVORHABEN		Dom zu Magdeburg Sanierung des Westwerks Zuw.-Nr. 66	
BAUHERR		Am Schloss 4 39279 Leitzkau (Gommern) Tel.: 039241 / 934-0 Fax: 039241 / 934-34 Leitzkau@dom-schloesser.de www.dom-schloesser.de	
GENERALPLANER		 Dr. Krekeler Generalplaner GmbH ARCHITEKTEN UND GENERALPLANER IN DER DENKMALPFLEGE Domlinden 28 14776 Brandenburg Tel.: 03381 / 5235-0 Fax: 03381 / 5235-44 info@krekeler-architekten.de www.krekeler-architekten.de	
In Zusammenarbeit mit		 ProDenkmal Krausnickstr. 23 10115 Berlin Tel.: 030 / 280930-0 Fax: 030 / 280930-28 www.prodenkmal.de	
		 HAZ Tragwerksplanung Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH Kölnische Strasse 59 34117 Kassel Neue Kasseler Str. 3 1/2 34348 Hann. Münden Tel.: 0561 / 701 13-0 Tel.: 0561 / 68 21 93 Tel.: 05541 / 701 76 87 www.hazingeniure.de e-mail: office@hazingeniure.de	
PLANINHALT		Maßnahmenplanung Ebene 0 - Ebene 15 Südturm (O) Ostansicht & (S) Südansicht Plangrundlage: Steffen Marold Gebäudevermessung & Photogrammetrie	
Maßstab :	Blattgröße :	Freigabe Bauh.	Freigabe Arch. :
1 : 50 / 250	118.9 / 84.1		
Gezeichnet :	Datum :	Projektnr. :	Plannr. :
J.Fraatz	13.02.2012	G 09072	MDOM_3516_A_O+S
			Index/Dat.: a
			21.03.2012
Datei : \Planung\Maßnahmenpläne\Dicad\MDOM_3516_A_O+S.kon			

Abb. 9:
Bauherr/Projektbeteiligte

Einbringen der Gewebestrumpfanker

Das Einbringen der Gewebestrumpfanker im dreischaligen Bestandsmauerwerk (Quadermauerwerk – Kernmauerwerk – Quadermauerwerk) mit örtlich begrenzten Aufwölbungen in der äußeren Schale diente der Anbindung von hohl liegenden Mauerwerksschalen an das Kernmauerwerk.

Das System der Gewebestrumpfanker bestand aus folgenden Komponenten:

- Zugstab: Edelstahlrohr der Korrosionswiderstandsklasse III, Durchmesser 13,7 × 3,2 mm
- Gewebestrumpf: wasserundurchlässiges, dehnfähiges Polyestergewebe, das sich beim Injizieren aufblähte. Dehnfähigkeit in Längsrichtung ca. 90 % in Querrichtung ca. 140 %. Die Maschenweite und -dehnung musste auf die Sieblinie des Mörtels abgestimmt sein. Durch dieses System wurde eine unkontrollierte Ausbreitung des Verpressgu-

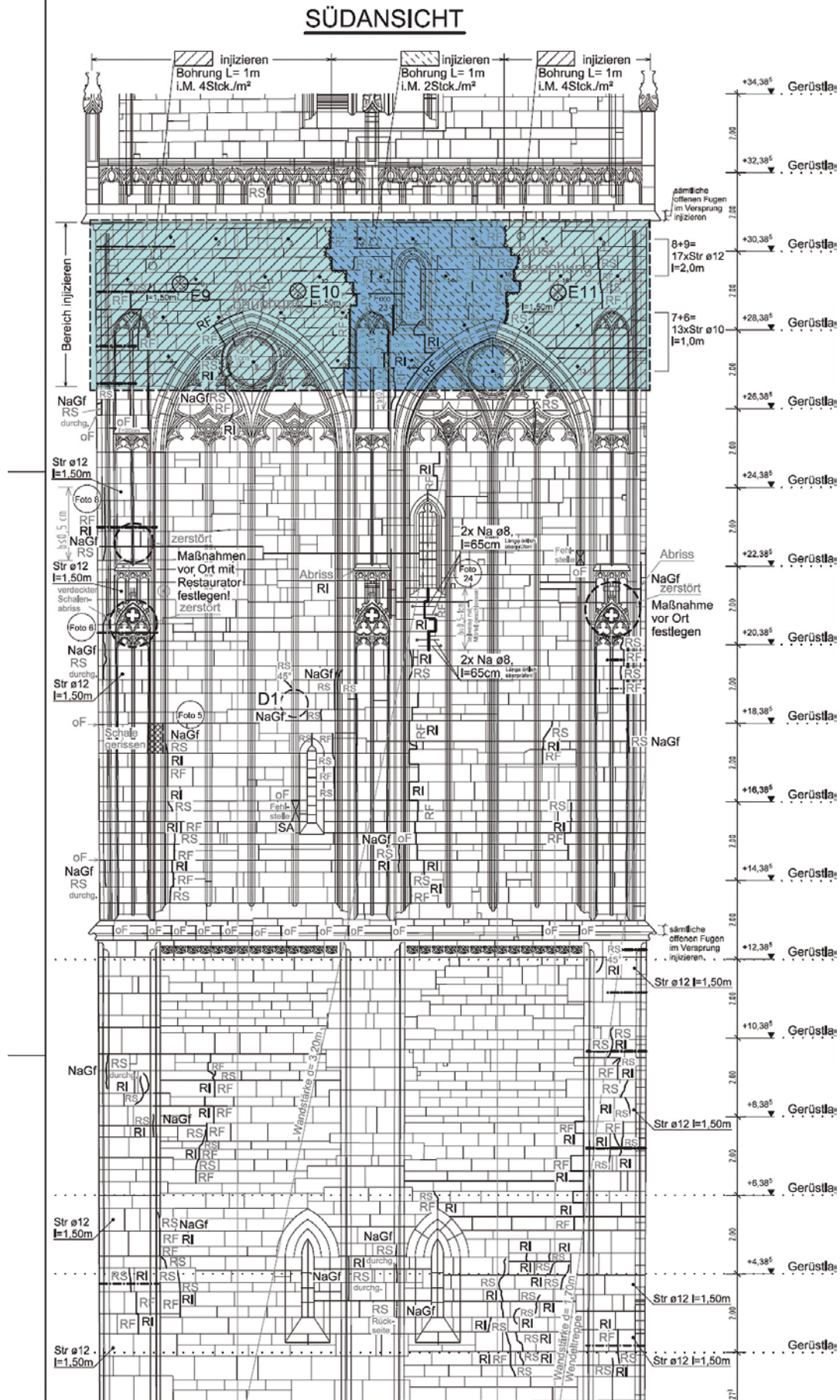


Abb. 10: Planausschnitt Südturm, Südansicht Ebene 2/3, Ausbauchungen und Risse

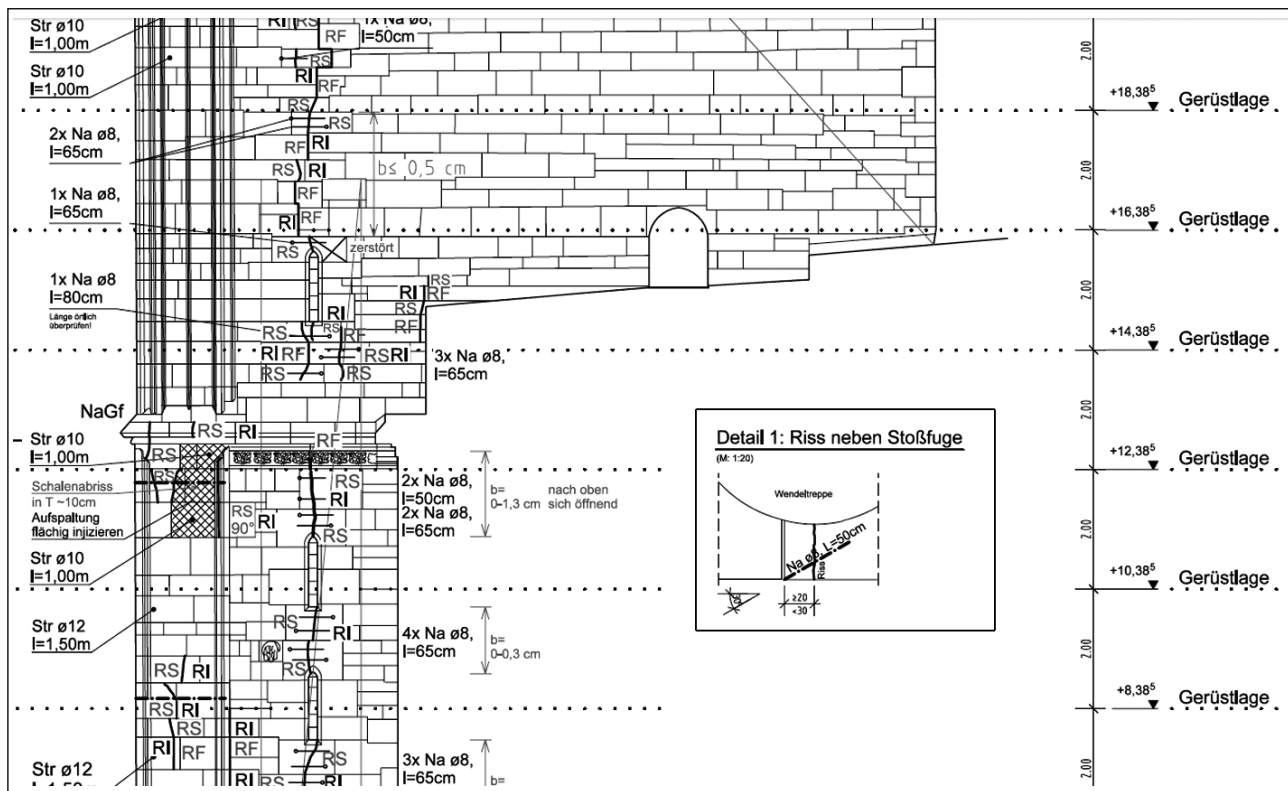


Abb. 11: Planausschnitt des Südturmes, Ostansicht Ebene 1, Rissysteme

- tes vermieden und eine weitgehende Anpassung des Verpresskörpers an die Geometrie des Bohrloches bei klüftigem Mauerwerk erreicht. Gleichzeitig wurde ein begrenzter Durchtritt des Verpressleims und damit ein mineralischer Verbund mit der Bohrlochwand gewährleistet.
- Abstandshalter: Federkorbandstandhalter, die sich der Geometrie des Bohrloches anpassen
 - Füllschläuche: Füllschläuche, die im Verpresskörper verblieben, beeinträchtigen den Verbund. Daher war ihr Außendurchmesser zu begrenzen. Bei Bohrlöchern bis 5 cm; $d_A = 8$ mm; darüber $d_A = 10$ mm.
 - Systeminjektionsmörtel: mineralischer Mörtel als werksgemischter Trockenmörtel mit Güteüberwachung, Biegezugfestigkeit 28 d i.M. 4 N/mm², Druckfestigkeit 28 d i.M. 45 N/mm². Fließfähigkeit und Sieblinie mussten auf den Gewebestumpf abgestimmt sein, um die oben genannten Eigenschaften zu erreichen.

Die Technologie zur Durchführung der Maßnahme wurde vom Statiker ebenfalls exakt festgelegt.

1. Anschlag der Kernbohrmaschine vorzugsweise am Gerüst
2. Trockene Kernbohrung (Durchmesser 36 mm)
3. Für den späteren Verschluss der Bohrlöcher wurden die entsprechenden Bohrkernfragmente aufbewahrt und speziell gekennzeichnet.

4. Das Bohrloch wurde vom Ende her mit rückwärtsgerichtetem Sprühstrahl gesäubert und abgesaugt.
5. Die Ankerstange wurde als Gewindestab passend abgelängt.
6. Einbau Abstandshalter (Federkörbe)
7. Einbau Gewebestumpf bis ca. 5 cm vor Bohrlochende Einbau
8. Einbringen des Systeminjektionsmörtels

Injektion Mauerwerk

Im Bereich der Aufwölbungen wurde vorbereitend das Mauerwerk aufgebohrt. Die Bohrungen wurden freihand trocken im Mauerwerk als Sackloch her-



Abb. 12: Injektion des Mauerwerkes

gestellt. Es erfolgten 2 bis 4 Bohrungen je 1 m². Die Bohrlöcher wurden mit ölfreier Druckluft und zusätzlich mit einem hochleistungsstarken Industriestaubsauger gesäubert, anschließend wurden Packer in die Bohrlöcher eingesetzt und mit Werk abgedämmt. Nach dem vorsichtigen Vornässen des Mauerwerks wurde der Injektionsmörtel mit einem Druck von maximal 2 bar lagenweise von unten nach oben injiziert (Abb. 12).

3.2 Spezialverankerungen der Hauptportalwasserspeier

Links vom Hauptportal des Westwerkes wurden die vollständig im Zweiten Weltkrieg zerstörten Wasserspeier ersetzt. Die faszinierenden modernen Figu-

ren wurden von Künstlern nach einem ausgelobten Teilnahmewettbewerb neu gestaltet. Vorab erfolgte eine temporäre Befestigung von Gipsmodellen (Abb. 13, 14).

Löwe	(WS5)	Cornelia Thümmel (Abb. 23)
Fabelwesen	(WS4)	Cornelia Thümmel/ Georg Mann
Ziege	(WS3)	Cornelia Thümmel /Sebastian Sander
Höllenhund	(WS2)	Marcus Golter (Abb. 19)
Flughund	(WS1)	Martin Roedel

Das Grundprinzip der Befestigung der neuen Wasserspeier basierte auf dem spezifizierten Einbau der jeweiligen Ankerstangen (Abb. 15–18, 20–22, 24, 25).



Abb. 13: temporär montierte Gipsmodelle

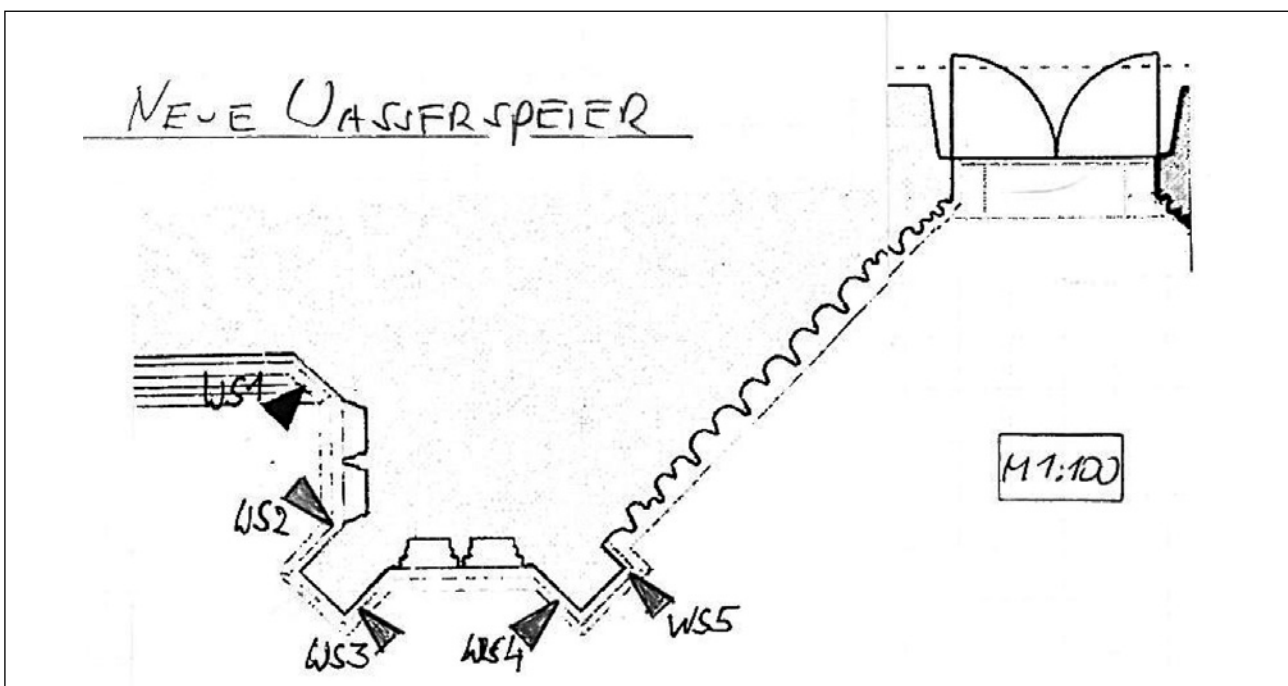


Abb. 14: Übersicht der Anordnung der neuen Wasserspeier links vom Hauptturm des Westwerkes

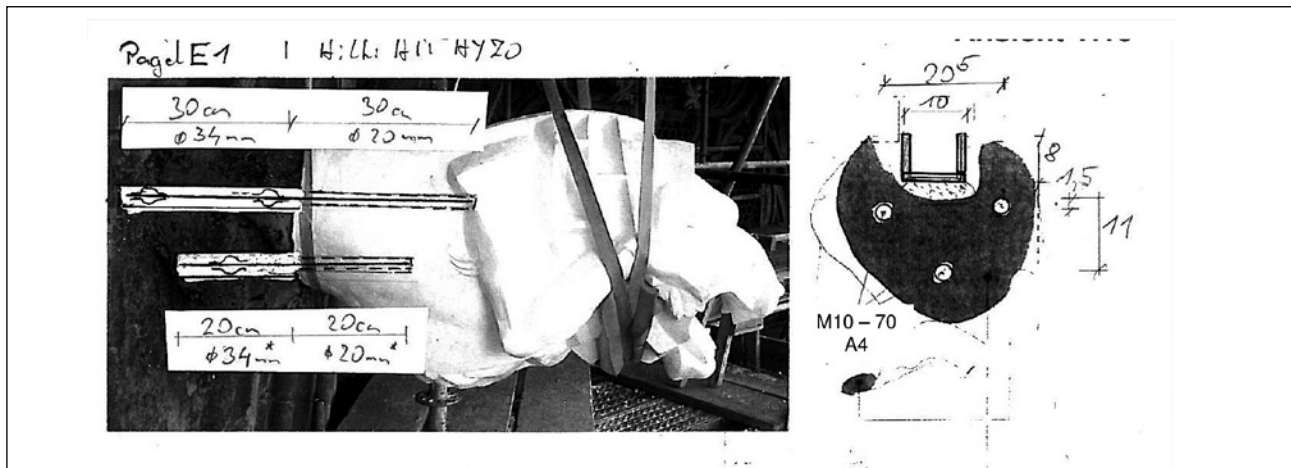


Abb. 15: Detail Löwenfigur: Gipsmodell und Verankerungsquerschnitt

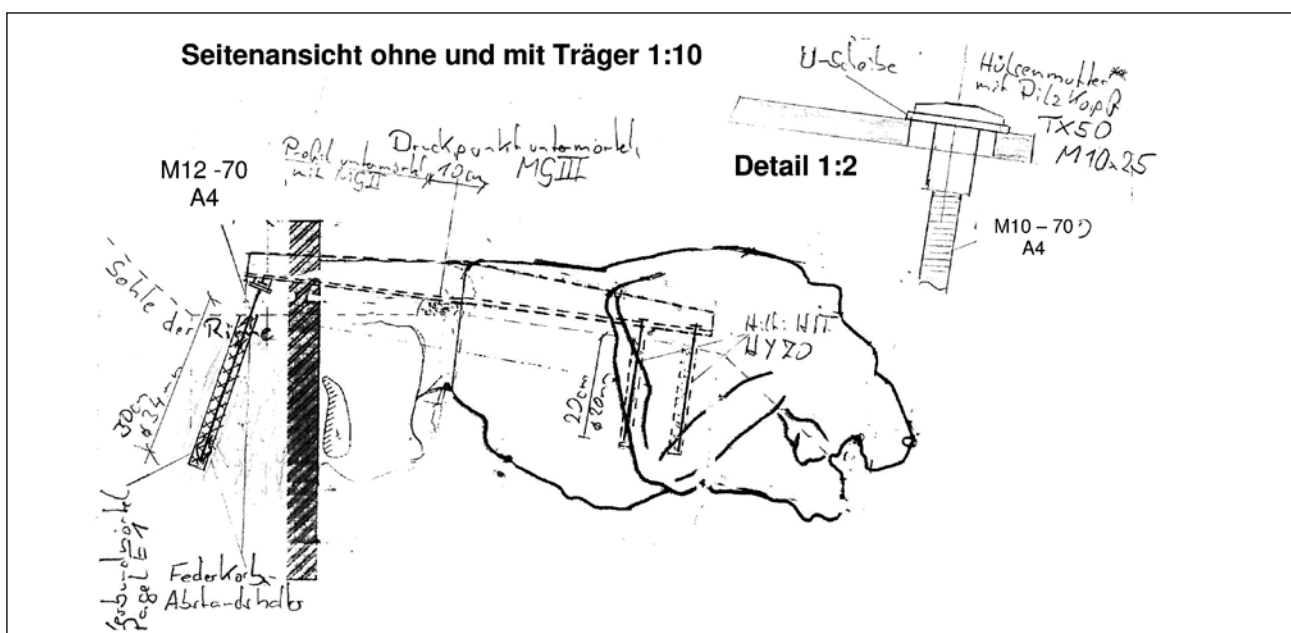


Abb. 16: Detail Löwenfigur: Schnitt des Trägerblechs inklusive der Rückverankerung

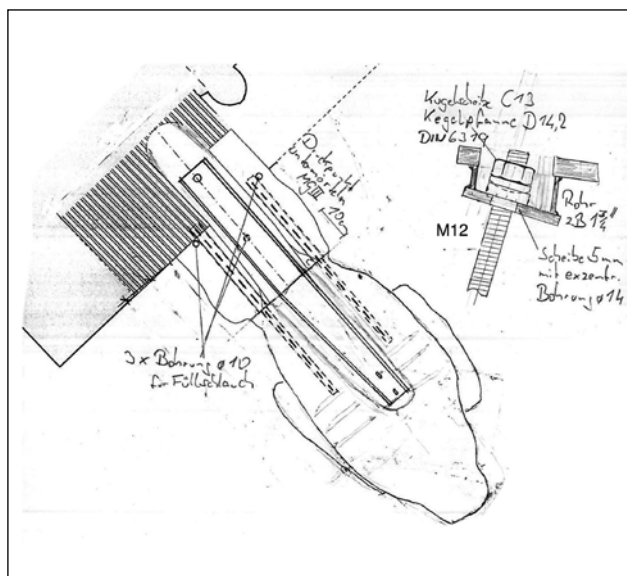


Abb. 17: Detail Löwenfigur: Draufsicht des Trägerblechs und der Zugstangen

1. Die Figur wird an einen Bestandsstumpf angesetzt
2. Die Bohrungen werden auf der Bestandsseite angezeichnet und auf die Figur übertragen
3. Die Klebedübel werden in der Figur gesetzt
4. In der Verbindungsfuge wird mit Distanzplättchen eine definierte Fuge geschaffen, die später mit Verfüllmörtel geschlossen wird
5. Die Figur wird montiert und die Bohrungen auf der Bestandsseite verpresst
6. Die Figur bleibt mit einem Gurt aufgehangen
7. Der Träger wird montiert und die Bohrungen in der Figur und im Bestand werden gesetzt; Die Langlöcher im Träger sollen Temperatur-Längungen ermöglichen
8. Der Träger wird am Druckpunkt mit MG III untermörtelt, die Klebedübel werden gesetzt und die vertikale Bohrung wird über einen Füllschlauch (wird gezogen) vom Grund her verfüllt
9. Das Profil wird auf ganzer Länge mit MG II untermörtelt
10. Nach Erhärten des mineralischen Verbundmörtels (7 Tage) wird der Gurt entfernt

Abb. 18: Löwenfigur: detaillierte Versatzanleitung



Abb. 19: mittelalterlicher „Höllenhund“ modern gestaltet



Abb. 20: Anbohren des Bestandsstumpfes „Fabelwesen“



Abb. 21: Bestandsstumpf und Neuteil des „Löwen“



Abb. 22: Hybridmörtelinjektion des „Flughundes“

Einbau von Ankerstangen in die Figur

Der Einbau der Ankerstangen in sämtlichen Figuren erfolgte mittels Hybridmörtel. Hierdurch konnten Bohrdurchmesser von 6–20 mm eingehalten werden. Verwendet wurde Hilti HIT HY 70 gemäß allgemein bauaufsichtlicher Zulassung. Die Bohrungen wurden als Kernbohrungen mit glatter Wandung hergestellt und anschließend mittels Hammerbohrer aufgeraut. Die Reinigung der Bohrlöcher erfolgte nach folgender Technologie:

- 2× Ausblasen mit Druckluft 6 bar, ölfrei mit Lanze vom Bohrlochgrund aus
- 4× Bürsten mit System-Stahlbürste HIT RB 12, 14 18 mm kreisend, da Bohrlöcher mit Übergröße
- 2× Ausblasen wie zuvor

Es wurden Ankerstangen der Festigkeitsklasse 70 verwendet, bestehend aus A4-Material, Widerstandsklasse III. Eine entsprechende Entfettung erfolgte mittels lösemittelhaltigem Spray.

Die vorgesehene Setztiefe musste durch ein Klebeband (1 cm) markiert werden. Aufgrund der Tiefe der Bohrungen wurde mit Stauzapfen HIT SZ und Verlängerung mit Kupplung VLK vom Bohrlochgrund aus vorinjiziert.

Einbau der Ankerstangen im Bestandsstein

Der Einbau der Ankerstangen im Bestandsstein erfolgte mit einem mineralischen Ankermörtel nach entsprechenden Technologien. Die Entlüftung konnte dadurch gewährleistet werden, dass ein Füllschlauchdurchmesser kleiner als die Füllbohrung verwendet wurde. Das Bestandsmauerwerk nahm bei der Injektion Wasser auf, der Flüssigkeitsspiegel im Bohrloch korrespondierte entsprechend. Es erfolgte ein permanentes Nachpumpen während einer Min-



Abb. 23: Detail „Löwe“: eingeklebte Ankerstangen mit Abstandshaltern (Walzblei)



Abb. 26: „Ziege“ aus dem vollen Stein



Abb. 24: Montage des „Flughundes“



Abb. 27: fünf neue Wasserspeier links vom Hauptportal des Westwerkes



Abb. 25: „Löwe“ im Hebegeschirr

destverpresszeit von 5 Minuten. Jede Figur wurde nach einem vom Tragwerksplaner detailliert vorgegebenen Plan sowie individueller Versatzanleitung befestigt. Hierzu wurden der Figurkörper als auch die Bestandsstümpfe am Mauerwerk, z. B. die Füße, genutzt. Der breit gefächerte Materialbedarf wurde separat für jede Einzelfigur ermittelt.

Durch die künstlerische Neugestaltung der fehlenden Wasserspeier wurde die Ensemblewirkung des Portalbereiches wesentlich verbessert (Abb. 27).

Als Auftraggeber für die statischen Ertüchtigungen des Südturmes fungierte die Firma Graser aus Bamberg. Die Befestigung der neuen Wasserspeier wurde direkt von der Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt beauftragt.

Literatur

Zur Baugeschichte

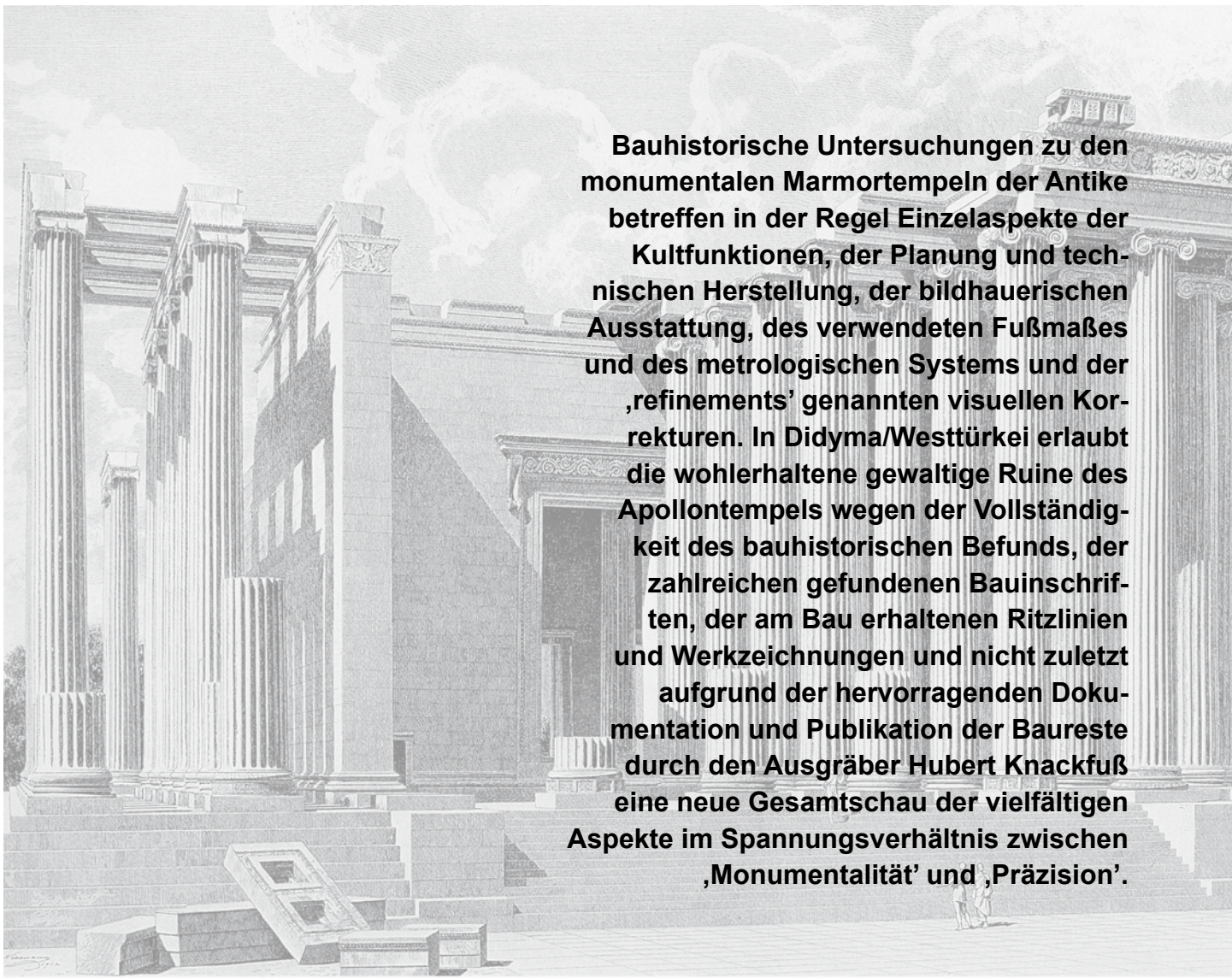
- [1] Harald Brünig: Die Türme des Magdeburger Domes. <http://www.brunnenturmfigur.de/index.php?cat=Turm%20und%20Uhr&page=Magdeburg>, 1.2.2013.
- [2] Preußen und Schinkel – Domgemeinde Magdeburg. <http://www.magdeburgerdom.de/domgemeinde/112.html>, 1.2.2013.
- [3] Zweiter Weltkrieg – Domgemeinde Magdeburg. <http://www.magdeburgerdom.de/domgemeinde/112.html>, 1.2.2013.

Abbildungen

- Abb. 1: Bundesarchiv Bild 183-77832-0002
- Abb. 2: Bundesarchiv Bild 183-26654-0001
- Abb. 4: Cintec International Ltd, Head Office, Newport, South Wales
- Abb. 5–8, 12, 19–26: Ronald Betzold, betzold + maak GmbH, Hinternah
- Abb. 13: Martin Pomm, Pro Denkmal GmbH, Bamberg-Berlin
- Abb. 3, 9–11, 14–18: Peter Hegewald, HAZ Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Kassel:
- Abb. 27: Marcus Golter, Bildhauer, Potsdam

Der Apollontempel in Didyma – Monumentalität und Präzision

von Peter Schneider



Bauhistorische Untersuchungen zu den monumentalen Marmortempeln der Antike betreffen in der Regel Einzelaspekte der Kultfunktionen, der Planung und technischen Herstellung, der bildhauerischen Ausstattung, des verwendeten Fußmaßes und des metrologischen Systems und der ‚refinements‘ genannten visuellen Korrekturen. In Didyma/Westtürkei erlaubt die wohlerhaltene gewaltige Ruine des Apollontempels wegen der Vollständigkeit des bauhistorischen Befunds, der zahlreichen gefundenen Bauinschriften, der am Bau erhaltenen Ritzlinien und Werkzeichnungen und nicht zuletzt aufgrund der hervorragenden Dokumentation und Publikation der Baureste durch den Ausgräber Hubert Knackfuß eine neue Gesamtschau der vielfältigen Aspekte im Spannungsverhältnis zwischen ‚Monumentalität‘ und ‚Präzision‘.

Geschichte des Apollonheiligtums

Das antike Orakel in Didyma bezieht seine Prominenz aus der griechischen Mythologie, nach der an diesem Ort einer Heiligen Quelle der Göttervater Zeus mit der altanatolischen Göttin Leto die göttlichen Zwillinge Apollon und Artemis zeugte. Didyma liegt an der Westküste der Türkei ungefähr 100 km südlich von Izmir auf einer Halbinsel ungefähr 20 km südlich der ostionischen Großstadt Milet und ist seit dem 18. Jahrhundert bekannt geworden durch die wohlerhaltene Ruine des riesigen Apollontempels (Abb. 1). Seine Hofmauern umschließen die Fundamente von zwei Vorgängerbauten aus dem 7. und 6. Jahrhundert v. Chr. (Abb. 2).

Initiiert durch den karischen König Maussollos in der Mitte des 4. Jahrhunderts wurde der Bau durch Alexander den Großen entscheidend gefördert, der das Heiligtum nach erhaltenen günstigen Weissagungen um 330 v. Chr. durch eine königliche Stiftung bedachte. Den ehrgeizigen Riesenbau sponserten in den folgenden Jahrhunderten auch die Nachfolger Alexanders und später die römischen Kaiser. Trotz dieser ‚königlichen‘ und ‚kaiserlichen‘ Förderungen blieb der Bau am Ende der Antike im späten 3. Jahrhundert nach über 600-jähriger Bauzeit unvollendet liegen und wurde in frühbyzantinischer Zeit in eine christliche Kirche umgewandelt.

Heute stellt die von dem Archäologen Theodor Wiegand und dem Architekten Hubert Knackfuß im Auftrag des Deutschen Archäologischen Instituts seit dem Jahr 1906 freigelegte Ruine eine der eindrucksvollsten touristischen Attraktionen an der Westküste der Türkei dar, denn drei der knapp 20 Meter hohen Säulen stehen seit ihrer Errichtung vor über 2000 Jahren noch aufrecht. Die archäologischen Untersuchungen dauern bis heute an – sie stehen seit 2003 unter der Grabungsleitung von Prof. Dr. Andreas Furtwängler, Universität Halle – und immer noch werden an dem Riesenbau neue Erkenntnisse gewonnen, die für dessen spezielles Verständnis aber auch für das allgemeine Wissen über die griechischen Tempelbauten von großer Bedeutung sind.

Architektur des Apollontempels und aktuelle Bauforschungen

Der als Ruine erhaltene Apollontempel von Didyma ist – von außen gesehen – ein sogenannter Dipteros, das heißt ein Tempel mit doppeltem Kranz von 10 × 21 Säulen (Abb. 3). Gesamtlänge und -breite des Marmortempels, der auf siebenstufigem Unterbau steht, betragen 60 m auf 118½ m; Er überbaut also eine Grundfläche von mehr als 7.000 Quadratmetern.

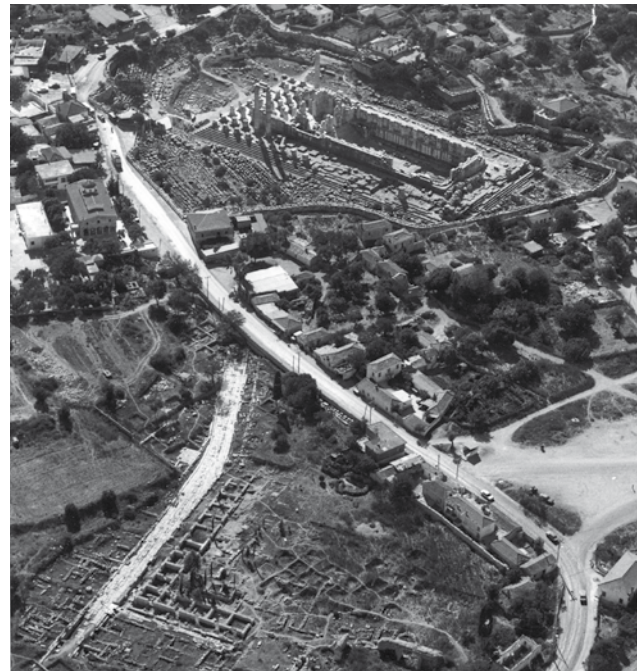


Abb. 1: Didyma, Luftbild



Abb. 2: Didyma, Apollontempel. Blick in den Kulthof

Die Höhe der Säulen misst 19,70 m. Das alles sind Dimensionen, die nur um ein Geringes vom Artemistempel in Ephesos übertroffen wurden, der wegen seiner Größe als eines der sieben ‚Weltwunder‘ der Antike galt.

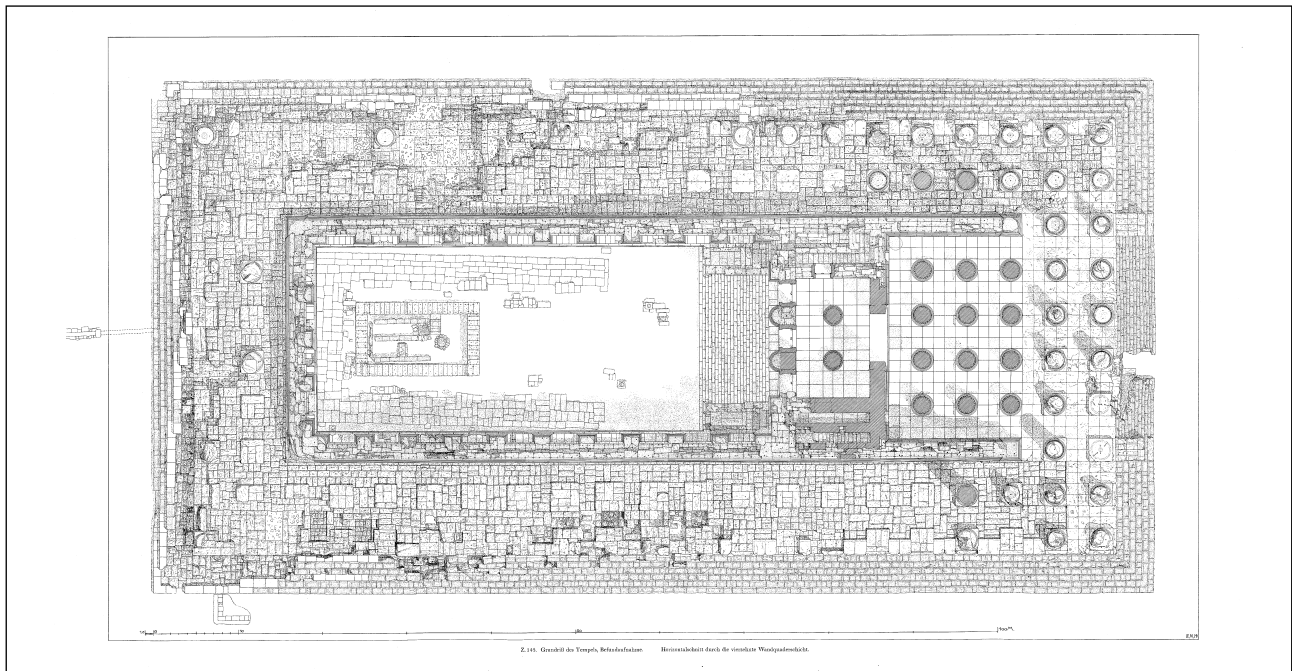


Abb. 3: Didyma, Apollontempel. Grundriss



Abb. 4: Didyma, Apollontempel. Schaubild der Ostseite des Tempels von G. Niemann

Man hat aufgrund der in Didyma gefundenen, in Stein geschriebenen Bauabrechnungen ermittelt, dass sich die Kosten für die Herstellung einer einzigen, im Durchmesser 2,0 m messenden Marmorsäule – vom Steinbruch bis zur fertigen Bearbeitung – in heutige Währung umgerechnet auf etwa 1,6 Millionen Euro berechnen lassen. Da allein der doppelte Kranz von 10×21 (äußeren) Säulen nach dem Grundrissplan 108 Säulen aufweist und weitere zwölf Säulen in der ‚Zwölfsäulensaal‘ genannten Vorhalle und die beiden Säulen des sogenannten ‚Zweisäulensaales‘ hinzukommen, berechnet sich die Gesamtzahl auf 122 Säulen und deren Kosten auf knapp 200 Millionen Euro. Zu den Kosten der Säulen kommen die der Steinmassen des gewaltigen siebenstufigen Unterbaues und der Tempelwände, die im Äußeren aus ortsfremdem Marmor, im inneren Kern aus lokalem

Kalkstein bestehen. Auch die Herstellung der Kassetendecken über Vorhalle und Zweisäulensaal sowie der Bau des als Quellhaus dienenden ‚Naiskos‘ müssten in einer Gesamtrechnung veranschlagt werden, womit man theoretisch auf eine Gesamtsumme von schätzungsweise 600 bis 800 Millionen Euro für das gewaltige und ehrgeizige Bauprojekt kommen würde. Allein diese Zahlen erklären, weshalb das Tempelprojekt von Didyma nach seinem glanzvollen Beginn spätestens zur Zeit Alexanders des Großen in der folgenden über 600 Jahre währenden Bauzeit – sozusagen als ‚antiker Bauskandal‘ – unvollendet liegen blieb. Höchstens ein Drittel der Ringhallensäulen wurde errichtet. Der römische Gelehrte Strabon berichtet um Christi Geburt, „der Tempel sei wegen seiner Größe ohne Dach geblieben“ (Strabon 14.1.5); und von Kaiser Hadrian, der sich 129 n. Chr. in Didyma aufhielt, wissen wir, dass er in einem umfangreichen Bauprogramm das gesamte Heiligtum und auch die weitere Fertigstellung des Apollontempels förderte. Erst in dieser Zeit entstand die Reihe der zehn Frontsäulen, die dem Bau wenigstens im Bereich des Eingangs zu einem Anschein der Vollendung verhalfen (Abb. 4).

Unabhängig von der Tatsache, dass dieser Tempel ‚zeitlebens‘ eine unfertige Baustelle blieb, erfüllte er seine Funktion als Gehäuse des weltberühmten Orakels jedoch von Anfang an. Denn die äußere Hülle ‚in Tempelgestalt‘ umschließt im Innern nicht eine als Behausung des Gottes dienende Cella – wie dies bei griechischen Tempeln üblich ist –, sondern einen nach oben offenen heiligen Hofbezirk (Sekos), in dem das

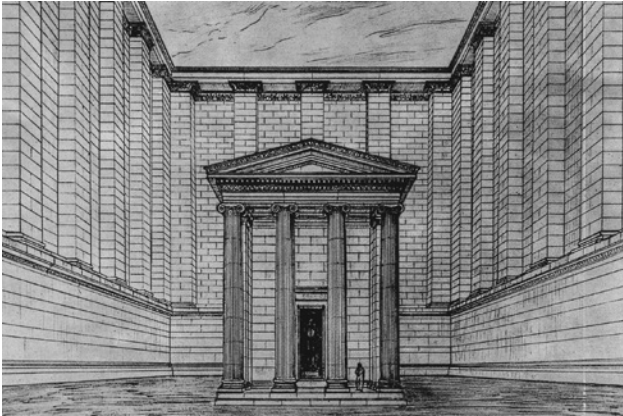


Abb. 5: Didyma, Apollontempel. Ansicht des Quellhauses von F. Krischen

eigentliche kultische Zentrum, die orakelspendende mantische Quelle in einem überlieferten Lorbeerhain lag (Abb. 2). Im Vergleich zum primären kultischen Element des Quellhofes war die äußere Baugestalt eines dipteralen Tempels sekundär. Die mächtigen, über 25m hohen, noch in hellenistischer Zeit weitgehend vollendeten Hofwände sind über einem durchgehenden glatten Sockel tektonisch gegliedert mit schmalen vorspringenden Wandpilastern, die an drei Seiten in regelmäßigem Abstand umlaufen. Die Wände umfassen den 55,6m langen und 24,7m breiten Kulthof und grenzen ihn – als einen gewaltigen, nahezu 1.200 Quadratmeter großen, nur vom Himmel überspannten Saal des Orakelgottes Apollon aus der umgebenden profanen Welt aus. Die bereits in der Antike nach und nach versiegte Orakelquelle lag im Westen dieses Hofes, geschützt und überbaut durch ein im Innern grottenartig in den felsigen Untergrund eingetieftes Quellhaus mit der äußeren Form eines kleinen Tempelchens – des sogenannten Naiskos –, von dem noch die Fundamente und zahlreiche Bauglieder erhalten sind (Abb. 5). Der zierliche Bau ist eines der edelsten Beispiele frühhellenistischer Architektur. Zugang zum ‚unbetretbaren‘ Adyton-Hof gewährten zwei schmale, durch Türen verschließbare schräge Stollen, die von winzigen, in den Ecken des ‚Zwölfsäulensaales‘ (Dodekastylos) angeordneten Pforten zum tieferen Niveau des Kulthofes hinabführten.

Zwischen der zwölfsäuligen Vorhalle und dem Adyton liegt der breitrechteckige ‚Zweisäulensaal‘. Seine Decke wird in etwa 18m Höhe durch zwei frei im Raum stehende korinthische Säulen getragen. Eine monumentale Freitreppe führt vom etwa 6m tiefer gelegenen Adyton zur Westwand des Saales hinauf, die als dreitürige Schaufassade mit zwei kolossalen Halbsäulen korinthischer Ordnung noch prächtiger gestaltet

ist als die übrigen dreiseitig umlaufenden Pfeilerwände des Hofes. Der ‚Zweisäulensaal‘ öffnet sich zur Tempelvorhalle, dem ‚Zwölfsäulensaal‘, in einer riesigen Erscheinungstür, deren Breite 5,63m beträgt und deren Höhe mit ca. 14,0m rekonstruiert werden kann. Das gewaltige Portal, dessen Schwellenhöhe mit knapp 1,5m menschliche Dimensionen bei weitem übertrifft, diente offenbar der Verkündigung des Orakels. Die beiden marmornen, jeweils aus einem Stein gewonnenen Blöcke der Türgewände hatten jeweils ein Gewicht von 70 Tonnen. Sie gehören zu den größten Steinen, die in der griechischen Antike im Steinbruch gewonnen, dann transportiert und schließlich millimetergenau am Bau versetzt wurden. Generell grenzt die Ausführungspräzision des riesigen Marmorbaues ans Unglaubliche: Selbst die längsten von Hubert Knackfuß ermittelten Maße des Stylobats (109.34,00m) und des Stufenunterbaues (118.34,00m) stimmen nahezu millimetergenau überein mit den theoretisch zu fordernden Sollmaßen (109.34,58m und 118.35,76m), die Wolfgang Sonntagbauer aus den in Grundriss und Aufriss in sich stimmigen Maßbeziehungen der metrologischen Analyse wiedergewinnen konnte (Abb. 6). Der ganze Entwurf ist auf der Maßeinheit des attischen Fußmaßes aufgebaut (29,42cm), und der Grundriss folgt einem Raster der durch die Säulen vorgegebenen Einheitsjoche von 18 Fuß. Allerdings wird in der aufgehenden Architektur diese Grundmetrologie durch Erweiterungen und Verkürzungen des Fußmaßes überlagert, sodass eine komplexe ‚konzertante‘ Variation der Maße erreicht wird, die auf eine lebendige Dynamik im Aufbau der Tempelbauglieder zielt. Diese Variationen bleiben jedoch immer streng zahlenmäßig und proportional gebunden und sind in der steinmetzmäßigen Ausführung millimetergenau realisiert.

Dies gilt auch für die vor allem von den Bauten der Akropolis bekannten refinements, die am Tempel von Didyma exemplarisch erhalten sind und studiert werden können: Die Krümmung aller horizontalen Schichten, die Entasis (Schwellung) und Inklination (Einwärtsneigung) der Säulen und die Böschung der Außenwandflächen. Als sensationell galten die 1979 durch Lothar Haselberger entdeckten Werkzeugzeichnungen an den Innenseiten der Hofwände, die unter anderem eine detaillierte Konstruktionszeichnung für die Ermittlung der Entasis-Kurve der Säulen enthalten (Abb. 7). Durch die Anwendung zweier unterschiedlicher Maßstäbe gelingt es dem Werkmeister, diese äußerst flache Kurve als einfachen Kreisbogen darzustellen, indem nämlich die horizontale Achse des Vertikalschnittes einer Säule kombiniert wird mit einer auf den Maßstab 1/16 reduzierten Vertikalachse. Da-

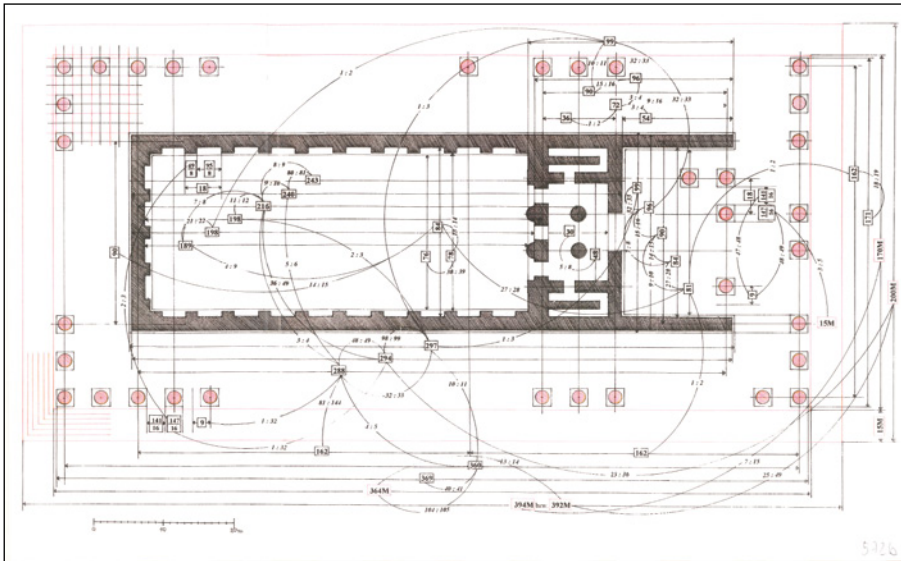


Abb. 6:
Didyma, Apollontempel.
Metrologie des Grundrisses

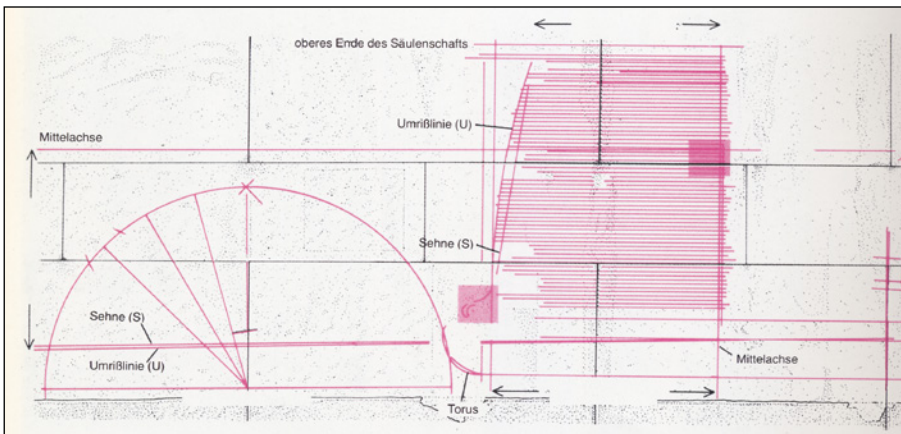


Abb. 7:
Didyma, Apollontempel. Werk-
zeichnung zur Säulenentasis
von L. Haselberger

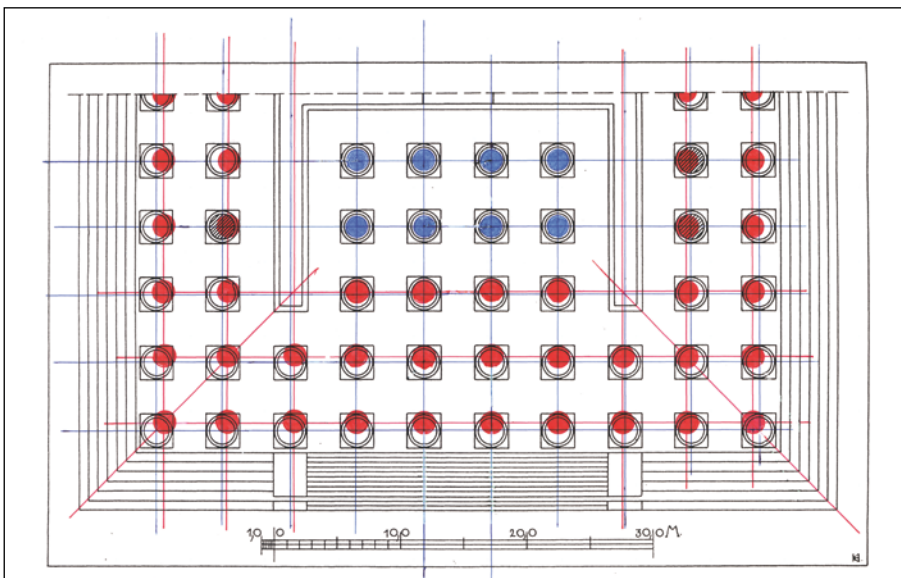


Abb. 8:
Didyma, Apollontempel.
Säuleninklination

durch verkürzt sich der anzusetzende Zirkelradius auf ein praktikables Maß.

Auch für die an den in voller Höhe erhaltenen Säulen wegen der Veränderungen durch Erdbebeneinfluss schwer nachweisbare Inklinations gibt es Anhalts-

punkte. Durch die einseitige Böschung der Außenwände wird das Rastersystem des Tempelgrundrisses vom Stylobat zum Gebälk hin modifiziert (Abb. 8). So liegen die äußeren Wandfluchten im Bereich des oberen Abschlusses nach den Messungen von Knackfuß

an den Gebäudeecken um 12 cm nach innen versetzt. Da die Innenseiten der Tempelwände generell als senkrecht angenommen werden müssen, verschieben sich die Wandachsen um das halbe Maß, also 6 cm, von unten nach oben jeweils zur Tempelmitte hin. Dieser Verschiebung folgen natürlich auch die Wandarchitrave und die Architrave der Säulenhallen. Hieraus folgt außer der Inklinations die Rekonstruktion einer von den Antenachsen aus zu den Ecksäulen hin sukzessiv zunehmenden Schrägstellung der Säulen, welche sowohl die beiden Schmalseiten des Tempels als auch die jeweils ersten drei Säulen der Längsseiten erfasst.

Auf diese Weise sind alle Bauteile des Tempels bis in die Modulationen der refinements in Planung und Ausführung in einem räumlichen Koordinatensystem aus Vielfachem und aus Bruchteilen des Ellen-, Fuß- und Daktylensystems miteinander verbunden, und es stellt sich die Frage, mit welchen Techniken des Einmessens und des Versetzens diese Konzeption mit den tonnenschweren Marmorsteinen und in den gewaltigen Gesamtdimensionen des Bauwerks realisiert werden konnte.

Die aktuellen Forschungen konzentrieren sich auf die archäologische und baugeschichtliche Revision der Befunde zu den älteren Vorgängerbauten des Apollontempels aus dem 7. und 6. Jahrhundert, bei denen es sich ebenfalls um Höfe – in Relation zur jeweiligen Zeitstellung gesehen – monumentalen Ausmaßes handelt, deren Umfassungsmauern die alte Heilige Quelle umbauten und sich in der Abfolge der Bauphasen ‚konzentrisch‘ erweiterten.

Abbildungen

Abb. 1: Wolf Schiele, 1997

Abb. 2: Tuchelt, Titelbild

Abb. 3: Did I Taf. 6 und 7

Abb. 4: Did I Taf. 1

Abb. 5: Tuchelt, Abb. 29

Abb. 6: Sonntagbauer, Abb. 2

Abb. 7: Tuchelt, Abb. 26

Abb. 8: Peter Schneider

Literatur

Did I = Theodor Wiegand (Hrsg.), Didyma, Erster Teil: Die Baubeschreibung in drei Bänden von Hubert Knackfuß, Gebrüder Mann Verlag, Berlin (1941).

Lothar Haselberger, Werkzeichnungen am Jüngerem Didymaion. Vorbericht, Istanbul Mitteilungen 33 (1983), 90–123.

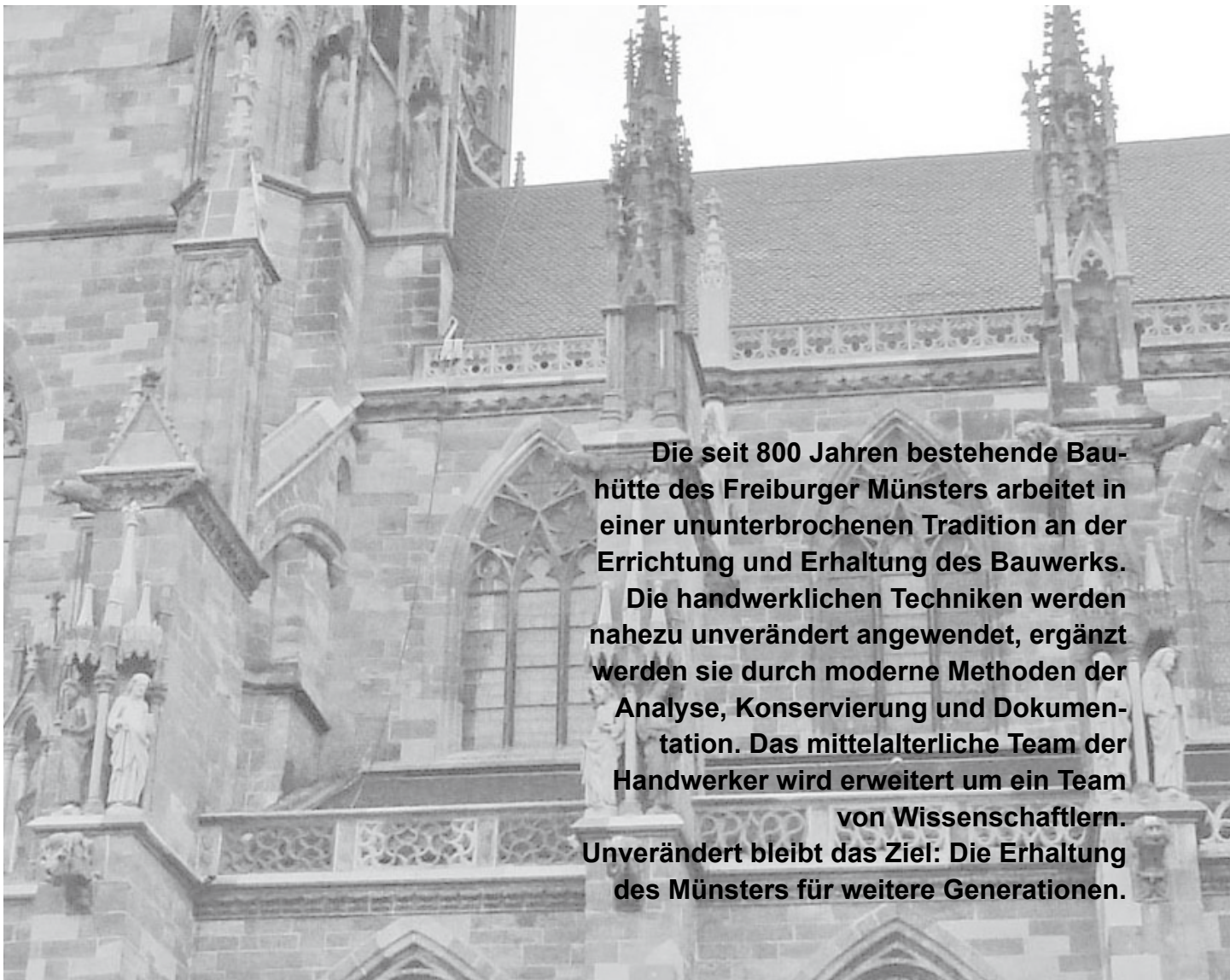
Tuchelt = Klaus Tuchelt, Branchidai – Didyma, Geschichte und Ausgrabung eines antiken Heiligtums, Verlag Philipp von Zabern, Mainz (1992).

Sonntagbauer = Wolfgang Sonntagbauer, Metrologische Analyse des Jüngerem Apollontempels von Didyma (unpubliziertes Manuskript 2006, Salzburg).

Die Darstellung in dieser Zusammenfassung beruht auf älteren Publikationen und aktuellen Forschungen – auch von Kollegen –, die im Literaturverzeichnis aufgelistet sind. Mein eigener Beitrag betrifft die Zusammenschau der Ergebnisse unter den Begriffen ‚Monumentalität‘ und ‚Präzision‘ und speziell der Nachweis der unterschiedlichen Säulenneigungen als Folge der Wand-Inklimation.

Die Arbeitsweise der Freiburger Münsterbauhütte

von Yvonne Faller



Die seit 800 Jahren bestehende Bauhütte des Freiburger Münsters arbeitet in einer ununterbrochenen Tradition an der Errichtung und Erhaltung des Bauwerks.

Die handwerklichen Techniken werden nahezu unverändert angewendet, ergänzt werden sie durch moderne Methoden der Analyse, Konservierung und Dokumentation. Das mittelalterliche Team der Handwerker wird erweitert um ein Team von Wissenschaftlern. Unverändert bleibt das Ziel: Die Erhaltung des Münsters für weitere Generationen.

1 Einleitung

Seit über 800 Jahren existiert in Freiburg ein Steinmetzbetrieb, der zunächst für den Bau des Münsters verantwortlich war und der bis heute für dessen Instandhaltung zuständig ist: die Münsterbauhütte. Sie zählt zu den traditionsreichsten mittelalterlichen Bauhütten.

Im Gegensatz zu anderen bekannten Hütten, die im Mittelalter ihren Betrieb einstellten und erst Jahrhunderte später ihre Arbeit wieder aufnahmen, blieb die Freiburger Münsterbauhütte durchgehend bestehen. Nach dem Bau des Freiburger Münsters (1200–1540) war es die Hauptaufgabe der Bauhütte die steinerne Substanz und den filigranen Bauschmuck zu erhalten und zu ergänzen.

Diese Aufgabe wird bis heute von den Mitarbeitern der Münsterbauhütte wahrgenommen. Dabei haben sich die Handwerkstechniken der Steinmetze bis heute nur wenig verändert, vor allem die Arbeit am Stein wurde zunehmend durch einige technische Hilfsmittel erleichtert, die Muskelkraft ersetzt durch Motorkraft. Dazugekommen sind neue Arbeitsfelder, sei es die Konservierung als Alternative zum Steinaustausch, sei es die Bestandsaufnahme und Dokumentation im Vorfeld einer Maßnahme und als deren Abschluss.

Dadurch änderte sich auch das gesamte Team, das für die Arbeiten notwendig ist. Waren es früher die entwerfenden Baumeister, Steinmetze, Maurer, Zimmerleute und weitere Handwerker, die das Bauwerk errichtet haben, sind es heute Denkmalpfleger, Bauhistoriker, Statiker, Architekten, Steinmetze und Re-

stauratoren, die sich um die bedrohte Steinsubstanz kümmern. Gleichgeblieben ist das Ziel: die Erhaltung des gotischen Gotteshauses für weitere Generationen.

In Freiburg ist dabei eine Besonderheit zu beachten, die durch die Neuordnung der Trägerschaft begründet ist. War die Stadt circa 500 Jahre lang verantwortlich für den Bau und Erhalt des Münsters, änderte sich dies Anfang des 19. Jahrhunderts durch die Gründung des Badischen Großherzogtums. Ein langjähriges Zuständigkeitsvakuum führte zur Gründung des Münsterbauvereins im Jahr 1890 und damit zu einer Teilung der Verantwortung. Der Münsterbauverein übernahm die Trägerschaft für die Bauhütte und ist bis heute verantwortlich für den Erhalt des äußeren Steinwerkes, das Erzbischöfliche Bauamt betreut sämtliche Arbeiten im Inneren sowie die Dächer und Fenster des Freiburger Münsters.

2 Mittelalterlicher Baubetrieb

Das Quellenmaterial zur Geschichte der Freiburger Bauhütte ist eher dürrig, für die Frühzeit liegen nur vereinzelte Schriftquellen vor. Erst ab dem 15. Jahrhundert ermöglichen Rechnungen einen Einblick in die Bautätigkeit. Von der Bauhütte in Straßburg sind mehr Informationen überliefert, es ist davon auszugehen, dass der Baubetrieb in Freiburg sich nicht von dem in Straßburg unterscheidet.

2.1 Entwurfstätigkeit

Nur wenige Pläne (Risse) sind vom Freiburger Münster erhalten. Es handelt sich dabei meist um Gesamtpläne des Westturmes, die auf Pergament eingeritzt wurden. Aus diesen wurden dann Detailzeichnungen entwickelt, die vom Baumeister selbst oder seinem Polier zunächst auf einem mit Wachs oder Kalk bestrichenen Zeichenbrett entworfen und anschließend im Maßstab 1:1 auf eine große Fläche, dem Reißboden aufgetragen wurden (Abb. 1). Von dieser Vorzeichnung konnten dann die Einzelmaße mit Hilfe von Zirkeln und Messlatten direkt auf den Stein übertragen werden (Abb. 2).

2.2 Arbeit der Steinmetze

Für ein Bauwerk in der Dimension und Komplexität wurden unterschiedliche Anforderungen an die Steinmetze gestellt. Es waren sowohl einfache Mauerquadern und Pfeilersteine als auch komplizierte Maßwerkstücke und Kapitelle oder anspruchsvolle Skulpturen aus dem Stein zu schlagen. Für diese schwierigeren Aufgaben wurden sogenannte Laubhauer oder Bildhauer eingesetzt.



Abb. 1: *Werkmeister Josef Jakob auf dem ehemaligen Reißboden des Münsterbauvereins, Aufnahme um 1960*

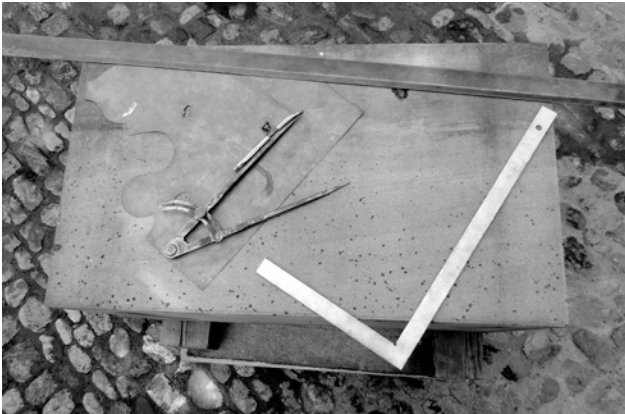


Abb. 2: Entwurfsgewerkzeuge und Metallschablone



Abb. 3: Arbeiten mit einer Zahnfläche



Abb. 4: Arbeiten mit Knüpfel und Spitzeisen



Abb. 5: Spreizwolf (li) und Wolf (re.)

Als Vorlage für Profilsteine und Maßwerk benutzten die Steinmetze eine Schablone, die zunächst aus Holz, später aus Metall gefertigt wurde. Die Umrisse der Schablonen wurden mit einer Reißnadel auf die Steinoberfläche übertragen.

Mit verschieden geformten Eisen wurde der Stein bearbeitet, man unterscheidet sie je nachdem, wie sie geführt wurden, in Hauwerkzeuge und Schlagwerkzeuge.

Die Hauwerkzeuge werden beidhändig geführt, dazu zählen z.B. der Zweispietz oder die Zahnfläche (Abb. 3). Schlagwerkzeuge wie Zahneisen, Spitzeisen oder Schlageisen werden dagegen einhändig geführt und mit einem hölzernen Knüpfel oder eisernem Fäustel getrieben (Abb. 4).

Viele Steine wurden im Winter vorgefertigt, wenn an der Baustelle selbst nicht weitergearbeitet wurde. Im Frühjahr wurden die Steine versetzt. Über Transporträder, Seile und Rollen wurden die Lasten nach oben gehoben. Gehalten wurden die Steine entweder mit der Steinzange oder dem „Wolf“. Beim Wolf handelt es sich um eine Art Spreizdübel der in eine schwalbenschwanzförmige Vertiefung eingeführt wurde (Abb. 5).

Versetzt wurden die Steine entweder mit einem Kalkmörtel oder mit Blei, das erhitzt und in flüssigem Zustand vergossen wird. Schmale horizontale Formate mit einer eisernen Klammer, hohe vertikale Elemente (Fialen) mit einem langen eisernen Dübel zusätzlich gegen Absturz gesichert.

3 Münsterbauhütte heute

Es gehört heute wie in den letzten 500 Jahren zu den Aufgaben der Münsterbauhütte, die steinerne Hülle des Münsters mit dem gesamten Skulpturenschmuck zu pflegen, zu reparieren und zu ergänzen. Eine der wichtigen Aufgaben der Münsterbauhütte besteht heute darin, die gesamte Oberfläche des Münsters einmal jährlich abzufahren und auf neue Schäden zu überprüfen. Je früher diese entdeckt werden, desto größer ist die Chance, sie frühzeitig und mit geringem Aufwand zu beheben (Abb. 6).

3.1 Arbeitsvorbereitung

Alle Arbeiten beginnen mit einer ausführlichen Bestandsaufnahme: Stein für Stein wird fotografisch und zeichnerisch festgehalten, welche Schäden zu erkennen sind. Jedes einzelne Schadensbild wird beschrieben und dokumentiert. Auch das Erfassen wichtiger historischer Spuren, wie z.B. alte Farbfassungen, Steinmetzzeichen oder mittelalterliche Bearbeitungsreste ist elementarer Bestandteil einer kompletten Bestandsaufnahme (Abb. 7).

So wie man in der Steinbearbeitung neue Techniken einsetzte, kommen diese auch in der Arbeitsvorbereitung zur Anwendung: Musste früher für die Bestandsaufnahme jeder Stein vor Ort aufgemessen und von Hand gezeichnet werden, erfolgt dies heute über fotogrammetrische Aufnahmen. Diese werden in digitale Pläne umgewandelt und bilden die Grundlage für alle weiteren Arbeitsschritte. In diese neu erstellten Bestandspläne werden sämtliche Informationen eingetragen, die für die Vorbereitung wichtig sind (Abb. 8). Denkmalpfleger, Bauforscher, Statiker, Steinmetze, Restauratoren und Kunsthistoriker tragen die Informationen am Bauwerk zusammen und bewerten sie. Erst dann werden in enger Absprache mit den Vertretern der Denkmalpflege die entsprechenden Sanierungsmaßnahmen geplant und ebenfalls in Plänen

festgehalten. Sind die Arbeiten abgeschlossen, halten die Steinmetze und Restauratoren die einzelnen Maßnahmen in einem weiteren Plansatz fest, sie sollen den Nachfolgern die Kontrolle erleichtern.

3.2 Konservierung und Erhaltung

Hat man in verschiedenen vergangenen Perioden wertvolle Skulpturen ausgebaut und durch eine Kopie ersetzt, wenn sie Anzeichen von Schäden aufwiesen, bemüht man sich heute darum, nur so viele originale Steine wie nötig auszutauschen und so viel wie möglich vor Ort zu erhalten. Der Ersatz des zerstörten Steines durch eine detailgetreue Kopie wird nur dann vorgenommen, wenn es keine andere Möglichkeit mehr gibt, die Substanz zu erhalten, bzw. Gefahr durch Absturz besteht.

Begonnen wird mit der behutsamen Reinigung der Steinoberfläche durch Strahlen mit feinem Glaspulvermehl, welches die Oberflächenstruktur des Sandsteines nicht verletzt. Besondere Sorgfalt wird den Stellen gewidmet, die eine Farbfassung vermuten lassen. Darauf spezialisierte Restauratoren untersuchen vor Beginn der Reinigung, an welchen Bereichen Fassungsreste vorhanden sind, reinigen diese Stellen und nehmen Proben zur Untersuchung. Die Konservierung dieser Bereiche und wertvoller mittelalterlicher Skulpturen wird von freischaffenden Diplom-Restauratoren vorgenommen und in enger Abstimmung mit der Denkmalpflege ausgeführt.

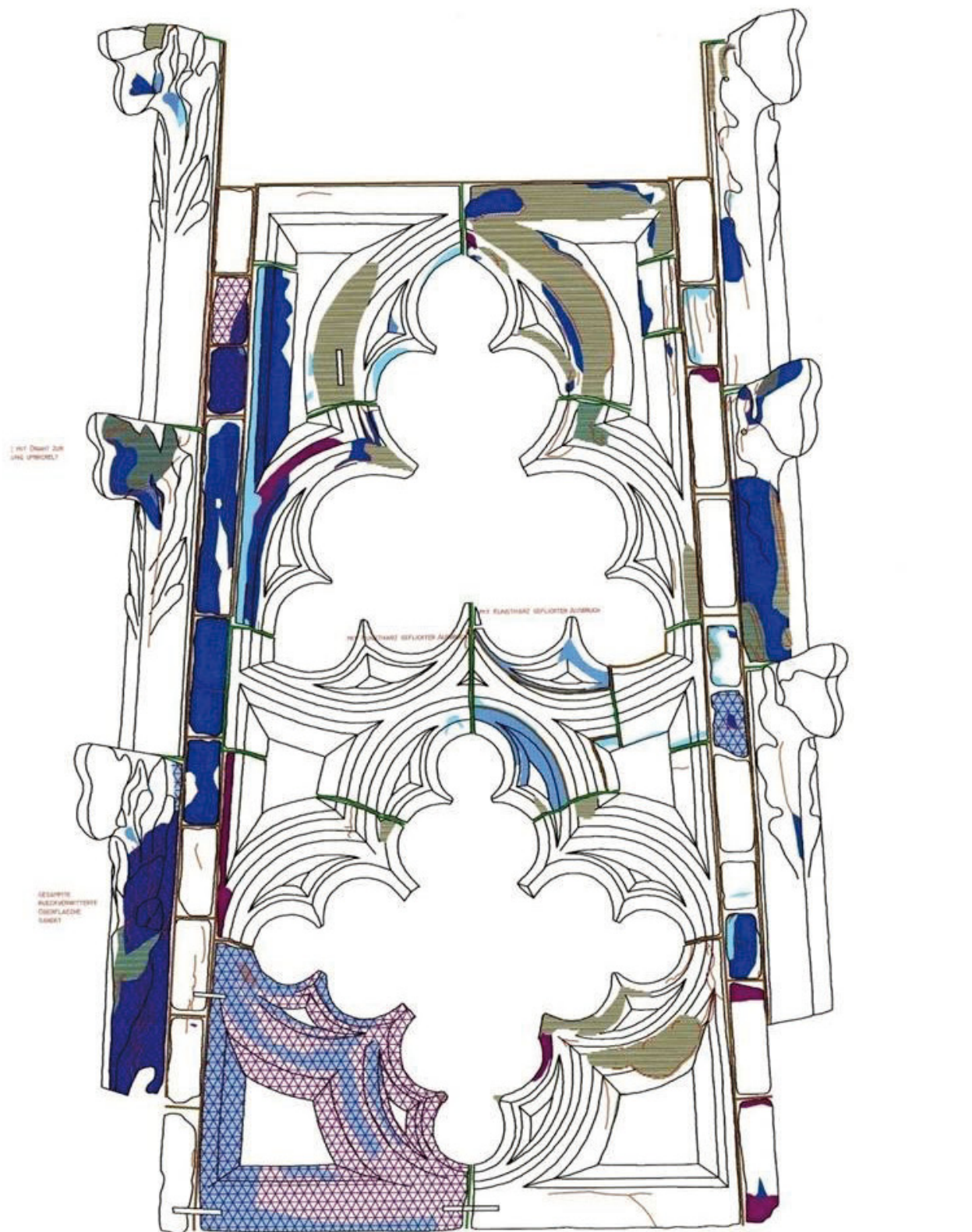
Die Behandlung der Sandsteinoberfläche mit Kiesel säureester, das Schließen von Rissen und die Ergänzung von Fehlstellen mithilfe von Restauriermörtel werden zunehmend durch die Steinmetze der Bauhütte ausgeführt, die sich für diese konservierenden Tätigkeiten intensiv weiterbilden. Eine eigens dafür eingerichtete Restaurierwerkstatt bietet den geeigneten Rahmen für Entwicklung und Erprobung unterschiedlicher Methoden(Abb. 9). Diese werden inten-



Abb. 6: Hubsteigerbefahrung



Abb. 7: Kartieren auf der Baustelle



Legende Steinschäden

136 ABBRÖCKELN	131 ABSANDEN	161 ABSANDEN SCHUPPEN	161 SCHUPPEN	140 SCHALE DÜNN	160 SCHALE DICK	216 ZURÜCKOBERFL.	216 RÜCKW. FLÄCHE	251 VERSCHMÜTZUNG
49 FEHLST./AUSBRUCH	250 KRUSTE	38 MÖRTELFUGE DEFECT	96 BLEIFUGE DEFECT	230 ROSTSPRENGUNG	90 BEWUCHS	254 AUSBLÜHUNG	252 ANTRAGUNG	RISSE

FREIBURGER MÜNSTER
HAUPTTUM
KARTIERUNG: STEINSCHÄDEN
SCHICHT 6
SÜDOSTEN (AUSSEN) 07/08
XP 70

Abb. 8 : Ausschnitt aus einer Kartierung



Abb. 9: Restaurierwerkstatt

siv auch mit den am Freiburger Münster beschäftigten Diplom-Restauratoren diskutiert und geprüft.

Der Vorteil einer Bauhütte besteht u. a. auch darin, dass sie sich ausschließlich mit dem an „ihrem“ Bauwerk vorhandenen Materialien beschäftigen müssen. Es besteht dadurch die Möglichkeit, speziell für die eigenen Steinvarietäten abgestimmte Konservierungsmethoden zu entwickeln, anzuwenden, zu prüfen und langfristig zu beobachten (monitoring). So hat z. B. die Freiburger Münsterbauhütte in Zusammenarbeit mit Frau Prof. Dr. Stürmer (HTWG Konstanz) einen speziell für das Freiburger Münster pigmentfreien Restauriermörtel entwickelt, der seine Farbigkeit nur durch Sandzuschlag aus gebrochenen Sanden der am Münster verbauten Sandsteine und Basalt- und Ziegelmehlen erhält. (Abb. 10)

3.3 Steinaustausch

Wenn die Steinsubstanz so stark geschädigt ist, dass eine Sanierung nicht mehr möglich ist, wird entweder nur ein Teilstück mit einer sogenannten Vierung ersetzt (Abb. 11) oder das Werkstück bzw. die Skulptur neu geschlagen. Dank einer umfangreichen Sammlung von Gipsabgüssen aus der Zeit um 1900 ist es möglich die zur Unkenntlichkeit verwitterten Formen originalgetreu wieder herzustellen. Dabei wird auch heute noch ein Punktiergerät eingesetzt, was dem Bildhauer dabei hilft, die Proportionen vom Original auf die Kopie zu übertragen (Abb. 12).

Die Wahl des richtigen Materials spielt eine große Rolle. Dabei ist es nicht nur wichtig, dass der Stein witterungsbeständig ist, sondern dass die übrigen Kennwerte mit den im Bauwerk umgebenden Steinen vergleichbar sind (Wasseraufnahme, E-Modul, etc.). Die Münsterbauhütte ist deshalb ständig auf der Suche nach dem passenden Stein und wird dabei vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau unterstützt. Zur Zeit findet ein Probeabbau an einem ehemaligen Münstersteinbruch statt, der um 1900 stillgelegt wurde.

Bevor ein Steinblock in die Münsterbauhütte geliefert wird, wird er von Geologen und Mineralogen überprüft auf seine Zusammensetzung und Eignung für den Einbau am Münster.

Erst dann beginnen die Steinmetze, aus dem Quader die gewünschte Figur oder das Architekturelement herauszuarbeiten. Detailgetreu wird das Vorbild genauestens kopiert, eine Arbeit, die Fingerspitzengefühl und Ausdauer verlangt. Die Arbeitsweise der Steinmetze hat sich seit dem Mittelalter nur geringfügig geändert. Noch immer müssen sie in der Lage sein, Skulpturen und anspruchsvolle Architekturteile freihändig zu kopieren, was hohe Ansprüche an ihre



Abb. 10: Sande aus Münstersteinen

handwerkliche Fertigkeit stellt. Die wichtigsten Arbeitsmittel, wie Knüpfel, Meißel und Winkel, sind dabei im Prinzip die gleichen wie vor 800 Jahren. Allerdings erleichtern heute einige technische Hilfsmittel die körperliche Arbeit. Früher musste der im Steinbruch gewonnene, zunächst unförmige Steinblock von Hand mit dem Spitzeisen auf ein rechtwinkliges Format gebracht werden, bevor daran weitergearbei-

tet wurde. Heute schneidet man mithilfe der Steinsäge die Steine auf die erforderliche Größe zu, was sowohl Zeit als auch Material spart. Bei bestimmten Arbeitsschritten nehmen die Steinmetze die Unterstützung von Pressluft in Anspruch. Trotzdem bestimmt am Schluss der von Hand geführte Meißel das optische Erscheinungsbild des Werkstückes (Abb. 13).



Abb. 11: Teilergänzung (Vierung)



Abb. 12: Steinmetz mit Punktiergerät



Abb. 13: fertige Oberfläche eines Werkstückes

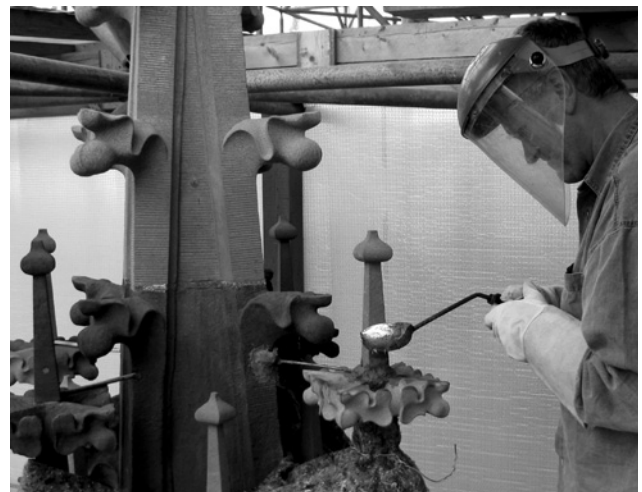


Abb. 14: Bleiverguss

Die neu geschlagenen oder ergänzten Werkstücke werden wie im Mittelalter in einem Kalkmörtel versetzt oder verbleit (Abb. 14). Der mineralische Mörtel wurde speziell für das Freiburger Münster entwickelt. Motorisierte Hebezeuge wie Motorwinde oder Bauaufzug helfen beim Ausbau, Transport und Einbau der schweren Werkstücke am Bauwerk. Bereits im Mittelalter wurden mechanische Hilfsmittel wie Transporträder, Rollen und Flaschenzüge eingesetzt. Diese mussten jedoch im Unterschied zu heute mit Muskelkraft bedient werden. Trotz aller technischer Unterstützung beschäftigt heute noch eine überlebensgroße Apostelfigur beispielsweise einen Bildhauer über sechs Monate lang. Es ist ein krönender Abschluss und Lohn der Mühe, diese Figur hoch über dem Münsterplatz an ihren Platz stellen zu können (Abb. 15).

Literatur

- [1] Faller/Mittmann/Zumbrink: Die Münsterbauhütte, von den Anfängen bis zur Gegenwart. Band 2, Schriftenreihe Münsterbauverein, Rombach-Verlag
- [2] Arbeitsdokumentationen 2008–2011 des Freiburger Münsterbauvereins

Abbildungen

Alle Abbildungen: Freiburger Münsterbauverein

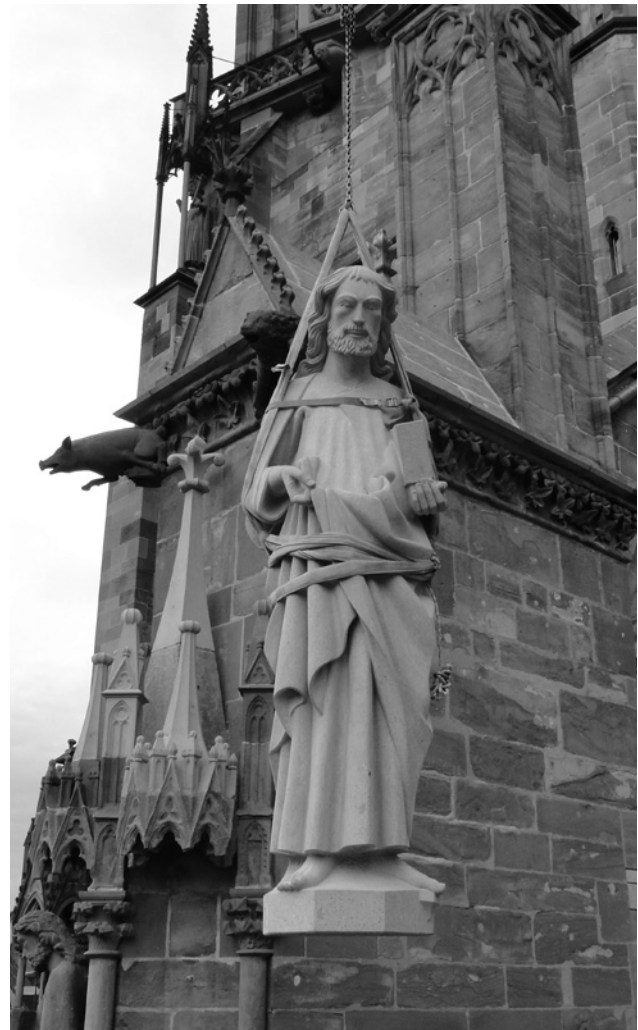


Abb. 15: schwebende Apostelfigur

Maria Paula **Álvarez Echeverri**

Restauratorin von Kunst- und Kulturgut
Carr. 4 con Calle 29-22. Apartamento 101
Bogotá D.C.

Dipl.-Ing. Ronald **Betzold**

betzold + maak GmbH & Co.KG
Baumanufaktur
Waldauer Berg 7, 98553 Hinternah
Tel.: 036841 - 553575
www.betzold-maak.de
info@betzold-maak.de

Dipl.-Ing. Yvonne **Faller**

Münsterbaumeisterin, Freie Architektin
Freiburger Münsterbauverein e. V.
Schoferstraße 4, 79089 Freiburg
Tel.: 0761 - 33432
info@muensterbauverein-freiburg.de
www.muensterbauverein-freiburg.de

Prof. Dr.-Ing. Roland **Fink**

Hildenbrand Ingenieure
Gesellschaft mbH + Co.KG für konstruktiven Ingenieurbau
Abelstr. 63, 71634 Ludwigsburg
Tel.: 07141 - 9413-0
Fax: 07141 - 9413-16
roland.fink@hildenbrand-ing.de
www.hildenbrand-ing.de

Studiendekan Master Konstruktiver Ingenieurbau
Fakultät Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft
Hochschule für Technik (HFT)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
roland.fink@hft-stuttgart.de
www.hft-stuttgart.de

Boris **Frohberg**

Restaurator
Rembrandtstr. 51, 12623 Berlin

Prof. Dr. Gabriele **Grassegger-Schön**

Bauchemie, Baustoffkunde
Fak. B Bauingenieurwesen
Leiterin des Labors für Bauchemie
Schwerpunkt Untersuchungen für historische Bauwerke
Hochschule für Technik (HFT)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711 - 8926 -2646 (Labor), -2776 Büro
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
www.mpa.uni-stuttgart.de

Hans Michael **Hangleiter**

Restaurator
Bismarckstrasse 13, 64853 Otzberg

Oliver **Hornung**

Steinmetz- und Bildhauermeister
Staatlich geprüfter Steintechniker
Bergstraße 109, 73441 Bopfingen
Tel.: 07362 - 5732
Fax.: 07362 - 5732

Helen **Jacobsen**

Diplomrestauratorin FH
Nansenstr. 10, 14471 Potsdam
Tel.: 0157 - 74618418
helleschatten@web.de

Michael-Christian **Kremppler**

Oeserstr. 26, 13509 Berlin

M.Eng. Daniel **Lehn**

Hochschule für Technik (HFT)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

Prof. Dr. Hans **Leisen**

Diplomgeologe
Fachhochschule Köln
Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft
Ubierring 40, 50678 Köln
Tel.: 0221 - 8275-3472
Hans.Leisen@fh-koeln.de

Dr. Esther von **Plehwe-Leisen**

Diplomgeologin
Untersuchungslabor für Fragen der Natursteinerhaltung LPL
Schulze-Delitzsch-Str. 88, 50968 Köln
Tel.: 0221 - 382219
jaeh.leisen@t-online.de

Prof. Dr. Peter **Schneider**

Hochschule für Technik Stuttgart
Fachbereich Architektur und Gestaltung
Lehrgebiete ‚Geschichte der Architektur‘ und ‚Denkmalpflege‘

Dipl.-Ing. Gunnar **Siedler**

fokus GmbH Leipzig
Lauchstädter Straße 20, 04229 Leipzig
Siedler@fokus-GmbH-Leipzig.de
www.fokus-GmbH-Leipzig.de

Dr. Ute **Steinhäuser**

Diplomingenieurin
Olchinger Str. 97, 82194 Gröbenzell
Tel.: 0177 - 5278136
ustein@web.de

Dipl.-Inf. (FH) Sebastian **Vetter**

fokus GmbH Leipzig
Lauchstädter Straße 20, 04229 Leipzig
www.fokus-GmbH-Leipzig.de

Dr. Eberhard **Wendler**

Diplomchemiker
Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege
Mühlangerstr. 50/I, 81247 München
Tel.: 089 - 89129440
e.wendler@t-online.de

**NEUES WISSEN
FÜR ALTE BAUWERKE**

BAUSUBSTANZ

Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

www.bausubstanz.de



ca. 64 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 möchte die **BAUSUBSTANZ** Ihnen viermal im Jahr Neues, Bewährtes und Wichtiges aus dem weiten Feld der Bausanierung bieten.

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

Fachliteratur

Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein



Rolf Snethlage, Michael Pfanner
4., überarb. und erw. Aufl. 2013,
ca. 360 Seiten, zahlr., teilw. farb. Abb.,
Tab., Kart.
ISBN 978-3-8167-8633-7

Der Leitfaden erklärt in verständlicher Form alles Wissenswerte über die Grundlagen der Konservierung und über die Notwendigkeit von Untersuchungen und Kontrollmessungen. Er schlägt damit eine Brücke von

den wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Praxis. Eine detaillierte Inhaltsübersicht erlaubt es auch dem Nichtfachmann, den für »sein Denkmal« erforderlichen Untersuchungsumfang zu bestimmen und unterstützt ihn dabei, sein Projekt erfolgreich zu steuern.

Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand



Martin Krause
Bauforschung für die Praxis Band 101
2012, 95 Seiten, zahlr. farb. Abb., Kart.
ISBN 978-3-8167-8611-5

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war es, zerstörungsfreie Prüfverfahren anhand praktischer Aufgaben zu testen, zu verbessern und dabei Einsparpotenziale zu ermitteln. Der Autor stellt die Leistungsfähigkeit verschiedener Verfahren dar und führt sie für die Konzeption eines Baustellen-

scanners weiter. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass für zahlreiche Beispiele die Kosteneinsparung konkret ausgerechnet werden kann.

Ingenieurbauwerke aus Natursteinmauerwerk

Kongress Ingenieurbautage 2012 – Tagungsband



Hrsg.: Erhalten historischer Bauwerke
e.V., Karlsruhe
2012, 130 Seiten, zahlr. Abb., Kart.
ISBN 978-3-8167-8803-4
E-Book: ISBN 978-3-8167-8804-1

Einzigartige Natursteinbauwerke der früheren Ingenieurbaukunst gilt es zu bewahren und in ihrer Einmaligkeit zu erhalten. Die Autoren erläutern die dafür benötigten Planungsgrundlagen und geeignete Baumaßnahmen. Beispiele vom Bremer Dom, vom Freiburger

Münster und von Stützmauern sorgen für den Praxisbezug und veranschaulichen die Thematik. Die Autoren gehen auf Aspekte wie zerstörungsfreie Untersuchungen, Klima- und Feuchtemonitoring, Verfüguung sowie Injektion ein.

Hochwasserschutz und Denkmalpflege

Fallbeispiele und Empfehlungen für die Praxis



Heiko Lieske, Erika Schmidt, Thomas Will
2012, 308 Seiten, zahlr. Abb., Kten, Geb.
ISBN 978-3-8167-8536-1

Hochwasserschutzbauten kommen häufig in Konflikt mit baulich-landschaftlichen Qualitäten der Standorte, die sie schützen sollen. Hochwasserschutz ist deshalb eine komplexe Planungsaufgabe, bei der es auch um die Erhaltung kulturhistorischer Werte

geht. Die Autoren zeigen Formen des baulichen Hochwasserschutzes an Flüssen und ihre Auswirkungen auf Denkmale und historische Stadtbereiche. Die Fallanalysen münden in Leitlinien zur Gestaltung der Planungsprozesse und zur baulichen Integration von Hochwasserschutz und Denkmalpflege.

Zur Vervollständigung Ihrer Bibliothek – die Tagungsbände der Jahre 2007 – 2012

Natursteinsanierung Stuttgart 2007

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz
2007, 143 Seiten, zahlr. Abbildungen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-7311-5

Natursteinsanierung Stuttgart 2008

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz, Otto Wölbert
2008, 152 Seiten, zahlr. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-7553-9

Natursteinsanierung Stuttgart 2009

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz
2009, 136 Seiten, zahlr. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-7989-6

Natursteinsanierung Stuttgart 2010

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz, Otto Wölbert
2010, 196 Seiten, zahlr. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-8254-4

Natursteinsanierung Stuttgart 2011

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz
2011, 156 Seiten, zahlr. farb. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-8461-6

Natursteinsanierung Stuttgart 2012

Hrsg.: Gabriele Grassegger, Gabriele Patitz
2012, 160 Seiten, zahlr. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-8660-3

Fraunhofer IRB Verlag

Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Postfach 80 04 69 · 70504 Stuttgart · Tel. 0711 9 70-25 00 · Fax 0711 970-25 08 · irb@irb.fraunhofer.de · www.baufachinformation.de

ISBN 978-3-8167-8924-6



9 783816 789246

Hochschule
für Technik
Stuttgart

Fakultät B, Bauingenieurwesen



IGP Ingenieurbüro
Dr. Ing. Gabriele Patitz

in Zusammenarbeit mit



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART
LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE