

FREIBURGER MÜNSTER

Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen

15. März 2019

Fraunhofer IRB  Verlag

naturstein sanierung stuttgart 2019

Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Karin Schinken (Hrsg.)

Natursteinsanierung Stuttgart 2019

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen
sowie Sanierungsbeispiele**

Tagung am 15. März 2019 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

Email: gabriele.grassegger@hft-stuttgart.de

Zentrales Telefon, Labor: (0711) 8926 2646

Schwerpunkt: Sanierungstechnik, Untersuchung von Baudenkmalen, „Conservation Sciences“

mit Unterstützung des

Landesamtes für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart

FB Restaurierung, Karin Schinken

Berliner Straße 12, 73726 Esslingen am Neckar

Lektorat

Dr. Steffie Gawlik

Herstellung

Andreas Preising

Layout und Satz

Manuela Gantner | Punkt, STRICH.

Druck und Bindung:

RCOM Print GmbH, Würzburg-Rimpar

Einband

Freiburger Münster Turmhelm, Archiv Münsterbauverein

1. Auflage

2019 Fraunhofer IRB Verlag,

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

ISBN (Print): 978-3-7388-0243-6

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0244-3

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 Teilnehmerinnen und Teilnehmer an der Fachtagung Natursteinsanierung 2019,
liebe Leserinnen und Leser**

Wir freuen uns, Sie zur Fachtagung Natursteinsanierung in Stuttgart begrüßen zu können und wünschen Ihnen viele neue Anregungen und Erkenntnisse für Ihre Arbeit in der Praxis sowie Forschung. Zudem möchten wir einen erfolgreichen interdisziplinären fachlichen Austausch zwischen Ihnen und den Fachkollegen und Fachkolleginnen initiieren.

Diese Tagung erreicht seit nunmehr 25 Jahren – einem Vierteljahrhundert – mit ihren Themen und Praxisbeispielen Denkmalpfleger, Restauratoren, Architekten und Ingenieure, ausführende Firmen sowie Kollegen aus Forschung und Lehre. Die Teilnehmerzahlen haben sich in den vergangenen Jahren ständig erhöht, was für die Themen, deren Bedeutung und Aktualität spricht.

Die Vorträge aus diesem Jahr und weiterführende Informationen finden Sie in dem vorliegenden Tagungsband. In Ergänzung dazu bietet sich traditionsgemäß im Foyer der HFT Stuttgart die Möglichkeit, sich an Ausstellerständen über neue sowie altbewährte Produkte und Arbeitsmaterialien zu informieren, Kontakte zu knüpfen und Erfahrungen auszutauschen. Fachliteratur liegt für Sie an den Informationsständen des Fraunhofer IRB Verlags und des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg Esslingen bereit. Im Fokus der diesjährigen Exkursion steht das Freiburger Münster. Zwei Fachvorträge führen auf der Tagung in Stuttgart in Projektmaßnahmen am 700jährigen Kulturdenkmal in Baden-Württemberg ein. Vor Ort besteht die Möglichkeit, sich die Instandsetzungen mit vier thematischen Führungen vor Augen zu führen und zu diskutieren.

Zwei der Hauptakteure der Tagung fassen ihre Arbeit der letzten 30 Jahre auf dem Gebiet der Bewertung und Reparatur von Steinschädigungen zusammen und stellen sie zur diesjährigen Tagung in Stuttgart vor. Der Umgang mit teilweise vorprogrammierten Abstürzen von Fassadenelementen, die Rettung einer durch frühere Sanierungen stark geschädigten Stadtmauer und Lösungen hinsichtlich erheblicher statisch-konstruktiver Probleme am Herrenrefektorium und Herrendorment des UNESCO-Weltkulturerbes Kloster Maulbronn werden ebenso ausgeführt wie der Neubau des Schlingenrippengewölbes für die Dresdner Schlosskapelle, basierend auf einem 3D-modellierten Rippenkörpermodell. Auswirkungen der Trockeneisstrahl-Methode auf empfindliche Untergründe wie Granit wurden im Zusammenhang mit den Aufgaben zum Erhalt der Kathedrale in Santiago de Compostela (Spanien) untersucht und bewertet. An der Dreikönigenbastion „Alter Zoll“ Bonn sind erhebliche Instandsetzungsarbeiten verbunden mit Rückverankerungen der mächtigen Stützmauern in interdisziplinärer Zusammenarbeit erfolgreich ausgeführt worden und werden erläutert.

Mit den ausgewählten Themenschwerpunkten wollen wir Ihnen zwei spannende Tage bieten. Wir wünschen Ihnen einen interessanten fachlichen Austausch, viele neue Anregungen und Ideen für Ihre Projekte.

Gabriele Patitz

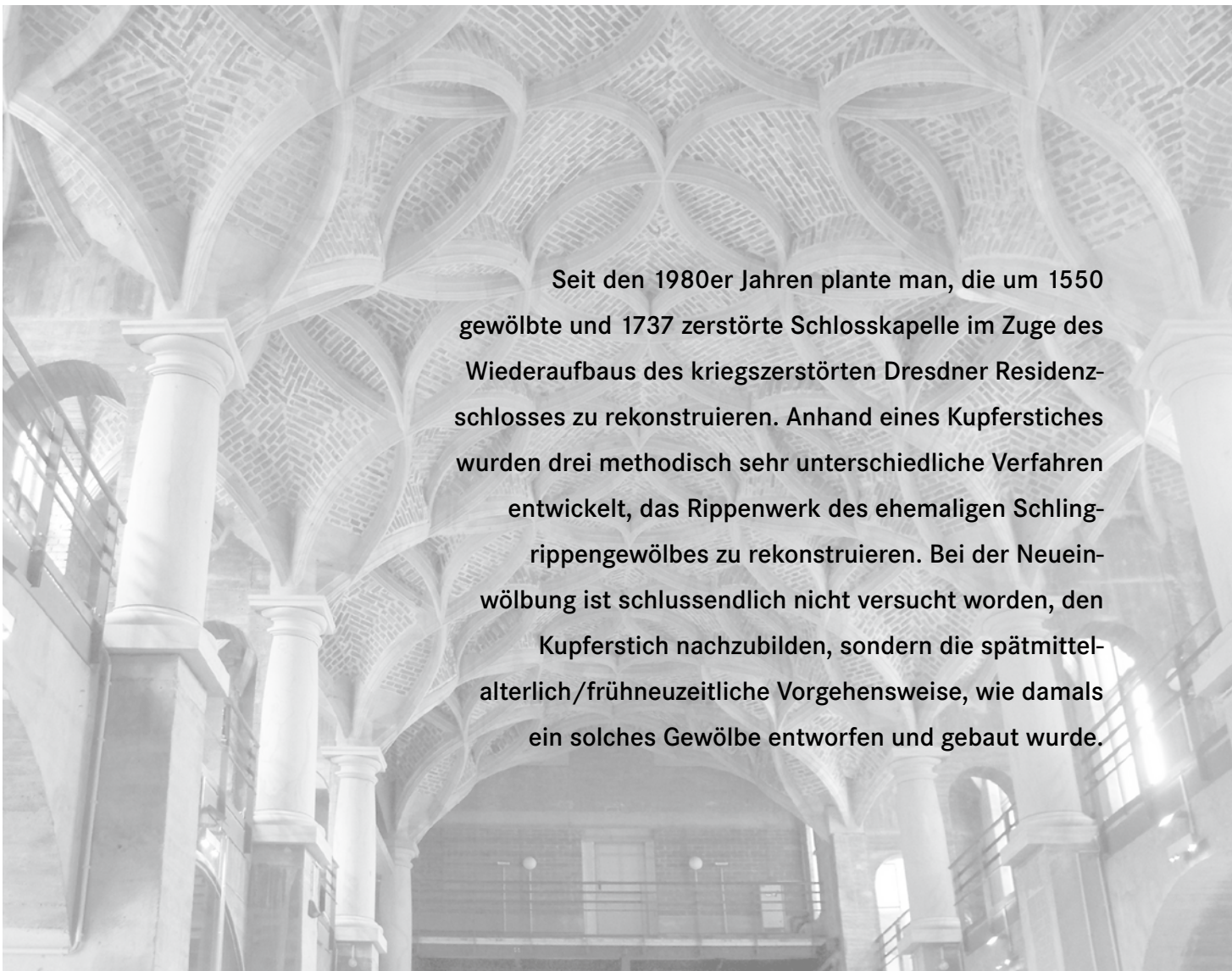
Gabriele Grassegger

Karin Schinken

Stefan Bürger Thomas Bauer Jörg Lauterbach	Das spätgotische Schlingrippengewölbe der Dresdner Schlosskapelle – Möglichkeiten, Methoden und Erkenntnisse der Wiederherstellung	7
Markus Sandner Barbara Schmitz Thorsten Behrendt	Dreikönigenbastion „Alter Zoll“ Bonn – Werkbericht zur Instandsetzung, Restaurierung und Rückverankerung	27
Hans-Werner Zier, Heike Dreuse, Stefan Zeuch, Alban Huschenbeth	Stadtmauer am Frauentor in Mühlhausen (Thüringen) – Keine Rettung im Bestand!	43
Holger Probst	Kloster Maulbronn: Natursteinarbeiten am Herrenrefektorium und Herrendorment	57
Albert Kieferle Peter Reiner	Münster Salem, Westfassade – Konservierung der Konservierung	69
Felipe Valderrama	Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung von Trockeneisstrahlen in der Fassadenreinigung auf empfindliche Untergründe	79
Tobias Neubert Christoph Reuther	Absturz vorprogrammiert – Gefährdung, Prüfung und Instandsetzung von Fassaden	95
Gabriele Grassegger Otto Wölbert	30 Jahre Steinrestaurierung, Technik gestern und heute. Frühere Erkenntnisse zu Steinschäden	105
Dagmar Zimdars	Baustelle Münsterturm Freiburg – Denkmalpflegerische Zielsetzung	119
Yvonne Faller	Freiburger Münster – Die Turmhelmsanierung 2006–2012	131
	Autorenverzeichnis	145

Das spätgotische Schlingrippengewölbe der Dresdner Schlosskapelle – Möglichkeiten, Methoden und Erkenntnisse der Wiederherstellung

von Stefan Bürger, Thomas Bauer und Jörg Lauterbach



Seit den 1980er Jahren plante man, die um 1550 gewölbte und 1737 zerstörte Schlosskapelle im Zuge des Wiederaufbaus des kriegszerstörten Dresdner Residenzschlosses zu rekonstruieren. Anhand eines Kupferstiches wurden drei methodisch sehr unterschiedliche Verfahren entwickelt, das Rippenwerk des ehemaligen Schlingrippengewölbes zu rekonstruieren. Bei der Neueinwölbung ist schlussendlich nicht versucht worden, den Kupferstich nachzubilden, sondern die spätmittelalterlich/frühneuzeitliche Vorgehensweise, wie damals ein solches Gewölbe entworfen und gebaut wurde.

1 Historisches zum Schloss, zur Schlosskapelle und zum Schlingrippengewölbe

Mit vielen Um- und Ausbauphasen wuchs aus der frühen Burg und Wehranlage des 12. Jahrhunderts eine vielgestaltige, repräsentative Residenz heran, die bis in das frühe 20. Jahrhundert den herausragenden landesherrschaftlichen Mittelpunkt der Kurfürsten und später der Könige von Sachsen bildete.¹ Während von den mittelalterlichen Bauphasen überirdisch nur Teile des östlichen Nordflügels und des Hausmannsturms (um 1400) erhalten blieben, haben sich in größerem Umfang Baukörper und -teile erhalten, die dem Ausbau zur Residenz im 16. Jahrhundert zugehören.

1 Zur Baugeschichte von Schloss und Schlosskapelle mit weiterführender Literatur: Magirius, Heinrich: Die evangelische Schlosskapelle zu Dresden aus kunstgeschichtlicher Sicht, Altenburg 2009; Dülberg, Angelika; Oelsner, Norbert; Pohlack, Rosemarie: Das Dresdner Residenzschloss, Berlin 2013; Magirius, Heinrich: Schritte der Annäherung an ein fast verlorenes Baudenkmal, die evangelische Hofkapelle im Dresdner Residenzschloss. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 8–13.

Unter Kurfürst Moritz von Sachsen wurde zwischen 1547 und 1556 der strategisch wichtige Ort am Elbübergang zu einer der bemerkenswertesten Renaissanceschlösser im Alten Reich ausgebaut. Ein kurz zuvor errichteter Westflügel wurde dafür niedergelegt und der Große Schlosshof um ein großes Stück nach Westen erweitert. In diesem Zuge entstand der westlich an den Hausmannsturm anstoßende Nordflügel, der fortan die hohe Schlosskapelle beherbergen sollte. Diese Schlosskapelle war nicht nur privater Mess- und Andachtsraum für den Landesherrn, sondern als herausgehobener Repräsentationsort für Moritz konzipiert, um den neuen Stand als Kurfürst und im Zuge der Reformation die neue Rolle als *summus episcopus* des nunmehr lutherischen Fürstentums sichtbar zu machen. Das Schloss hatte dieser Vermittlungsfunktion weltlicher und geistlicher Machtansprüche zu genügen. Und die zwischen 1549 und 1556 geplante und gebaute Schlosskapelle bildete dabei den baukünstlerischen und medialen Mittelpunkt der Anlage. Es ist klar, dass daher jedes bau- oder bildkünstlerische Detail höchsten Ansprüchen genügen musste. Weniger bekannt ist, dass Schlingrippengewölbe, deren Verfahren und Formen aus der spätgotischen Bautradition hervorgingen, um und nach 1550 keinesfalls traditionell und veraltet

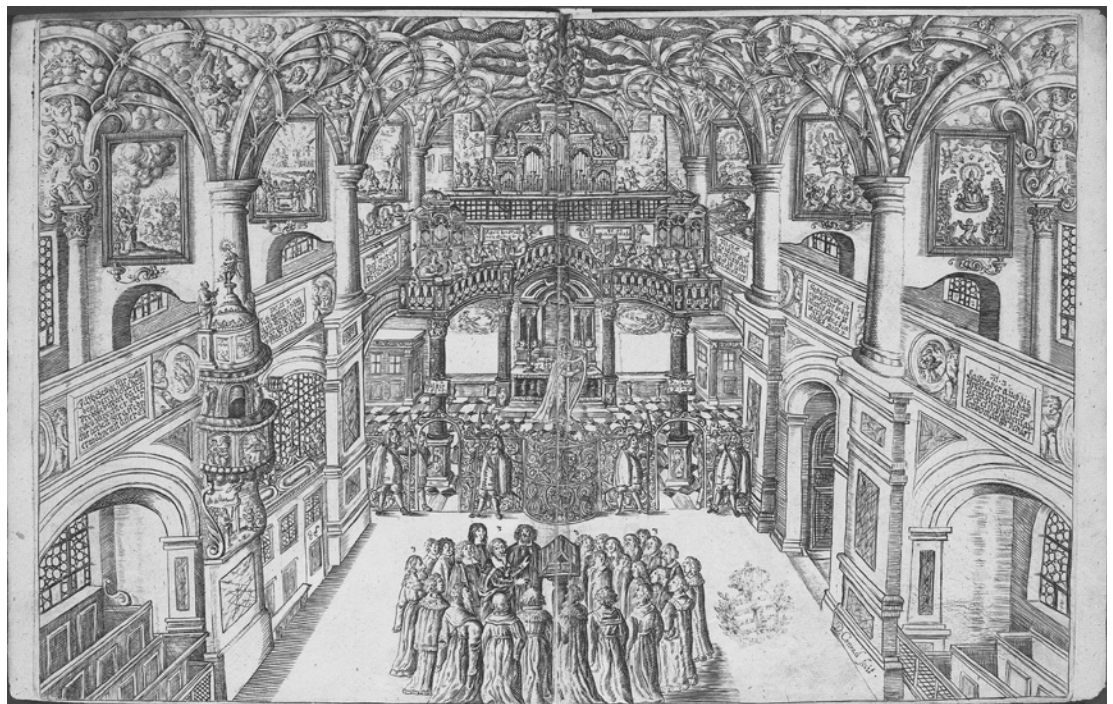


Bild 1

Schlosskapelle Dresden, Kupferstich David Conrad, aus: Christoph Bernhard, Geistreiches Gesangsbuch, Dresden 1676 [Deutsche Fotothek df_dat_0009796]

waren, sondern weiterhin innovativ und aktuell und damit auch dem Zeitstil und Zeitgeschmack zugehörig.

Über 150 Jahre bildete die Schlosskapelle das geistige und nicht zuletzt auch unter Hofkapellmeister Heinrich Schütz (1585 – 1672) das musikalische Zentrum des Landes (Bild 1). Die Bedeutung der protestantischen Schlosskapelle sank unter dem sächsischen Kurfürst Friedrich August II. (zugleich König August III. von Polen) herab. Um die polnische Königskrone erwerben zu können, war der Landesherr zum Katholizismus konvertiert. Die Kapelle wurde 1737 profaniert, zerstört, der Schlossflügel erheblich umgestaltet und fortan anderweitig genutzt.

2 Bestand und Zustand nach 1945

Die Kapelle als liturgischer und kunstvoll ausgestalteter Raum war bereits 1737 verloren. Der Sakralraum war profaniert, die Ausstattung und Einbauten entfernt, lediglich die Raumumfassung beibehalten und der gesamte Bereich für kleinteiligere Nutzungen umgebaut worden. Der westliche Nordflügel als gewachsener und umgestalteter Schlossteil und bauarchäologische Quelle erlebte abermals gravierende Verluste durch die schweren Zerstörungen des Zweiten Weltkrieges (Bild 2). Bereits 1947/1948 erfolgten erste Not-sicherungen durch die Zwingerbauhütte.²

3 Denkmalpflegezielsetzung 1978

Die Ruine stand leidlich gesichert über Jahrzehnte offen, so dass nach 1945 Teile der zunächst noch erhaltenen Oberflächen verloren gingen. Durch die

Umbauten des großen Kapellenraumes zu kleinteiligeren Innenraumnutzungen und nachfolgenden Veränderungen waren die Strukturen des ehemaligen Wandpfeilerraums geschwächt. Trotz aller Schwierigkeiten, die es zu DDR-Zeiten bereitete, ein solches Schloss als ehemaliges Zentrum feudaler Macht zu bewahren, gelang es lokalen Kräften, insbesondere dem Institut für Denkmalpflege, die Ruine vor Abriss oder Sprengung zu schützen und gar Pläne zum Wiederaufbau zu entwickeln (Bild 4). Bereits in den 1970er Jahren wurde dabei ins Auge gefasst, die ehemalige Schlosskapelle zu rekonstruieren. Ein ehemaliger höfischer Sakralraum sollte wiedererstehen, obwohl die politisch motivierten Sprengungen bedeutender Sakralbauten nur wenige Jahre zurücklagen.

Bild 2

Schloss Dresden Großer Hof mit Abbruch der (damals) nicht erhaltbaren Hofwand und beginnenden Neuaufbau [TT Fotoagentur und Verlag Siegfried und Thomas Thienel, 1986/87]

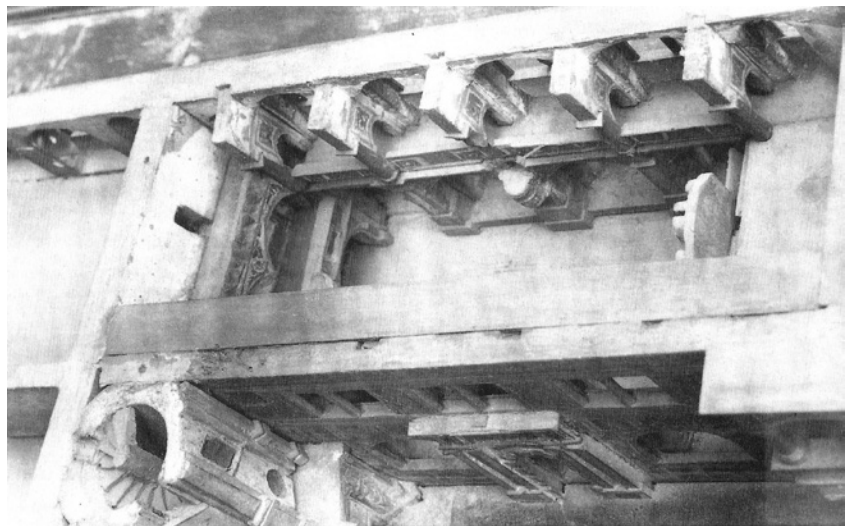
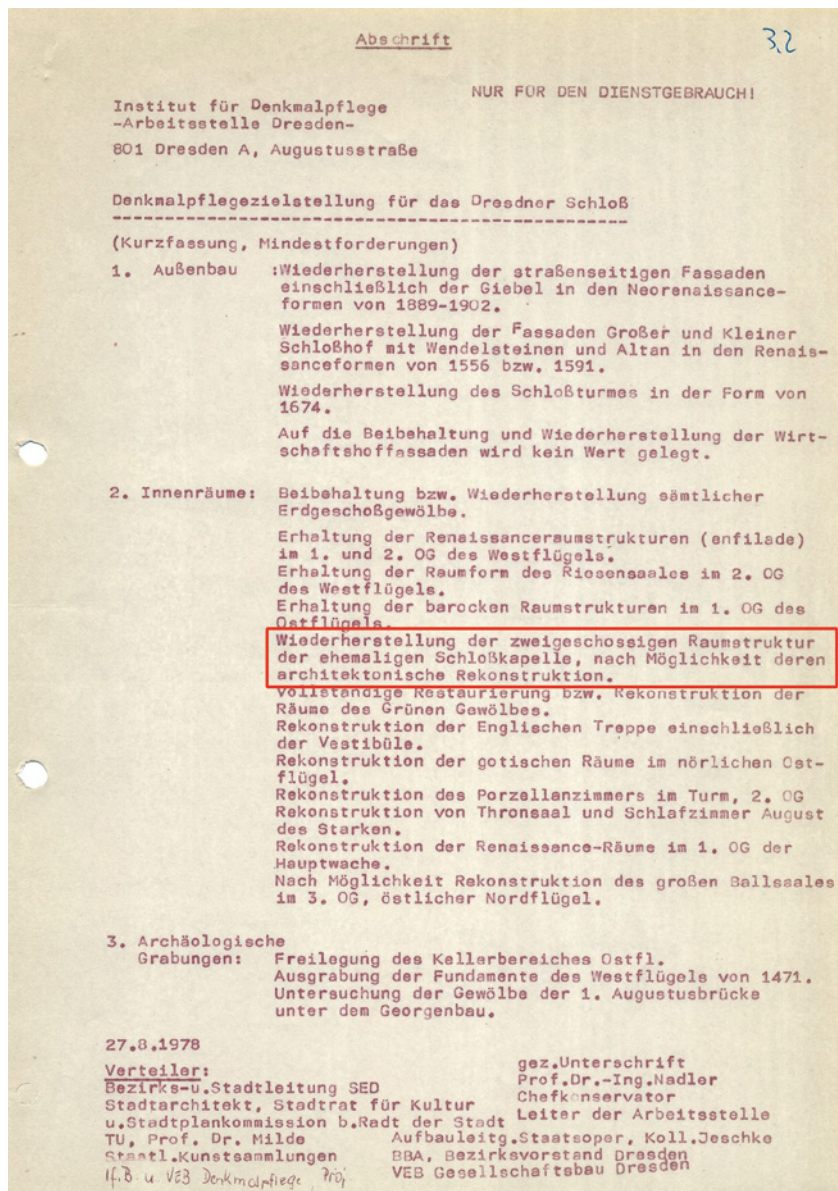


Bild 3

Modell des Schlosses um 1550 (Modell um 1960 zerstört), Einblick in die Schlosskapelle [Rat des Bezirkes Dresden/Institut für Denkmalpflege Dresden/Staatliche Kunstsammlungen Dresden (Hrsg.): Das Dresdner Schloss. Monument sächsischer Geschichte und Kultur, Dresden 1989; Bild 22 Seite 60]

² Glaser, Gerhard: Zerstörung und Bemühungen um den Wiederaufbau. Eine Chronik und die denkmalpflegerische Zielstellung. In: Das Dresdner Schloß. Monument sächsischer Geschichte und Kultur. Eine Ausstellung der Aufbauleitung des Rates des Bezirkes Dresden, der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden und des Instituts für Denkmalpflege Dresden, Ausstellungskatalog 1989, S. 99 – 119; Dülberg; Oelsner; Pohlack 2013 (wie Anm. 1), S. 22.



4 Schlosswiederaufbaukonzept 1980er Jahre

Von der vielbeachteten Aufbauleistung der Dresdner Semperoper konnte das Schloss unmittelbar profitieren. Im Zuge dieser positiven Wirkung der international beachteten Leistung wurde endgültig beschlossen, die Ruine zu bewahren und das Schloss als kulturhistorischen Mittelpunkt der Stadt wiederzubeleben.³ Die erhaltenen baulichen Reste, wertvolle Trümmerteile und Befunde wurden gesichert und unverzüglich mit Rohbauarbeiten begonnen. Gerade noch rechtzeitig konnte die Nordfassade des Schlossflügels im Bestand gerettet werden; die durch Feuer und Wetter zermürbte hofseitige Südfassade ließ sich jedoch nur noch abtragen und neu aufbauen. In dieser frühen Phase wurde sich besonders auf die nördlichen und westlichen Teile konzentriert – und damit auf den Bereich der ehemaligen Schlosskapelle. Innerhalb der kurzen Planung war bereits die Zielsetzung bzw. der Beschluss umgesetzt worden, die bereits 1737 verlorene Schlosskapelle zu rekonstruieren: Die einstigen Wandpfeiler wurden der Kubatur nach in den betonierten Rohbauteilen nachgebildet – dabei einige Befunde integriert – und mit ihnen die instabilen Fassadenabschnitte gesichert.

5 Befunde und Dokumente zum ehemaligen Schlingrippengewölbe

Die Entscheidung zur Schlosskapellenwiederherstellung beruhte auf zahlreichen materiellen und immateriellen Zeugnissen (Bild 5). Die wenigen in der Substanz erhaltenen Reste hätten kaum gereicht, um eine solche Wiederherstellung zu begründen. Wichtiger war, dass schon die Kunstgeschichtsschreibung, insbesondere Cornelius Gurlitt, die ehemalige Schlosskapelle nachhaltig in

Bild 4

Denkmalpflegezielstellung für das Dresdner Schloss vom Chefkonservator Prof. Nadler, Institut für Denkmalpflege Dresden [Nachlass VEB(B) Gesellschaftsbau Dresden, Sicherung Schlosskomplex Dresden – Gutachten und Stellungnahmen, Akte 06/62 170 00]

³ Glaser, Gerhard: Die denkmalpflegerische Konzeption zum Wiederaufbau des Residenzschlosses in Dresden. In: Denkmalpflege in Sachsen 1894–1994, Teil 1, Weimar 1997, S. 157–181; Coulin, Ludwig: Wiederaufbau der Schlosskapelle zwischen 1985 und 2013. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 14–15.



Bild 5

Renaissanceschloss Dresden, Zustand im letzten Drittel des 16. Jahrhunderts, Modell aus dem Jahre 1989 von Franz Brettschneider, Siegfried Winderlich und Martin Wolf [Ausstellung 1989 „Das Dresdner Schloss. Monument sächsischer Geschichte und Kultur“ der Aufbauleitung des Rates des Bezirkes Dresden, der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden und des Instituts für Denkmalpflege Dresden in den Räumen des Grünen Gewölbes; Foto vom Modell s. Titel Ausstellungsband, hier Neuaufnahme: Autoren]

das kulturhistorische Gedächtnis der Stadt implementierte.⁴ Dabei fielen der Kapelle bzw. ihrer einstigen Bedeutung als hof- und kirchenmusikalisches Zentrum und dem erhaltenen und mehrfach translozierten Schlosskapellenportal als hochkarätiges Zeugnis nordalpiner Renaissancebaukunst nicht zu unterschätzende Rollen zu.⁵

Zu den greifbaren und für die Rekonstruktion bzw. spätere Wiederherstellung relevanten Zeugnissen und Befunden der Kapelle und des Gewölbes gehören neben bauarchäologischen Spuren an den erhalten Bauteilen, u. a. die Anschlüsse der nördlichen Wandpfeiler und der Gewölbeanfänger im

Bereich der ehemaligen Emporen, Abrissspuren vom Fußboden und Anfängerreste im Bereich der Westempore, Befunde zur bauzeitlichen Betstube im südwestlichen Kapellenbereich, einige 1986 aufgefundene und geborgene Rippenfragmente der ehemaligen Wölbung, sowie das Schlossmodell (Bild 3), das zu großen Teilen erhaltene Schlossportal und darüber hinaus kriegsversehrte Teile des in der Sophienkirche zweitverwendeten Altares (vor 1662) und des Taufsteins.⁶ Insbesondere sechs der geborgenen Rippenfragmente waren für die Rekonstruktionsvorhaben von Bedeutung, da sie einerseits bewiesen, dass es sich um ein Schlingrippengewölbe mit doppelt gekrümmten Bogenverläufen handelte, sich das genaue Rippenprofil abnehmen ließ und auch Aussagen zur einstigen Gestaltung bspw. der steinernen Schlangenleiber und zur einstmals kräftigen Farbfassung getroffen werden konnten.

4 Gurlitt, Cornelius: Beschreibende Darstellung der älteren Bau- und Kunstdenkmäler des Königreichs Sachsen, Heft 21: Stadt Dresden, Dresden 1903, S. 144 – 167, u. a. mit Bezug auf: Weck, Anton: Der Churf. Sächß. Weitberuffenen Residenz und Haupt Vestung Dresden beschreibt: und Vorstellung, Nürnberg 1680; ferner zur kunsthistorischen Bedeutung der Schlosskapelle u. a.: Krause, Hans-Joachim: Sächsische Schlosskapellen der Renaissance, Das Christliche Denkmal Heft 80, Berlin 1982.

5 Dazu: Schmidt, Eberhard: Der Gottesdienst am kurfürstlichen Hof zu Dresden. Ein Beitrag zur liturgischen Traditionsgeschichte von Johann Walter bis Heinrich Schütz, Berlin 1961; Dülberg, Angelica: „... weitaus die edelste Portalcomposition der ganzen deutschen Renaissance“. Zum Schlosskapellenportal des Dresdner Residenzschlosses. In: Jahrbuch des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen 2004, Beucha 2004, S. 52 – 80.

6 Walther, Hans-Christoph: Dokumentation zur Schlosskapelle im Auftrag des SIB Dresden I, Dresden 2012; Walther, Hans-Christoph: Quellen und Befunde als Rekonstruktionsgrundlage für die Wiederherstellung der Schlosskapelle. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 19 – 26; Bürger, Stefan; Anwand, Jens-Uwe: Das Schlingrippengewölbe – Zur Methode der Formfindung. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 39 – 40.



Bild 6

Modell der Schlosskapelle des Dresdner Residenzschlosses mit Varianten zur Gewölberekonstruktion: hier Netzrippengewölbe, Modell aus dem Jahre 1986 von Franz Brettschneider

Bild 7

Schlosskapelle im Dresdner Renaissanceschloss mit Varianten der Gewölberekonstruktion: hier Schlingrippengewölbe, Modell aus dem Jahre 1986 von Franz Brettschneider [VEB(B) Gesellschaftsbau Dresden (Hrsg.) Sicherung der Bausubstanz – Das Dresdner Schloss Dresden 1989, Seite 19, hier Neuaufnahmen: Autoren]

Bildlich ist die Schlosskapelle in einem Kupferstich von David Conrad von 1676 überliefert (vgl. Bild 1). Ein weiterer, weniger aussagekräftiger Stich stammt aus dem Jahre 1730. Unmittelbar bevor die Schlosskapelle profaniert und zerstört bzw. der Schlossflügel umgestaltet wurde, war der einstige Sakralraum vermessen und in Grund- und Aufrissen dokumentiert worden – jedoch ohne die Wölbung im Detail zu erfassen. Gleiches galt für das Schlossmodell aus dem 16. Jahrhundert, von dem Fotos – und dabei auch Innenansichten des Kapellenraumes – angefertigt worden waren, bevor es durch den Krieg verloren ging (Bild 3). Darüber hinaus existieren einige zeitgenössische und spätere Beschreibungen.

6 Gewölberekonstruktionskonzept der 1980er Jahre

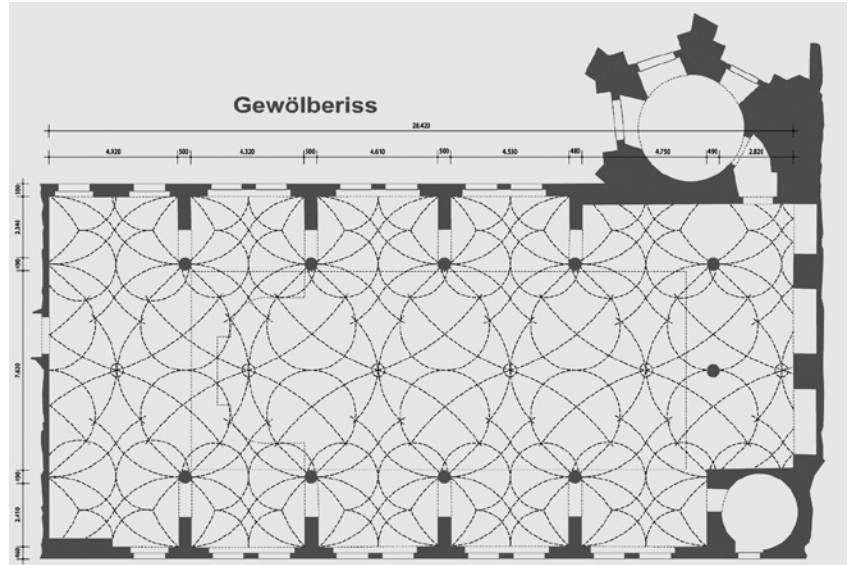
Bereits im Zuge der Schlosssicherung und ersten Wiederherstellungsmaßnahmen war die Rekonstruktion der Schlosskapelle und damit auch die Wiederherstellung ihres einstigen Gewölbes angedacht worden. Die damalige Rekonstruktion, und wie sich zeigen soll war es die erste von drei höchst unterschiedlichen Möglichkeiten und Methoden, sich einer solchen Rekonstruktion zu nähern, sah eine ‚stilistisch/bildkünstlerische Methode‘ vor. Die verlorene Gestaltung sollte wiedergefunden werden, in dem man sich von zwei Seiten dem Formfindungsproblem näherte: Einerseits wurde geschaut, welche baukünstlerischen Leistungen der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts aus wölbtechnischer und vor allem aus gestalterischer Sicht geeignet waren, um eine Vorstellung vom einstigen Gewölbe der Schlosskapelle dem Stil nach zu gewinnen. Was die Raumkubatur anbelangte, galt die Kapelle des Torgauer Schlosses Hartenfels als entscheidende Vorstufe. Hinsichtlich der Gewölbebildung wurde zu Recht auf die Wölbungen der Annenkirche in Annaberg, der Himmelfahrtskirche in Brüg/Most, der Barbarakirche in Kuttenberg/Kutná Hora oder der Marienkirche in Pirna verwiesen.⁷ Von der historisch-stilistischen Kontextualisierung ausgehend wurde versucht, aus dem zweidimensionalen Stich David Conrads eine räumliche Vorstellung abzuleiten. Mehrere Varianten sind entwickelt worden und um deren jeweilige räumliche Wirkung zu überprüfen fertigte Franz Brettschneider ein Schlosskapellenmodell an, mit dessen Hilfe sich die unterschiedlich gestalteten Gewölbezonen wechselnd einbauen und ihrer räumlichen Wirkung nach beurteilen ließen (Bilder 6 und 7). Eine dieser konzipierten Varianten zeigt bspw. eine ‚Blütensternfiguration‘ wie sie in vereinfachter Form das Mittelschiff der Barbarakirche in Kuttenberg aufweist.

7 Magirius, Heinrich: Schritte der Annäherung an ein fast verlorenes Baudenkmal, die evangelische Hofkapelle im Dresdner Residenzschloss. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 10 – 12; Bürger, Stefan; Anwand, Jens-Uwe: Das Schlingrippengewölbe – Zur Methode der Formfindung. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 39 – 41.

Das mit gängigen, vor allem stilistischen Methoden der Zeit konzipierte Gewölbe sollte mit Natur- und Backsteinen realisiert werden. Das Modell zeigt eine Gewölbegeometrie, bei der die Rippen auf einen kreuzgratgewölbeartigen Wölbgrund appliziert worden wären. Von Vorteil hätte sein können, dass die Kreuzgewölbeform leicht konzipierbar und statisch beherrschbar geworden wäre. Die Rippen wären als sekundäre Elemente behandelt worden; man hätte immerhin eine bildhafte Annäherung an eine spätgotische Gewölbeform erreicht. Nachteilig bzw. schwerer beherrschbar wären die exakte Geometrie und die Verläufe der Rippen gewesen. Zahlreiche Versuche und Entscheidungen hätten notwendig sein müssen, um sich anhand der sekundären Bildquellen der einstigen Gestaltung des Raumes anzunähern. Annäherungen über Stilempfinden und Raumwirkungen wären die maßgeblich methodischen Grundlagen für das bildkünstlerische Verfahren dieser Rekonstruktion gewesen – im Sinne einer Nachbildung eines räumlichen Gebildes anhand eines zweidimensionalen Abbildes.⁸

7 Gewölbewiederherstellungskonzepte 2008

Im Zuge der schrittweisen Auf- und Ausbaumaßnahmen der Nachwendezeit war beabsichtigt, die Paraderäume im zweiten Obergeschoss und auch des westlichen Nordflügels wiederherzustellen. Im Vorfeld wurde entschieden, über die Gestaltung des Schlosskapellengewölbes neu nachzudenken, da es später schwer bis unmöglich sein würde, unter dem Boden der Paraderäume massive Decken- bzw. Wölbarbeiten durchzuführen. Inzwischen war aus architekturhistorischer Sicht hinsichtlich des spätmittelalterlichen Gewölbebaus der Kenntnisstand weiter fortgeschritten und es war klar, dass eine solche Raumgestaltung und -wirkung primär von der Gestaltung des Rippenwerks auszugehen habe. Den Rippen als primären Gestaltungselementen war bei der Konzeption mehr Aufmerksam-



keit zu schenken, als der Struktur der Wölbschale bzw. des Kappenwerks.

Von der nachbildenden Methode wurde Abstand genommen und versucht, eine neue, zweite Methode zu entwickeln. In einem neuen, nunmehr zweiten Anlauf extrahierte das beauftragte Architekturbüro Anwand aus dem Kupferstich David Conrads durch Projektion und Spiegelung der erkennbaren Rippenverläufe in den Grundriss ein Lineament. Durch den ‚Rückbau‘ bildkünstlerischer Bestandteile und perspektivischer Bildmittel konnte mit dieser ‚geometrischen Methode‘ ein System von Bogenlinien ‚re‘-konstruiert werden, die zusammengekommen als Wölbriss dienen sollten, um davon ausgehend das Rippen- und Kappenwerk zu konzipieren (Bild 8).⁹ Von Vorteil war, dass die Wiederherstellungsmethode der Prämisse folgte, dass ein solches Schlingrippengewölbe von der geometrischen Konstruktion der Rippenlinien her entworfen und gebaut worden war. Allerdings war vor dem Hintergrund der Kenntnis, wie ein figuriertes Gewölbe räumlich über einem planimetrischen Wölbriss ausgetragen würde, abzusehen, dass ein solches Lineament mit wechselnden Radien und einer atypischen Geometrie und Kappenbeschaffenheit sich ebenfalls einer spätgotischen Gewölbegestaltung nur annähern würde. Keinesfalls wäre

Bild 8

Wölbriss zur 2. Methode – die verworfen wurde – mit jenen aus dem Kupferstich extrahierten und in den Grundriss projizierten Rippenverläufen; zu sehen sind eine Vielzahl verwirrender Bogenlinien mit unterschiedlichen Radien; die Bogenverläufe sind zwar so genau als möglich aus der Bildvorlage rekonstruiert, doch ungeeignet für eine Bogenaustragung, letztlich weil es dem Zeichner aus seiner perspektivischen Ansicht des Gewölbes nicht möglich oder wichtig war, die Konstruktionen geometrisch genau wiederzugeben. [Architekturbüro Anwand, Jens Teupel, Archiv Stefan Bürger]

⁸ Dazu: Bürger, Stefan: Re-Konstruktion eines Prozesses. Der Nachbau des Schlingrippengewölbes in der Dresdner Schlosskapelle. In: Popp, Dietmar; Korduba, Piotr (Hrsg.): Re-Konstruktionen. Stadt, Raum, Museum, 2019 (Betrag in Vorbereitung zum Druck).

⁹ Bürger, Stefan; Anwand, Jens-Uwe: Das Schlingrippengewölbe – Zur Methode der Formfindung. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 42 – 47.

es möglich gewesen, mit den Entwurfsmethoden des 15./16. Jahrhunderts diese diskontinuierlichen Bogenverläufe räumlich auszutragen und davon ausgehend das Rippenwerk als entsprechendes Flächentragwerk zu konzipieren und in Werk- und Backstein umzusetzen.

Die dritte Wiederherstellungsmethode sollte dagegen von anderen Prämissen ausgehen. Nicht ein ‚Bild‘ (der Stich von David Conrad) sollte als Primärquelle zur ‚Nachbildung‘ veranschlagt werden, sondern allein die Kenntnis, wie Werkmeister um 1550 ein solches Gewölbe gebaut hätten. Ein entsprechender Bauprozess in Form einer ‚werkmeisterlichen Methode‘ sollte – in seinen Einzelschritten so eng wie möglich an den theoretisch rekonstruierten Entwurfs- und Bauphasen werkmeisterlicher Handhabungen – ‚nachgebildet‘ werden. Am Ende der Prozesse sollte bestenfalls ein Gewölbe(bild) entstehen, das den verfügbaren Bildquellen so weit wie möglich entsprach. Da diese prozess-rekonstruierende Methode, was die Formfindung anbelangt, auf einfachen Prämissen und leicht kontrollierbaren Verfahrensschritten beruhen würde, wurde 2008 innerhalb kurzer Zeit entschieden, das Schlingrippengewölbe in einer Rohbauform – d. h. ohne bildkünstlerische Anteile, auch ohne Putz und Farbfassung – wiederherzustellen.¹⁰

8 Rekonstruktion des Rippenwerks, Entwurfsprozess

Die spätgotische Wölbkunst basiert auf sehr einfachen Prinzipien bzw. Handhabungen. Für viele Verfahrensschritte des Entwerfens und Bauens war es günstig, wenn alle Rippen über einheitliche Radien verfügten. Im Prinzip folgen die Verfahrensweisen für den Entwurf und Bau figurierter Gewölbe den Grundlagen zum Kreuzrippengewölbebau: Von den Anfängern ausgehend verlaufen die Rippenprofile auf einer Bogenlinie zum höchsten Scheitelpunkt im Gewölbe, der bei Kreuzgewölben in der Regel den Jochmittelpunkt bildet. Bei Kreuzgewölben sind Anfänger und Scheitelpunkt (Schlussstein) durch den Rippenbogen direkt mit-

einander verbunden. Bei figurierten Gewölben sind Anfänger und Scheitelpunkt ebenfalls durch einen Bogen (den sog. Prinzipalbogen) miteinander verbunden. Doch verlaufen diese Bögen nicht in direkter Linie von den Anfängern aufsteigend zu den höchsten Scheitelpunkten, sondern folgend den gewinkelten (im Forschungsdiskurs auch alternativ gesehen als abzuwickelnden) Linienverläufen des Wölbrisses.

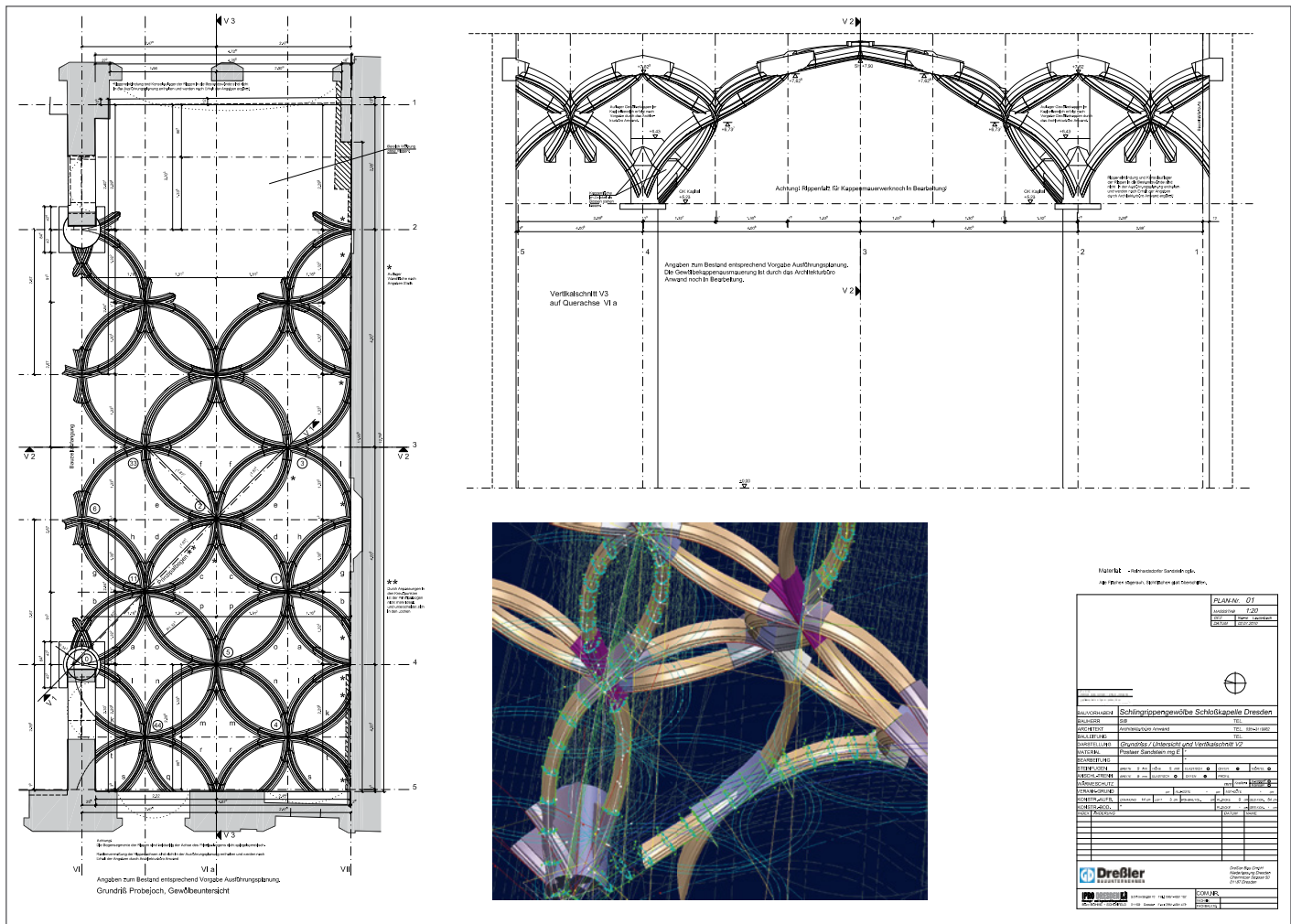
Sollte sich das Rippenwerk aus doppelt gekrümmten Bogenrippen (gewundene Reihungen, Schlingrippen) zusammenfügen, bedeutete das, dass diese sich im Grundriss als gleichförmig große Kreislinien abzeichnen mussten (Bild 9); und die über diesen Kreislinien aufgerissenen Prinzipalbögen folgten im räumlichen Verlauf ihren geschwungenen Formen (Abwicklung). Über jeder Bogenlinie im Grundriss schwingt sich somit eine Bogenlinie im Aufriss empor. Aber nicht jedes Liniensystem im Grundriss (bspw. das der zweiten Methode) lässt sich mit Prinzipalbögen im Aufriss sinnvoll austragen.

Das Verfahren basiert dabei auf festen Regeln, die enge Grenzen setzen. Dies hat den Vorteil, dass sich das Verfahren leicht handhaben und kontrollieren lässt. Aber die Grund- und Aufrissmaße und Befunde des Raumes müssen zu den diesbezüglichen Parametern und Prämissen passen. D. h. wenn sich ein Wölbriss aus gleichgroßen Kreis(segment)en zusammenfügen soll, dann muss die Grundrissgeometrie bei Figurationen, die in der Fläche aus gleichgroßen Kreisen bestehen¹¹, sich zwangsläufig aus Quadrat(teilen) zusammensetzen.¹² Allerdings entsprach ein Jochformat der

¹⁰ Die Projektleitung seitens des Auftraggebers oblag Holger Krause (SIB); leitender Architekt war Jens-Uwe Anwand (Architekturbüro Anwand).

¹¹ Anders ist dies bei sog. Schleifensternfigurationen, deren Scheitelfigur geometrisch auf einem Sechseck basiert – eingeschrieben in einem Umkreis im Maß der kleineren Jochbreite; vgl. Nachweise zu den Konstruktionsverfahren Benedikt Rieds für den Wladislawsaal, die Schneckenstiege und das Wladislawatorium auf dem Prager Hradschin (Norbert Nußbaum; Thomas Bauer; Jörg Lauterbach, div. Beiträge in INSITU) sowie zu Jacob Haylmanns Gewölben für St. Annen in Annaberg und Mariä Himmelfahrt in Most/Brüx (Vortrag Thomas Bauer; Jörg Lauterbach auf der Tagung „Werkmeister im Konflikt – Der Annaberger Hüttenstreit und andere Streitfälle im Bauwesen des 15. und frühen 16. Jahrhunderts“, 28.09.2018 Dresden, Publikation in Vorbereitung)

¹² Bürger; Anwand 2013 (wie Anm. 9), S. 52 – 63.



Schlosskapelle keinem solchen Regellaß. Diesbezüglich war zu berücksichtigen, dass die damaligen Werkmeister in der Lage waren, baukünstlerischen Mehrwert zu schaffen, in dem sie die Wölbrißdispositionen und -gestaltungen von den Grundrissen ablösten: D.h. die Wölbriß eines gewölbten Joches besaßen nicht selten Maße, die sich nicht mit den Grundrissen deckten. Im Falle der Schlosskapelle sollten sich die Wölbjoch entlang der Jochgrenzen überlappen und zwar in dem Maß der Mauerstärke der dortigen Wandpfeiler. Dadurch überschritten sich die Figurationen und bewirkten im Bereich der Anfänger über den tuskischen Säulen eine artifizielle Formverdichtung durch sich über- und unterschneidende Rippenzüge. Die Wölbrißgeometrie beruhte in einem Mittelschiffjoch – also der Länge nach über ein solches Grundrissjoch hinausreichend – auf einem Quadratraster im Maßverhältnis von 2 : 3. Genau dies ließ sich durch Nachmessungen im Raum und

in den Rissen des 18. Jahrhunderts nachprüfen und bestätigen. In dieses Raster ließ sich ein einfaches System aus Kreislinien einzeichnen.

Für solche Schlingrippengewölbe gab es eine lange Vorentwicklung: Entsprechende Wölbungen haben sich in der Kirche in Neusohl/Banská Bystrica, im niederösterreichischen Landhaus (Landtag) in Wien und im Zwickauer Gewandhaus erhalten oder sind, wie das mit Dresden eng verwandte, leider kriegszerstörte Gewölbe der ehemaligen Erasmuskapelle im Berliner Stadtschloss in Vorkriegsfotos überliefert. An solchen formverwandten Gewölben ließen sich später zahlreiche Detailgestaltungen der Rippenverläufe und Kappenstrukturen untersuchen und ggf. überprüfen.¹³ Das ehemalige Berliner

13 Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg: Die Schlingrippen der Gewölbe – Erasmuskapelle Berlin, Rotbergkapelle Basler Münster, Landhauskapelle Wien, Eleemosynariuskapelle Banská Bystrica, Ratssaal Bunzlau/Bolesławiec, Rathaus Löwenberg/Lwówek Śląski, Dresden 2011.

Bild 9
Steintechnische Werkplanung Jörg Lauterbach; Thomas Bauer (für Dreßler Bau GmbH/IPRO) auf der Basis der Entwicklung der unteren Rippenmittellinien und dem Abgriff der Befundrippen von AB Anwand/Stefan Bürger [Autoren, Planarchiv bauer lauterbach]



Bild 10

Rippenbefund (eine der ausgegrabenen Schlingrippenwerkstücke), welcher zum Abgriff der Krümmungsradien der Bogenaustragung (Aufriss), der Schlingrippenfigur (Grundriss) als auch dem Rippenprofil diente; das Werkstück ist in die Rekonstruktion wieder mit eingebaut worden [Foto: Rainer Böhme]

Gewölbe wies ebenfalls solche artifiziellen Rippenanfänger auf, wie sie dem Stich von Conrad nach wohl auch die Dresdner Schlosskapellenwölbung besessen hatte.

Einen etwas größeren gestalterischen Spielraum besaßen die damaligen Werkmeister im Bereich der Binnenfiguration. Der Geometrie nach hätte man die Kreisbogenfiguration in dieser Weise stringent

umsetzen können. Dabei wären im Scheitelbereich der Gurtlinien linsenartige Kleinstkappen entstanden, für die es im Bereich der obersächsischen Wölbkunst keine Parallelen besaß. Das verwandte Berliner Gewölbe hatte genau in diesem Bereich massive Gurtbögen mit Renaissance Dekorationen im Bereich der hohen, frei stehenden Kapellensäulen zur statischen Fassung erhalten. Durch die darüber einlaufenden Rippenfigurationen konnten kleine Linsenfelder vermieden werden. In jedem Fall wurde entschieden, die künftigen Kreisbögen in diesem Bereich etwas anzupassen, so dass sich benachbarte Kreisbögen nicht entlang der Gurtlinie überschneiden, sondern lediglich berührten. Bemerkenswert ist, dass ein erhaltener Wölbriss zur Kapelle von Schloss Grimmenstein in Gotha (der uns 2008/2009 noch nicht bekannt war), genau eine solche Anpassung zeigt. Ansonsten wurde soweit möglich auf sekundäre Rippenzüge oder weitere artifizielle Eingriffe verzichtet, auch wenn zu unterstellen ist, dass den damaligen Auftraggebern und Werkmeistern an der kunstvollsten Raumgestaltung gelegen haben dürfte. Der Form, wie sich ein Wölbriss aus Kreislinien zusammenfügt, war damit engen Grenzen gesetzt. Verfahren und Formgebung ließen sich leicht umsetzen und kontrollieren.



Bild 11 a+b

Befund eines Rippenanfängers, Profilansatz mit Dübelloch in einem erhaltenen Mauerwerks Pfeiler an der Nordaußenwand; diente zur Verifizierung der Höhenlage der Wölbanfänger [Foto: Autoren]



Unbekannt war, und einem Wölbriss nicht unmittelbar zu entnehmen ist, in welcher Höhen-dimension sich die Kreislinien über den Bogenlinien im Wölbriss entwickeln. Hier standen glücklicherweise die Aufmaße des 18. Jahrhunderts zur Verfügung: Die Höhe der Anfänger war durch die Höhe der Säulenkapitelle im Raum festgelegt. Und das Gewölbe konnte sich nur soweit emporschwingen, wie es die ebenfalls bekannte Höhe des darüber liegenden Fußbodens der Paradezimmer zuließ. Es wurde schnell deutlich, dass sich über dem geschwungenen Bogenverlauf von einem Pfeiler zum Scheitelpunkt kein voller Viertelkreisbogen aufziehen lassen wird, sondern jeweils nur ein Teil des Bogens, so dass zum einen der Gewölbestich insgesamt deutlich kleiner werden würde, zum anderen die Rippenanfänger sich nicht aus der Senkrechten herauslösen, sondern bereits mit stärkeren Winkelmaßen aus den Pfeilern und Wänden hervortreten würden (Bild 11).

Durch diese Parameter des Raumes und Prämissen des Verfahrens standen die Linienverläufe im Grund- bzw. im Wölbriss fest und damit auch der Verlauf der aufsteigenden Prinzipalbögen im Raum. Diese, das Gewölbe definierenden Linien laufen in spätgotischen Gewölben genau auf der Unterseite der Rippenprofile entlang. Meist sind die Risslinien an den Rippenwerkstücken noch zu sehen. Es ist somit nur noch notwendig, das Rippenprofil (deren Rippenprofil-Mittelsenkrechte/Rippenprofil-lotachse immer tangential zum Kreisbogen verlaufend) an den jeweils flankierenden Fugenflächen der Rippenstücke anzureißen und diese Profilflanken mit Reißziehle oder freihändig (so die Erfahrungen in Dresden) steinmetzseitig auszuarbeiten. Die kompliziert erscheinenden Rippen-durchdringungen, Hinter- und Überschneidungen entstehen somit nicht durch aufwändige Detailentwürfe, sondern unweigerlich durch das Einhalten einer sehr einfachen Entwurfslogik entsprechend der rationalen Prinzipalbogengeometrie. Das Rippenprofil war durch die aufgefundenen Rippenstücke bekannt.

Anmerkung: Zu sehen war, dass die Rippenfunde doppelte Krümmungen aufweisen. Allerdings waren die Rippenfunde kaum geeignet, die Raum- und Wölbgeometrie zu rekonstruieren. Die Bogensteine

reichten nur bedingt aus, um die Radien genau zu ermitteln. Zudem besteht durch das Zusammenspiel von gebogener Grundrisslinie und gebogener Aufrisslinie kaum eine Möglichkeit exakt vorzubestimmen, wo sich das Bogenstück einst befunden hat – bzw. umgekehrt. Bei unterschiedlichen Annahmen, wo sich das Rippenstück im Gewölbe befunden hat, ergeben sich zwangsläufig unterschiedliche Maßgaben für ein entsprechend zu rekonstruierendes Gewölbe. Es musste also erst ein Verfahren rekonstruiert und ein Gewölbe entworfen und gebaut werden, um zu prüfen, ob das Rippenstück zum Gewölbe passt – und wenn ja, an welcher Stelle (Bild 10).

9 Herstellung des Probejochs

Für die Fragen der Formbildung und -gestaltung wäre der Bau eines Probejochs nicht zwingend notwendig gewesen (Bilder 12 und 13). Allerdings stellte das avisierte Gewölbebauprojekt besondere Herausforderungen an die Statik, denn das künftige Tragwerk musste nach deutschem Baurecht entworfen, geprüft, genehmigt und errichtet werden. Die 2017 mit dem Ulrich-Finsterwalder-Ingenieurbaupreis ausgezeichnete ingenieurtechnische Leistung beruhte ebenfalls auf einfachen statischen Vorüberlegungen und Prämissen.¹⁴ Es wurde zunächst davon ausgegangen, dass ein hölzernes Lehrgerüst, das Rippenwerk aus Werksteinen und das Kappenwerk aus Backsteinen jeweils drei separate Tragwerke bilden. Das Lehrgerüst kann sich selbst tragen und auch die Last der zu versetzenden Rippensteine. Das Rippenwerk ist in der Lage, zunächst noch im Verbund mit dem hölzernen Lehrgerüst stehend, die Last des nachfolgend aufgemauerten Kappenwerks aufzunehmen und Lasten auf das aufgehende Mauerwerk der Wände und Pfeiler abzuleiten (Bild 14). Während das Holzgerüst später entfernt wird, verbleibt das Rippenwerk als ‚steinernes Lehrgerüst‘ im Gewölbe. Inwieweit es für die eigenständige Tragfähigkeit des

14 Bürger, Stefan; Kröning, Matthias: Das Rippengewölbe als komplexes Tragwerk. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 96 – 107.

Bild 12

Entwurf zum Probejoch: Entwicklung der Rippenfiguration mit sog. Drahtmodell der Rippenbasislinien (Mittellinie auf der Stegunterseite) auf Grundlage der Befunde von Raummodell, Kupferstich, Befunden an Schlingrippenfragmenten und Höhen der Wölbanfänger durch Architekturbüro Anwand und Stefan Bürger [Architekturbüro Anwand, Archiv Stefan Bürger]

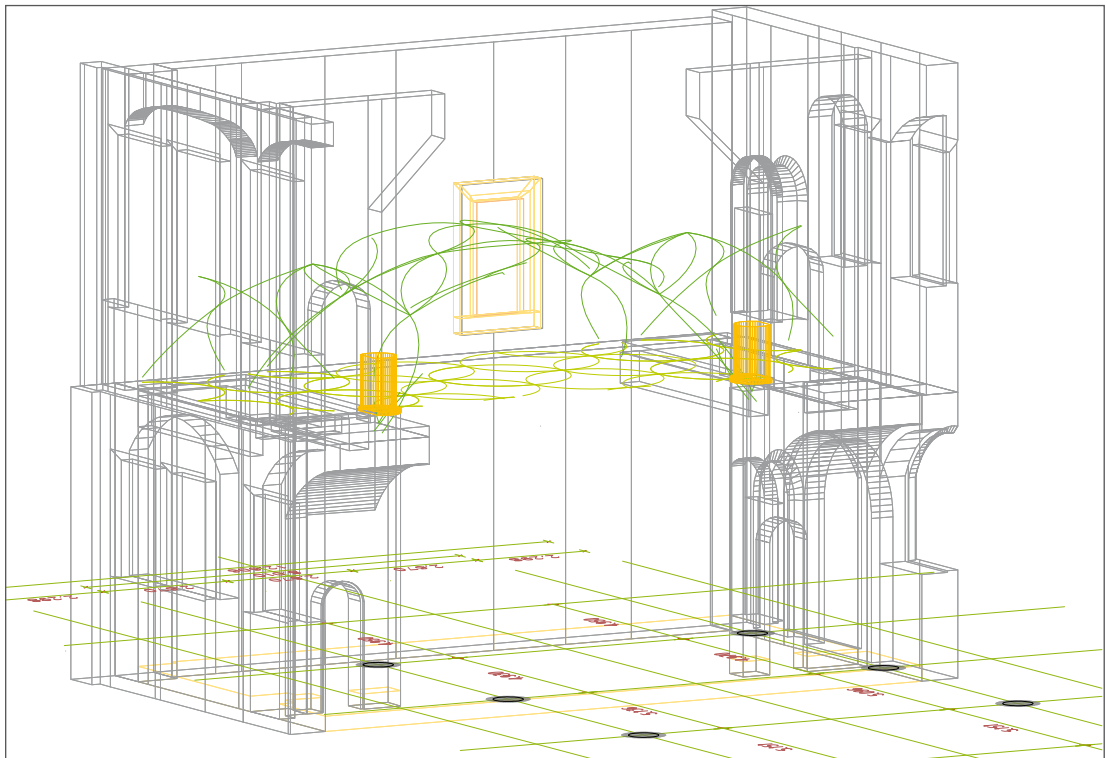
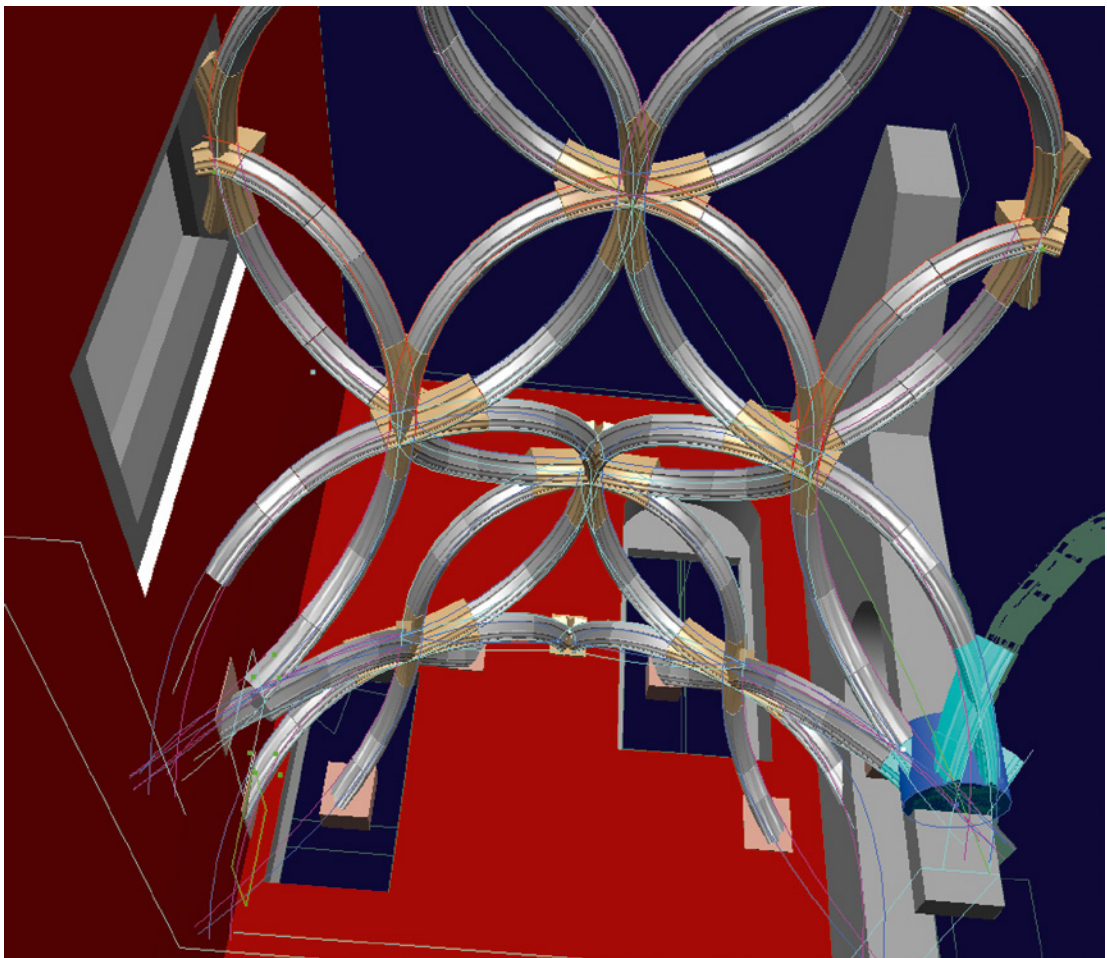


Bild 13

Entwurf zum Probejoch: Entwicklung eines 3D-modellierten Rippenkörpermodells inkl. aller Krümmungen als steintechnische Werkplanung für die Ausführung des Probejoches durch Jörg Lauterbach und Thomas Bauer für Dreßler Bau GmbH/IPRO auf Grundlage des Figurationsentwurfs von Architekturbüro Anwand und Stefan Bürger [Autoren, Planarchiv bauer lauterbach]



Kappenwerks im letztendlichen Lastzustand zwingend notwendig wäre, ist in der bisherigen Forschung umstritten und wird teils kontrovers diskutiert.¹⁵

Dem Ingenieurbüro Kröning-Ulbrich-Schröter oblag es, diese Vorstellungen und entsprechend formalen Prämissen in statische Modelle zur Wölbung zu überführen. Das Lehrgerüst wurde von Thomas Bauer und Christian Willich entwickelt, konstruiert und statisch nachgewiesen.

Im Ergebnis zeigte sich, nachdem insbesondere durch Matthias Kröning alle bekannten Lastabtragungsmodelle berücksichtigt und simuliert worden waren, dass alle computergestützten Modellierungen, statischen Berechnungen und Lastsimulationen nicht ausreichen würden, um den Lastabtrag eines schlingrippengewölbten Joches rechnerisch nachweisen zu können und somit eine Genehmigung für das Tragwerk zu erreichen. Aus diesem Grunde wurde entschieden, ein Probejoch (aus technologischen Gründen auf ehemaliger Emporenhöhe) im Maßstab 1 : 1 herzustellen, dabei alle Bauphasen einmal zu durchlaufen, um ein Gewölbe zu errichten, das sich anschließend einem Belastungstest unterziehen ließe, um die Tragfähigkeit zu prüfen und nachzuweisen.

Bei dem Belastungsversuch¹⁶ wurden im Probejoch – in welchem bei einem Drittel keine Rippen verbaut worden waren, sondern die Wölbung allein aus Kappenmauerwerk bestand – u. a. das Spannungs-Dehnungsverhalten untersucht und durch das Experiment belegt, dass die Wölbschale vom Kappenmauerwerk allein getragen wird, da messtechnisch in Bereichen mit und ohne Rippen identische Werte erfasst wurden (Bild 15).



Bild 14
Schlingrippenherleitung am Probejoch, sog. Strickmodell von Thomas Bauer; Jörg Lauterbach: Aufriss der Schlingrippenfigur im Grundriss (rote Stricke), geometrische Lagebezug der Rippenfuge (gelbe Stricke) und Höhenlagen der Bogenaustragung (blaue Stricke) [Strickmodell Thomas Bauer; Jörg Lauterbach; Foto: M. Ventas]

Mit dem Entwurf und Aufzug der Prinzipalbögen wurde am Probejoch aber nicht nur die Formgebung des Rippenwerks und seiner Bogenwerkstücke festgelegt, sondern zugleich auch der geometrischen Bogenaustragung folgend die Höhenpunkte für das hölzerne Lehrgerüst. Anders als man dies von (bspw. römischen und romanischen) Gewölben mit Vollschalungen oder von (gotischen) Lehrgerüsten zur Unterstützung der Rippenbögen kennt, ist es für figurierte Gewölbe mit kleinteiligen Rippenlängen und Kappenflächen nicht notwendig und auch nicht sinnvoll, aufwändige Schalungen und Lehrbogenkonstruktionen herzustellen.¹⁷

15 Fehr, Götz: Benedikt Ried, München 1961, S. 27–29; Müller, Werner; Quien, Norbert: Virtuelle Steinmetzkunst der österreichischen und böhmisch-sächsischen Spätgotik, Petersberg 2005, S. 8–11; Bürger/Kröning 2013 (wie Anm. 14), bes. S. 105–106.

16 Kröning, Matthias; Opitz, Heinz: Rechnerische und experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten des Schlingrippengewölbes in der Schützkapelle des Dresdner Schlosses, In: Manfred Curbach, Heinz Opitz, Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.): 7. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen; Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden, Heft 32, 2013, S. 155–169

17 Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg: Die Ausführung des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden, Abschnitt 1.1. „Lehrgerüstkonzept“, In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden, hrsg. vom Staatsministerium der Finanzen des Freistaates Sachsen, Altenburg 2013, S. 128–132; sowie: Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg: Rekonstruktion des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden – Teil II: Lehrgerüste, Bauzustände und Verformung der Wölbung, In: Bundesverband öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger e.V. (Hrsg.) Der Sachverständige. Fachzeitschrift für Sachverständige, Kammern, Gerichte und Behörden, 43. Jg. Heft 5/2016, S. 119–128.



Bild 15 Probejoch mit Belastungsversuch des Otto-Mohr-Labors der Technischen Universität Dresden über Untersuchungen zum Spannungs-Dehnungsverlauf der Wölbung [Foto: Autoren]

Bild 16 Steinmetzarbeit am Schlingrippenknoten auf dem Werkplatz der Firma Fuchs+Girke Bau- und Denkmalpflege GmbH in Ottendorf-Okrilla mittels sechsseitiger Schablonen der steintechnischen Werkplanung [Foto: Thomas Bauer]

Die Erkenntnisse zur Konzipierung eines Lehrgerüsts, wie sie beim Probejoch zum Einsatz kamen, folgten zunächst den zusammenfassenden Forschungen von Stefan Bürger, wonach bei kleinteilig figurierten Gewölben es im Prinzip ausreicht, die Kreuzpunktsteine (Knotenpunkte) durch vertikale Ständer zu unterstützen. Auf dem Wölboden (Reißboden) wird dafür der Wölbriss im Maßstab 1 : 1 aufgerissen.¹⁸ Dort, wo sich Linien kreuzen, werden Stammhölzer aufrichtet und untereinander fixiert. Die jeweilige Höhe der Stammhölzer lässt sich den Prinzipalbögen entnehmen: Dafür

18 Bürger, Stefan: Figurierte Gewölbe zwischen Saale und Neiße – Spätgotische Wölbkunst von 1400 bis 1600, Diss., Weimar 2007, Bd. 1, bes. S. 321–327.

werden die Teilstrecken – der Bogenabschnitte von Rippenknoten(-kreuzung) zu Rippenknoten – von einem Anfänger bis zum Scheitelpunkt auf einer geraden Grundlinie nacheinander abgetragen. Danach wird über dieser aus Teilabschnitten kumulierten Grundlinie (im 16. Jh. Zwerchlinie genannt) ein Kreisbogen (zumeist Viertelkreis) geschlagen. Bei einem Viertelkreisbogen dient der Endpunkt der Grundlinie (gemäß dem Scheitelpunkt des Gewölbes) als Mittelpunkt der Kreislinie des Prinzipalbogens. Über den Anfangs- bzw. Endpunkten der kumulierten Streckenabschnitte werden lotrechte Linien aufgezogen, die sich mit dem Prinzipalbogen schneiden. Die jeweiligen Längen der Senkrechten zwischen der Grundlinie und dem Kreisbogen der Bogenausragung ergeben dann die Höhen der jeweiligen Lage des betreffenden Kreuzungssteines bzw. davon ableitend die Höhe des Lehrgerüsts an diesem Punkt. Dieses Verfahren lässt sich mit einfachen Zeichenwerkzeugen über maßstäblich verkleinerten Wölb- und Lehrgerüstentwürfen simulieren, wie auch im Maßstab 1 : 1 auf dem Reißboden beim Herstellen und Aufrichten des Lehrgerüsts umsetzen.

Ein wichtiger Moment, um die Richtigkeit aller Annahmen zu prüfen, war das Einpassen eines der großen Fundstücke, um zu sehen, ob dieses zum hergestellten Gewölbe passt (Bild 10). Tatsächlich ließ sich der Werkstein in das Rippensystem einfügen, genau an der Position im Bereich nahe der Anfänger, die man vorab (aufgrund der abgefasten Rückseite) gemutmaßte hatte. Dieses Ergebnis war ein weiteres und wichtiges Indiz und Beweisstück dahingehend, dass sich die Herstellung des Gewölbes einer Wiederherstellung des ehemaligen Gewölbes annäherte.

Beim Versatz wurden dann – anders als die landläufige Vorstellung – alle Kreuzungs- und Schlusssteine (d. h. die in den Quellen genannten Schlosssteine, die mehr als zwei Rippenstücke koppeln) auf diesen Stammhölzern zuerst versetzt. Dabei müssen alle Kreuzpunktsteine zunächst ohne Kontakt zueinander gemäß jenen durch Bogenausragung ermittelten Höhenmaßen exakt versetzt, d. h. ihrer Höhe nach aufgerichtet werden (Bild 17). Beim Arbeiten am Probejoch ergab sich zunächst die Schwierigkeit, da die Kreuzpunktsteine an ihren Unterseiten kunstvolle Rippenprofilierungen, dage-

gen keine waagerechten Basislinien oder -flächen und zudem materialeitige Schwächungen aufweisen, dass sich die Werkstücke nicht direkt auf die Holzstämme des Lehrgerüsts setzen ließen. Annahmen neuzeitlicher Quellen stellten sich als nicht praktikabel heraus.¹⁹ Diesbezüglich halfen Untersuchungen an vergleichbaren Gewölben bspw. der St. Barbarakirche in Kuttenberg/Kutná Hora und St. Marien in Pirna weiter, wo wölboberseitig Rippenkreuzungssteine erkennbar sind, die zwischen den Rippenschenkeln Steinzwickel mit waagerechter Ober- und wohl auch Unterseite besitzen. Von dieser Beobachtung ausgehend, war es möglich, die Stammhölzer des Lehrgerüsts im Kopfbereich durch kleinere ‚Zwickelstützen‘ in der Weise aufzustocken, dass sich auf diesen Stützen das jeweilige Werkstück absetzen ließ. Da kein Lehrgerüst aus dem 15./16. Jahrhundert mehr existiert, lässt sich diese Methode kaum nachprüfen: Doch wie angedeutet, wurde unterstellt, dass die einfachste Methode der historisch gebräuchlichen am nächsten kommen müsste. Eine andere Untersuchung nahm die an spätgotischen Rippenwerken bzw. deren Kreuzpunktsteinen nicht selten zu findenden Metalldübel in den Blick, an denen später oftmals Wappen, Sterne o. a. appliziert wurden. Es ist denkbar, dass diese Bolzen – wenn, dann zumeist an allen Kreuzpunkten eines Gewölbes zu finden – im Versatzprozess zunächst zur drehbaren Arretierung auf den Stammhölzern dienten, um die Steine zu fixieren und gleichzeitig zur Ausrichtung drehbar zu lagern.²⁰ Von einem weiteren Nachvollzug dieses Verfahrens wurde abgesehen, um die Rohform des Gewölbes nicht durch Dübel zu verunklären, denn bildkünstlerische Ausgestaltungen und Applikationen waren vorerst nicht geplant.

Anschließend mussten, durch Drehung in der Horizontalen, alle Kreuzpunktsteine auch untereinander ausgerichtet werden. Auch hier halfen einfache Mittel und Verfahren des Spätmittelalters viel wei-



ter. Bei Schlosssteinen der Wappensaalwölbung auf der Albrechtsburg in Meißen war beobachtet worden, dass die Schlosssteine des Gewölbeinnenbereichs trotz ihrer leicht unterschiedlichen Höhe im Raum auf ihrer Rückseite ebene Oberflächen erhielten, die zum einen exakt waagrecht sind und zudem diese Flächen auf gleicher Höhe lagen. Auf den planen Oberseiten waren Linien aufgerissen, die exakt den Verbindungslinien zwischen zwei Kreuzpunkten entsprachen. Diese Flächen ließen sich mittels Setzwaage (Lotwaage, heute Wasserwaage) leicht so ausrichten, dass die Werkstücke nicht im Raum kippten. Mit den Risslinien konnten mittels Richtscheit und/oder Richtschnüren die Steine untereinander ausgerichtet werden,

Bild 17 Lehrgerüst für den Versatz der Rippenknoten aus unbesäumten Baumstämmen mit Zwickelstempel zur exakten Positionierung und Haltung nach Vorgabe von Höhen- und Lagepunkten der steintechnischen Werkplanung gemäß der Vorgaben von Bauer/Lauterbach [Foto: Thomas Bauer]

¹⁹ Vgl. Simon Garcia: *Compendio de Architectura y Simetria de los Templos*, 1681, fol. 25r (Seite 24); Foto: Ms. 8884, Biblioteca Nacional de Espana, www.bne.es, Zugriff 16.04.2016.

²⁰ Beispiele: St. Marien Pirna, Schlosskirche Chemnitz, Marktkirche Halle u. v. m. Auch der Stich von David Konrad zeigt an allen Rippenkreuzungen applizierte Sterne, die an solchen Eisendübeln befestigt worden sein dürften.



Bild 18
Nach dem Versatz der Rippenknoten ist das Rippenwerk im Prinzip bezüglich aller Rippenaus- und -einfälle hinsichtlich der Höhen und Grundrisslage definiert; danach können die Rippenstücke freihändig zwischen die Knoten eingepasst werden, die Behelfshölzer (Bretter/Knaggen) geben die Form nicht vor, sondern unterstützen lediglich temporär die Lagerung der Werkstücke (Foto: Thomas Bauer)

Bild 19
Der Versatz des vollständigen Rippenwerks zwischen den Rippenknoten erfolgt freihändig, da bereits im Zuge der Rippenfertigung alle Formvorgaben definiert sind; nur so lassen sich alle etwaigen Toleranzen bzw. Abweichungen aus Vermessung, Lehrgerüstbau, Fertigung und Versatz ausgleichen [Konzept zum Steinversatz Thomas Bauer; Jörg Lauterbach, Foto: Rainer Böhme]

so dass sich ihre Drehung und Ausrichtung im Raum festlegen ließ. Der Befund konnte durch weitere Beobachtungen bspw. am Gewölbe von St. Marien in Pirna bestätigt werden, wo solche ebenen, oberseitigen Steinoberflächen auch an Rippenkreuzungen vorhanden sind (auch in lateralen Lagen der steil aufsteigenden Anfängerbereiche). Dies ließ vermuten, dass die Meißner Befunde Relikte eines handwerklich gebräuchlichen Verfahrens darstellten. Die erste Generation der für das Probejoch gefertigten Werkstücke besaß diese Oberseiten mit Risslinien noch nicht. Alle späteren Werkstücke der Schlosskapellenwölbung wurden analog zu den Meißner Befunden hergestellt und mit leichtem Verfahren im Raum versetzt.

Danach waren die Rippenstücke zwischen diese Schlosssteine einzubinden (Bilder 18 und 19). Waren am Anfang noch komplizierte Lehrbögen bzw. massivere Hilfskonstruktionen zur Unterstützung der Rippenbahnen konzipiert und hergestellt worden, zeigte sich im Bauprozess wie zu erwarten schnell, dass nur wenige Punkte einer temporären Unterstützung bedurften, um einen Rippenabschnitt zwischen zwei Kreuzpunkten zu versetzen. Das Lehrgerüst dünnte sich im Laufe des Lern- und Bauprozesses deutlich aus, behinderte dadurch auch weniger die Arbeiten der Versetzer und Maurer.

Das Einbinden der Rippen zwischen die – die Wölbung im Versatz definierenden – Rippenknoten des Probejochs brachte eine erstaunliche Erkenntnis: Nicht nur, dass man keinen Holzlehrbogen zum Versetzen der Steinrippenbögen zwischen den Knoten benötigt, sondern es wäre sogar kontraproduktiv, da es dann kaum möglich ist, Toleranzen – durch Fertigung, Lehrgerüst, Versatz und Vermessung bedingte Maßabweichungen – auszugleichen. Und die Rippen zwischen den Knoten mit ihren Fugen sind die einzige Möglichkeit, innerhalb eines raumüberspannenden Gewölbes Fertigungs- und Versatztoleranzen auszugleichen.

10 Bau des Rippenwerks, Bauprozess

Nach erfolgreichem Belastungstest und Auswertung zum Probejoch wurde das Gewölbe jochweise errichtet (Bild 20): Der Arbeits- und Reißboden in Höhe der Wölbanfänger wurde dem Vorschlag von Thomas Bauer folgend als Stahlrahmenkonstruktion ausgebildet sowie ein Andienen der Werksteine von oben mit einen bautemporären, fahrbaren Stahl-Portalkran vorgesehen. Beide vorgenannten Hilfsmittel weichen gegenüber hölzernen Vorbildern des 15./16. Jahrhunderts zweifellos ab, die Prinzipien, mit ihnen ein Gewölbe zu bauen, sind aber die gleichen.

Eine Fertigungsfolge bestand aus folgenden Phasen:

- Übertragung des Wölbrisses auf dem Reißboden,
- Bau der Lehrkonstruktion über den Kreuzpunkten,
- Einlassen der Auflagersteine in die Pfeiler und Mauern,
- Versetzen und Ausrichten der Schlosssteine,
- dann Versetzen und Vermörteln der Rippensteine.

Im Unterschied zu vielen Gewölben des 15. und 16. Jahrhunderts wurden die Steine untereinander nicht mit handgeschmiedeten oder hölzernen kantigen Dollen verdübelt²¹, sondern mit runden geriffelten Edelstahlbolzen.²² Dafür sind keine quadratischen Dübellöcher in die Fugenseiten der Werkstücke eingemeißelt worden, sondern Bohrungen angelegt. Auch wurden dann diese Dübel nicht mit Blei verlassen, sondern mit Mörtel vergossen. Zur zusätzlichen statischen Sicherung sind auf die Dübel gelochte Metallbänder aufgefädelt worden,

die dann aus rein vorsorglichen Gründen in das spätere Kappenmauerwerk eingebunden wurden, um zukünftig ein mögliches Ablösen und Herabfallen von Rippenstücken ausschließen zu können.²³

11 Jochweises Bauen eines Gewölberippenwerkes

Eine der großen Fragen zum Bau spätgotischer, figurierter Gewölbe stand seit Anfang der steintechnischen Werkplanung und Planung des Lehrgerüsts im Raum: Wie sind die Werkleute im Mittelalter mit dem Bauzustand zwischen verschiedenen Arbeitsständen mehrerer Joche – insbesondere dem Gewölbeschub zwischen zwei Jochen – bautemporär umgegangen? An den umfassenden Seitenwänden konnte der Gewölbeschub durch die zuvor gemauerten aufgehenden Außenwände mit Strebepfeilern (oder Wandpfeilerkirchen mit innenliegender Schubaufnahme) aufgenommen werden. Wo aber wurde während des Baues – als z. B. Joch 3 fertig war und mit Joch 4 erst begonnen wurde – der Gewölbeschub bautemporär zwischen den Jochen abgeleitet? Oder gar die Frage, kann man ein Joch fertig bauen ohne das benachbarte Joch begonnen zu haben? Mittelalterliche Quellen zu Beschreibungen von Bauabläufen bei Wölbungen sind rar und unpräzise, vermitteln aber gleichlautend die Vorstellung, dass im Verlauf von Wölbarbeiten auch Rüstarbeiten bspw. mit „bogstellen“ durchgeführt wurden.²⁴ Aber in keiner bislang bekannten Quelle kann man sinngemäß etwas zu solchen temporären Bauzuständen oder statischen Verhältnissen wie Schubaufnahmen lesen. Die Problematik beim jochweisen Bauen eines Gewölbes besteht darin, dass wenn z. B. Joch 3 für sich allein gebaut wird (was bedeutet, dass zur Schubaufnah-

21 Es gibt genauso eine signifikante Anzahl bedeutender und großer spätgotischer Gewölbe, deren Befunde eine dübellose Verbindung der Steinrippen belegen, so u. a. St. Peter und Paul in Melnik/Böhmen von 1486 sowie der überwiegende Teil aller Gewölbe der Burg Ofen in Buda um 1500; siehe dazu: Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg; Nußbaum, Norbert: Die Königssäle Wladislaws II. in Buda und Prag. Erörterungen über Benedikt Rieds Beitrag zur Hofkunst der Jagiellonen. In: INSITU, Zeitschrift für Architekturgeschichte, 10. Jg. Heft 2, 2018, S. 227 – 242, hier S. 232 und Anm. 39.

22 Die Ausführung von Rippendübeln folgte dabei – unabhängig der Dübelform – der in Pirna an der spätgotischen Wölbung 1500 festgestellten Schleifdübeltechnologie (heutzutage auch als Ziestifte bezeichnet), vgl. Albrecht Sturm: Kapitel „Kunst der Fuge“. In: Sturm, Albrecht (Hrsg.): Die Stadtkirche St. Marien zu Pirna, Pirna 2005, S. 41 – 42.

23 Das teilweise Lösen und Abfallen von einzelnen Rippen an spätgotischen Gewölben ist ein gängiges Schadbild; letztendlich bestätigt dies, dass das Kappenwerk tragender Teil der Wölbung ist und der Rippen im Endtragzustand nicht bedürfen. Beispielgebend dazu der Ratsaal Löwenberg/Lwowek Slaski vor seiner Sanierung in den 1960er Jahren. Fotos belegen die Wölbung mit bis auf die Anfänger vollständig abgefallenen Rippen; siehe Bauer/Lauterbach 2011 (wie Anm. 13), S. 53.

24 Dazu ist ein Projekt zu den überlieferten Beschreibungen zum sog. Kleinen Chor der Schlosskirche Wittenberg seitens der Autoren in Arbeit.



Bild 20

Gesamtaufnahme des wiederhergestellten Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle in Dresden mit neuzeitlichem Arbeitsboden gemäß Sonder-vorschlag von Thomas Bauer; Das Stahlrahmengerüst ist bereits teilweise zurückgebaut. [Foto: Rainer Böhme]

me Strebestützen ins Feld von Joch 4 gesetzt werden müssten) und danach das Lehrgerüst ins Joch 4 umgesetzt wird, müsste ein Teil des Gerüsts zur Schubaufnahme von J3 zu J4 (nämlich die schubaufnehmenden Strebestützen) stehen bleiben und würde Lehrgerüst und Arbeiten am J4 behindern. Zudem reifte im Verlauf die Erkenntnis, dass der Gewölbeschub sich im Wesentlichen erst dann aufbaut, wenn die Mauerwerkswölbung über die versetzten Rippen geführt wird, da für das Dresdner Gewölbe bspw. das Lastverhältnis Mauerwerkschale/Rippenwerk ca. 4 : 1 beträgt. Aus diesen beiden Überlegungen heraus wurde die Technologie abgeleitet, dass zum Rippenversatz immer mindestens das nächste Joch mit Holzlehrgerüst bereits gebaut sein musste (zur Schubaufnahme aus dem Sandsteinrippenwerk) sowie zur Mauerwerkswölbung immer mindestens das nächste Joch mit Rippenwerk (und dem folgend auch das übernächste mit Holzlehrgerüst) versetzt und vergossen, d. h. verdübelt sein muss. Dass dies hypothetisch auch für die Wölbbauweisen des 15./16. Jahrhunderts anzunehmen ist, erschließt sich allein rückwirkend aus der Erfahrung, dass ein jochweises Einrücken und Einwölben (Lehrgerüstbau und Rippenversatz) nicht funktionieren kann.

Auf die frei gewölbten – d. h. ohne flächige Holzschalungen gemauerte – Gewölbekappen aus Handstrichziegeln und auf der Baustelle angerührten Kalkspatzenmörtel wird in diesem Beitrag zur Natursteintagung 2019 nicht weiter eingegangen, da es den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde.²⁵

12 Die Fertigung der Werksteinrippen

Die Fertigung von Werksteinrippen und Rippenknoten als zweifach gekrümmte Schlingrippen stellte den spannendsten Teil der Rekonstruktionsarbeiten dar (Bild 16). Basis bildete die Dissertation von Stefan Bürger²⁶ welche den bisherigen, vor allem auf den Vorarbeiten von Werner Müller basierenden Forschungsstand zusammenfasste sowie eigene Folgerungen aufzeigte.²⁷ Diesbezüg-

²⁵ Bauer, Thomas; Neuling, Kay; Huber, Ralf: Das Freie Wölben über den Schlingrippen der Schlosskapelle Dresden, In: Mauerwerk 18 (2014) Heft 5, S. 314 – 322.

²⁶ Bürger 2007 (wie Anm. 18).

²⁷ Werner Müller; Norbert Quien, wie Anm. 14; Werner Müller 1974: Einflüsse der österreichischen und der

lich war interessant, dass erste Versuche der praktischen Steinplanung – noch ohne Studium der Forschung – letztendlich zum ähnlichen Ergebnis kamen, wie zuvor von Werner Müller und Stefan Bürger beschrieben. Dies betraf insbesondere die formbestimmenden Ableitungen der Rippenkörper aus dem Grund- bzw. Wölbriss. Demnach wird der Rippenkörper im Grundriss von einem Mantelring eines Zylinders – in Breite des Rippenkörpers – umschrieben, so dass im ersten Schritt (gemäß historischer Fertigung) der Mantelring aus dem Rohblock geschlagen wurde. Danach erfolgte jeweils auf der gekrümmten Ansichtsseite des Mantelringes der Auftrag der Bogenaustragung für das betreffende Rippenteilstück.

Diesbezüglich gehen bis heute die Meinungen auseinander: Während Werner Müller davon ausging, dass einstmals eine gekrümmte biegbare Schablone zur Bogenaustragung auf den Mantelring aufgelegt wurde, um den Bogenverlauf anzureißen, ging die Steinplanung (Bauer/Lauterbach) davon aus, einzelne Höhenpunkte aus dem Riss der Bogenaustragung abzugreifen und auf den Mantelring ab- bzw. aufzutragen. Zudem wird diese Frage zum Auftrag der Bogenaustragung auf den Mantelring überlagert von der Frage, ob die Bogenaustragung als ‚Abwicklung‘ oder als ‚Orthogonalprojektion‘ konstruiert wurde. Werner Müller wies zwar schon 1974 nach, dass der Maßunterschied nur ca. 1,6% beträgt und so im Rahmen anderer feststellbarer Toleranzen (z. B. Fertigung/Versatz) lag.²⁸ Der Diskurs betrifft im Wesentlichen die Frage, wie die einzig bekannte Textquelle zur Fertigung einer „gewundenen Reihung“ – Lorenz Lechlers Unterweisungen an seinen Sohn von 1516 – zu interpretieren und bautechnisch umzusetzen wä-

re.²⁹ Diese Frage wird die Forschung auch weiterhin beschäftigen.³⁰

Das Ziel, sowohl historische Rippenwerksformen nachzubilden und dabei bestenfalls auch Kosten zu senken, war nicht nur eine für die Dresdner Rekonstruktion spezifische Vorgabe,³¹ sondern steht regelmäßig bei einer Reihe angedachten Rekonstruktionen historischer Steinkonstruktionen an.

Diesbezüglich brachte dieser Wiederherstellungsprozess des Dresdner Schlosskapellengewölbes einen doppelten Gewinn: Zum einen konnten durch das praktische Verfahren zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden, die in nachfolgende wissenschaftliche Forschungen einfließen, zum anderen erwies sich, dass sich durch die Neuorientierung zeitgemäßer Technologien auf historische solche derartige Tragwerkstrukturen durchaus kostensenkend ‚rekonstruieren‘, d. h. dem Verfahren nach neu herstellen ließen.

böhmisch-sächsischen Spätgotik in den Gewölbestrukturen des Jacob Facht von Andernach, In: Wiener Jahrbuch für Kunstgeschichte XXVII 1974, S. 65 – 82; Werner Müller; Norbert Quien: Spätgotik Virtuell, Weimar 1999; Werner Müller; Norbert Quien: Erdachte Formen Errechnete Bilder, Weimar 2000; Werner Müller: Steinmetzgeometrie zwischen Spätgotik und Barock, Petersberg 2002.

28 spätere Befunde – siehe hier insbesondere die laufenden Forschungen Norbert Nußbaum, Thomas Bauer, Jörg Lauterbach auf dem Burgberg in Budapest an ca. 300 ausgegrabenen spätgotischen Rippenwerkstücken – zeigen eben auch das es u. E. keine einheitliche sondern mehrere verschiedene Herstellverfahren gab, was anhand von Risslinien nachweisbar ist.

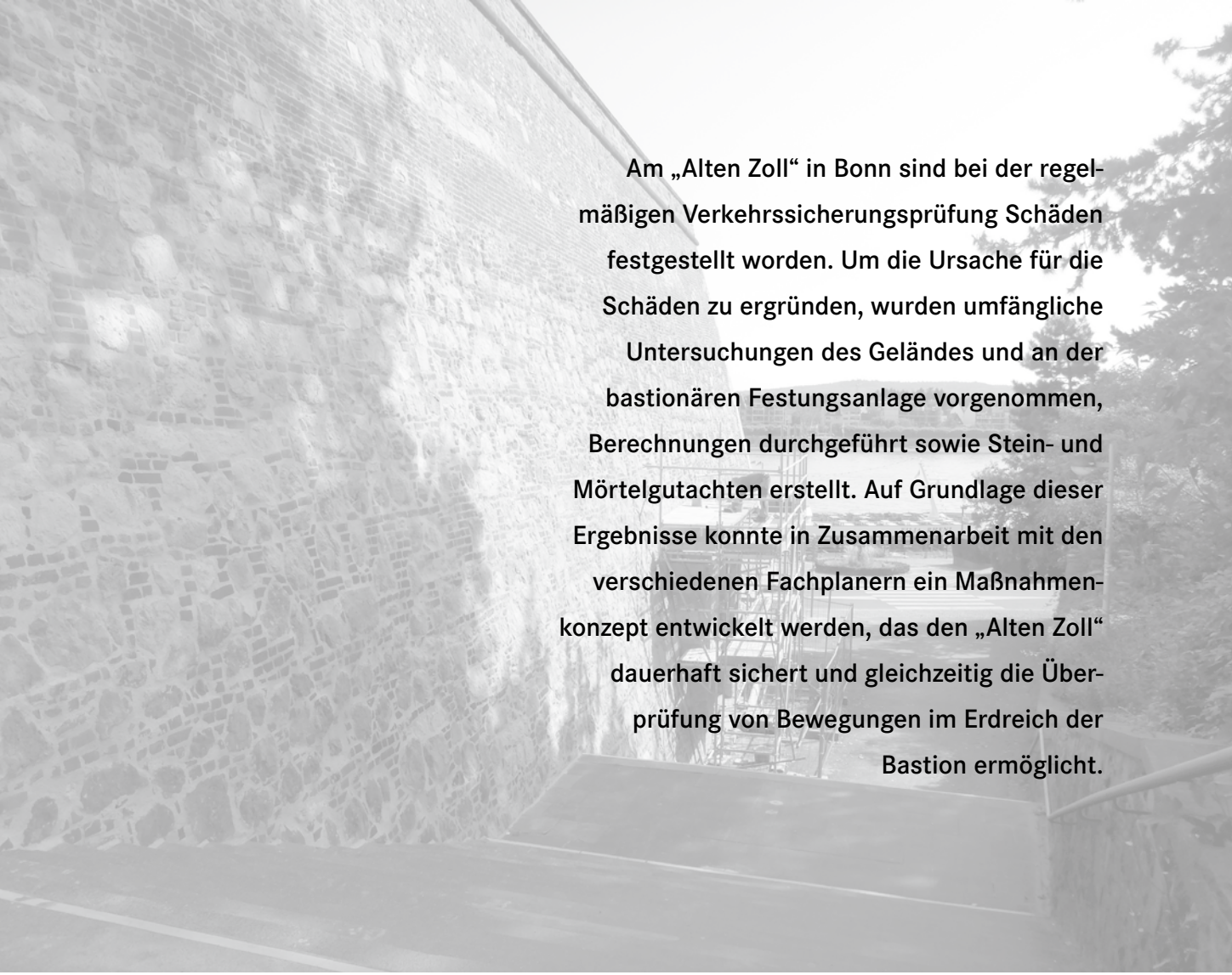
29 Coenen, Ulrich: Die spätgotischen Werkmeisterbücher in Deutschland, München 1990, S. 15 – 24 und 174 – 266.

30 Zum Vergleich der zwei verschiedenen Fertigungsansätze von Schlingrippen inkl. bebildeter Darstellung zu den Fertigungsabfolgen: siehe Bauer; Lauterbach 2011 (wie Anm. 13), kostenfreier Download: www.schlingrippe.de/Publikationen.

31 Aktuelle Veröffentlichungen beschreiben die Herangehensweise der Dresdner Steinplanung unzutreffend: „... wurden die Rippen mit einem parametrischen Modell abgebildet ...“ sowie „... Dieses moderne, am Computer realisierte Beschreibungsmodell wurde verwendet, weil das spätgotische Verfahren der Steinplanung damals noch nicht beschrieben war ...“, vgl. Wendland, David: Architekturgeschichte live. In: Bürger, Stefan; Kallweit, Ludwig (Hrsg.): Capriccio & Architektur – Das Spiel mit der Baukunst, Berlin/München 2017, S. 117 – 125. Die computergestützte Steinplanung am 3D-Modell für das Dresdner Schlosskapellengewölbe erfolgte einzig mit dem Ziel, die Rohblockgrößen der Steinrippen signifikant zu minimieren und die Kosten im avisierten Rahmen zu senken. Traditionell gefertigte Rippen werden von großen Rohblöcken ausgehend aus vertikalen und horizontalen Flächen umschrieben; hingegen das Dresdner Verfahren konnte geneigte Rippen (entsprechend Einbaulage) auch in kleineren Rohblöcken umschreiben und mittels sechsseitigen Schablonen fertigen.

Dreikönigenbastion „Alter Zoll“ Bonn – Werkbericht zur Instandsetzung, Restaurierung und Rückverankerung

von Markus Sandner, Barbara Schmitz und Thorsten Behrendt



Am „Alten Zoll“ in Bonn sind bei der regelmäßigen Verkehrssicherungsprüfung Schäden festgestellt worden. Um die Ursache für die Schäden zu ergründen, wurden umfangreiche Untersuchungen des Geländes und an der bastionären Festungsanlage vorgenommen, Berechnungen durchgeführt sowie Stein- und Mörtelgutachten erstellt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Fachplanern ein Maßnahmenkonzept entwickelt werden, das den „Alten Zoll“ dauerhaft sichert und gleichzeitig die Überprüfung von Bewegungen im Erdreich der Bastion ermöglicht.

1 Baugeschichte

Seit dem Mittelalter dienten Befestigungsanlagen einer Stadt dem Schutz vor Angreifern und sollten damit sowohl die Stadtbevölkerung als auch deren Besitz schützen. Solche Anlagen waren ein Privileg, das durch das Befestigungsrecht verliehen wurde.

Bild 1

Der „Alte Zoll“ von Rheinseite nach Fertigstellung der Sanierungsmaßnahme Ende 2017

Bild 2

Über die Jahre war das Bauwerk mit Efeu zugewachsen. Die zunehmend desolante Substanz, Risse und Verformungen wurden erst nach dem Entfernen des Bewuchses in vollem Ausmaß ersichtlich.

1.1 Die Befestigungsgeschichte Bonns

Die Bonner Stadtbefestigung hat sich im Lauf der Geschichte mehrfach verändert. Die bekanntesten Überbleibsel und sichtbar im Stadtbild sind der „Alte Zoll“ und das „Sterntor“. Der Alte Zoll bildete den linksrheinischen Uferabschluss im Süden der ehemaligen Haupt- und Landesfestung Kurkölns.



Im Groben kann die Befestigungsgeschichte Bonns drei Phasen zugeordnet werden.

Die erste Stadtmauer umgrenzte im 10. Jahrhundert das Areal von Münsterplatz und Römerplatz, die sogenannte „villa basilica“. Das Bonner Münster war als Grabkirche der Märtyrer Cassius und Florentius kultisches Zentrum dieser Stiftsstadt, die eine der Keimzellen für die spätere Stadtentwicklung bildete.

Die zweite Phase in der Befestigungsgeschichte beginnt 1244 mit dem Privileg des Kölner Erzbischofs für die Bonner Bevölkerung, ihre bislang unbefestigte Marktsiedlung vor den Toren der „villa basilica“ zu umwehren. Das nunmehr umwehrte Gebiet war etwa fünfmal so groß wie die alte Kirchenburg und bot bis in das 19. Jahrhundert hinein ausreichend Siedlungsraum.

Doch obwohl der Siedlungsraum ausreichend war, mussten die Wehrbauten dem technischen Fortschritt angepasst werden. Der Einsatz des Schießpulvers revolutionierte im 15. Jahrhundert die Kriegsführung. Die mittelalterlichen Stadtmauern boten gegen die neue Artillerie keinen Schutz mehr. Es kam zur Entwicklung und zum Bau moderner Bastionsbefestigungen. Dies geschah auch in Bonn – die dritte Phase. In diesem Zusammenhang wurde ab 1642 auch die über die mittelalterliche Stadtmauer hinausgeschobene Bastion Zoll erbaut, die ihren Namen von der hier bestehenden Zollstation ableitete, an die sich nach Norden der Rheinkran und die Rheinwerft anschlossen. Die Fertigstellung des Bauwerks erfolgte 1644, zwei Jahre nach Beginn der Bauarbeiten.

1.2 Baugeschichte des Bereichs „Alter Zoll“

Das Gebiet um den Alten Zoll ist seit der Erbauung der bastionären Befestigungsanlage vielfach baulich und auch städtebaulich verändert worden. Die Dreikönigenbastion, wie der Alte Zoll seit 1702 eigentlich heißt, ist bis auf den heutigen Tag jedoch in ihrer Gestalt nahezu unverändert erhalten geblieben. Auf der Nordseite ist die Bastion wohl vor 1860 um ein Rondell erweitert worden, wann genau, ist unklar.

Das Bauwerk liegt am Hang des Rheinufer und wird zu drei Seiten – nach Norden, Osten und Süden – von massiven bis zu 15 m hohen Stützmauern begrenzt. Nach Westen hin läuft das Gelände in den etwas tiefer liegenden Stadtgarten aus. Die Bastion verfügt über eine Grundfläche von circa 1.000 m² und das Mauerwerk reicht mit einer Neigung von ca. 6° bis zur Brustwehr.

In der Südflanke der Bastion ist auf Rheinufer-niveau das feindseitige Festungstor aus massiven Natursteinquadern zu sehen. Heute zugemauert, bildet es den Rahmen für das Husarenehrenmal. Im Inneren wird das Bauwerk von einem in nord-südlicher Richtung verlaufenden Gang durchzogen, dessen Ausgang in das Festungsvorland ursprünglich eben dieses Tor darstellte. Der stadtseitige Zugang ist durch Umbauten im 19. Jahrhundert verändert worden.

Im 18. Jahrhundert erfolgten die Entfestigung der Stadt und der Ausbau zur Barockresidenz. Als einzige Bauwerke überstanden der Alte Zoll und das Sterntor die Schleifung der Befestigungsanlagen 1717/1718, wobei das Sterntor heute nicht mehr an seinem ursprünglichen Platz steht.

Während der Entfestigung der Stadt und des Ausbaus zur Barockresidenz blieb der Alte Zoll erhalten. Der vom Kurfürsten Joseph Clemens beauftragte Baumeister Robert de Cotte bezog den Alten Zoll in die heute noch das Stadtbild prägende Anlage ein. Die barocke Achse, die de Cotte Landschaft und Gebäude verbindend vom Kreuzberg über das Poppelsdorfer Sommerschloss bis zur Residenz zog, findet am Alten Zoll ihren östlichen Abschlusspunkt. Im barocken Gesamtkonzept des 18. Jahrhunderts wurde der Alte Zoll als friedlicher Aussichtspunkt genutzt. Die „Schlossterrasse“ erfreute sich als Gegenstand von Reiseliteratur und romantisch-gefühlsbetonter Malerei großer Beliebtheit. So bemerkte Johann Wolfgang von Goethe am 27. Juli 1815 zur Rheinansicht, „dass man sich eines Versuchs, sie mit Worten zu beschreiben, kaum enthalten kann“.

Während des II. Weltkrieges wurde der Alte Zoll durch Bombentreffer stark beschädigt. Bilder nach dem Krieg dokumentieren die Zerstörung auf dem

Plateau. Die Reparaturen der Nachkriegszeit können anhand von deutlich erkennbaren Materialunterschieden im Mauerwerksverband nachvollzogen werden. Die im Krieg zerstörte Balustrade wurde bei der Reparatur durch eine gemauerte Brüstung ersetzt.

Leider sind die verfügbaren Planunterlagen und andere historische Zeugnisse zur Erbauung, den Umbauten und Reparaturen nur unvollständig erhalten. Zum Teil liegen zu den einzelnen Bauphasen gar keine Unterlagen vor. Daher sind viele Annahmen zur Baugeschichte, Nutzung und Umbauten sowie Reparaturen nur Teile in einem noch unvollständigen Gesamtbild.

Die Zollbastion ist heute vom Rhein aus betrachtet stadtbildprägend für Bonn (Bild 1). Seit 1865 befindet sich auf dem Plateau das Ernst-Moritz-Arndt-Denkmal. 1871 sind zwei französische Salutkanonen, die Kaiser Wilhelm I. der Universität Bonn schenkte, hinzugekommen.

Die Dreikönigenbastion ging vor 1865 zusammen mit dem Kurfürstlichen Schloss in den Besitz der 1818 gegründeten Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn über. Damit gehört der Alte Zoll heute zu den Liegenschaften des Landes Nordrhein-Westfalen.

2 Sichtbare Schäden als Anlass für Untersuchungen und Maßnahmen

Im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Verkehrssicherungsprüfung wurden im Jahr 2012 Schäden am Mauerwerk und im Brüstungsbereich der Bastion „Alter Zoll“ festgestellt. Eine genaue Beurteilung des Schadensausmaßes am Mauerwerk war aufgrund des starken Bewuchses mit Efeu und anderen Pflanzenarten jedoch nur begrenzt möglich (Bild 2). Aus diesem Grund sind 2012 in zwei Etappen alle Seiten des Bauwerks vom Pflanzenbewuchs befreit worden. Durch die Freilegung und die anschließende Untersuchung des Mauerwerks wurden diverse Schäden an der Baukonstruktion sichtbar (Bilder 3 und 4). Daraus

Bild 3

Die Südostecke drohte aufgrund von Durchwurzelung und ausgewaschenem Fugenmörtel abzugehen. Ein weiterer Grund für die massiven Schäden besteht in den nur notdürftig ausgeführten Reparaturen der Nachkriegszeit.

Bild 4

Die bei den Untersuchungen festgestellten Risse machten die Notwendigkeit einer statischen Ertüchtigung offensichtlich.



Bild 5

Ende 2012 wurde das Bauwerk nach Abnahme des Bewuchses mit Strahlschutznetzen provisorisch gesichert, damit keine losen Teile in die Verkehrsflächen fallen konnten.

resultierend bestand die Gefahr herabfallender Mauersteine und Fugenmaterials. In enger Abstimmung mit der Stadt Bonn und den Denkmalbehörden hat sich der Bau- und Liegenschaftsbetrieb (BLB) NRW Köln im November 2012 dazu entschlossen, das Mauerwerk umgehend zu sichern. Dies wurde durch feinmaschige Stoffbahnen – einem sogenannten Strahlnetz, welches sonst zum Abdichten bei Sandstrahlarbeiten genutzt wird –

realisiert (Bild 5). Die bis zum Jahresende 2012 eingeleiteten Sicherungsmaßnahmen dienten dabei ausschließlich dem Schutz vor herabfallendem Material und stellten noch keine Stabilisierung des Mauerwerks dar.

In den Jahren 2012 bis 2015 wurden Bestandsuntersuchungen am Alten Zoll durchgeführt und die Maßnahmen zur Instandsetzung geplant, sodass 2015 die Baumaßnahmen beginnen und Ende 2017 abgeschlossen werden konnten.



3 Bestandsanalyse

Um Instandsetzungs- und Sanierungsmaßnahmen an Bestandsbauwerken und -mauerwerk insbesondere mit historischer Bausubstanz zielsicher und erfolgreich planen und durchführen zu können, ist eine aussagekräftige Bestandsanalyse zwingend erforderlich. Wichtig war, dass von Beginn an ein interdisziplinäres Team an Fachplanern (Architekt: Sandner Architekten, Königswinter; Statiker: Hempel Ingenieure, Köln; Baugrunduntersuchungen: Kühn Geoconsulting, Bonn; Baustoffuntersuchungen: Material- und Versuchsanstalt, Neuwied) die Untersuchungen und später die Baumaßnahmen begleiten würden.



3.1 Bestands- und Schadensaufnahme

Die Bauwerksaufnahme beginnt im Allgemeinen mit einer visuellen Begutachtung, bei der eine fotografische und zeichnerische Erfassung des Objektes erfolgt. Eine handnahe Inaugenscheinnahme ergänzt durch einfache Untersuchungsmethoden, u. a. Abklopfen zur Lokalisierung von Hohlstellen, Rissbreitenmessungen sowie Sondierungsbohrungen und Endoskopen zur Beurteilung des Wandaufbaus und Detektion von inneren Gefügestörungen, liefern die wesentliche Grundlage für die Bestands- und Schadensaufnahme. Hierbei ist auch die Zielstellung für das jeweilige Objekt nicht aus den Augen zu verlieren und es sind ggf. fachübergreifende Fragestellungen zu formulieren: Liegen Standsicherheitsprobleme vor? Sind denkmalpflegerische Aspekte zu beachten? Liegen bauphysikalische Schadensursachen vor? Sind baugrundspezifische Aspekte relevant? Entsprechend sind Fachplaner wie z. B. mit historischen Bauwerken erfahrene Tragwerksplaner, Baugrundgutachter, Bauphysiker und die Denkmalpflege hinzuzuziehen.

Eine erste Befahrung mit einem Hubsteiger zeigte die umfangreichen Schäden am Bauwerk (Bilder 6 und 7). Mittels Risskartierung, geotechnischem Gutachten und der Ermittlung der statischen Er-

fordernisse der Schwergewichtsmauer sowie Bestandserfassung der verwendeten Steine und einem Gutachten zu den verwendeten Mörteln wurde der überkommene Bestand analysiert.

Die Stützwände des „Alten Zolls“, deren freie Wandhöhen zwischen ca. 9,0 m und 15,5 m betragen, gliedern sich in drei Bereiche:

- Ostseite – Rheinseite
- Südseite – Bonner Stadtgarten
- Nordseite – Konviktstraße

Nach den Ergebnissen aus den Kernbohrungen weist die Mauer am Wandkopf unterhalb der Brüstungsmauer Breiten von durchschnittlich ca. 1,4 m und am Wandfuß von durchschnittlich ca. 3,5 m auf. Die Wandneigungen betragen durch die verschiedenen Bauphasen zwischen ca. 3,0° bis 6,0° (Bild 8). Die Wandeinbindungen wurden am Wandfuß über Schürfen mit im Mittel ca. 0,8 bis 1,3 m festgestellt.

Durch Schürfungen innenseitig unterhalb der Brüstung wurden erdseitig angeordnete gemauerte Wandschotten gefunden. Diese hatten keinen Verbund und keinen Zuganschluss an das Mauerwerk der Stützwand. Ebenfalls waren die Schotten nicht bis in die Gründungstiefe geführt (Bilder 9 und 10).

Bild 6

Nach Abnahme des Bewuchses zeigten sich bei der Befahrung mit dem Hubsteiger zum Teil nur noch lose aufliegende Mauersteine, die zur Sicherung geborgen wurden.

Bild 7

Die Fassade wurde bei der Schadensaufnahme mit dem Hubsteiger befahren, um Bestand und Schäden zu erfassen. Im Bild zeigen sich große Schalen, die aufgrund von Hinterwanderung des Mauerwerksverbandes durch Frost abgelöst wurden.



Bild 8

Auch die Planung des Gerüstes war besonders anspruchsvoll, da die Wände der ehemaligen Bastion eine Neigung bis zu sechs Grad aufweisen.

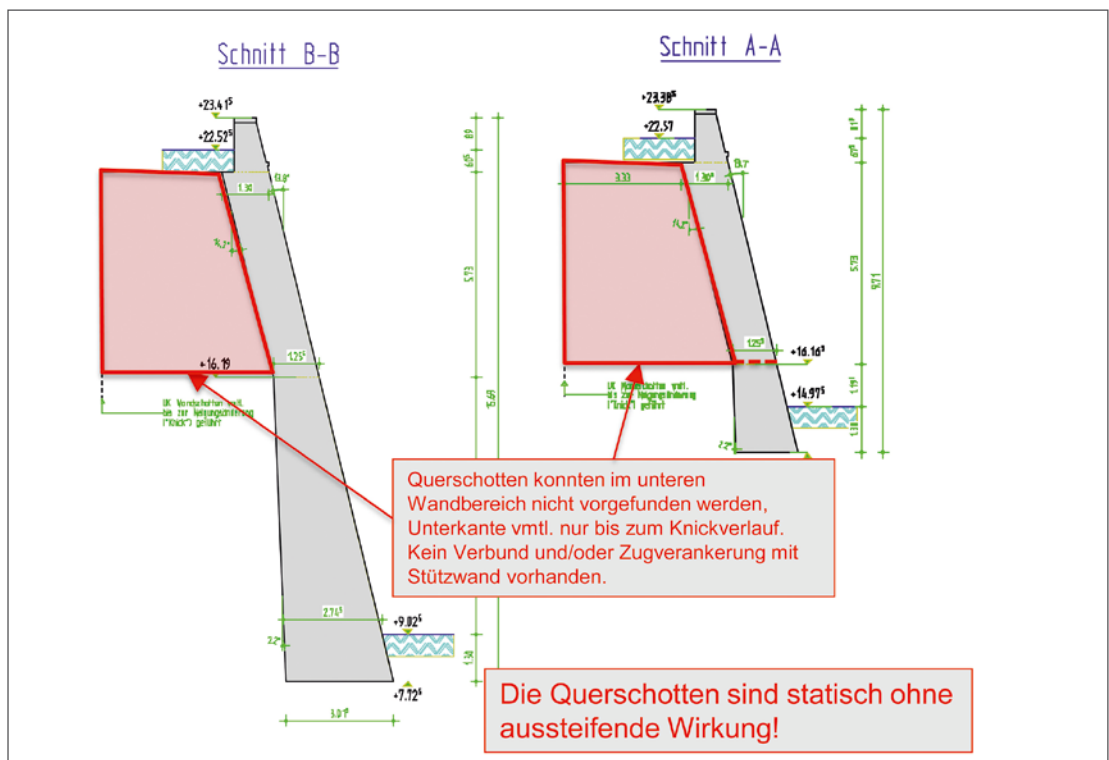


Bild 9

Die vorgefunden Querschotten konnten für den statischen Nachweis nicht herangezogen werden.



Bild 10

Die Schürfe zeigen die oberseitig erkennbaren Abrisse der Wandschotten von der Stützwand.

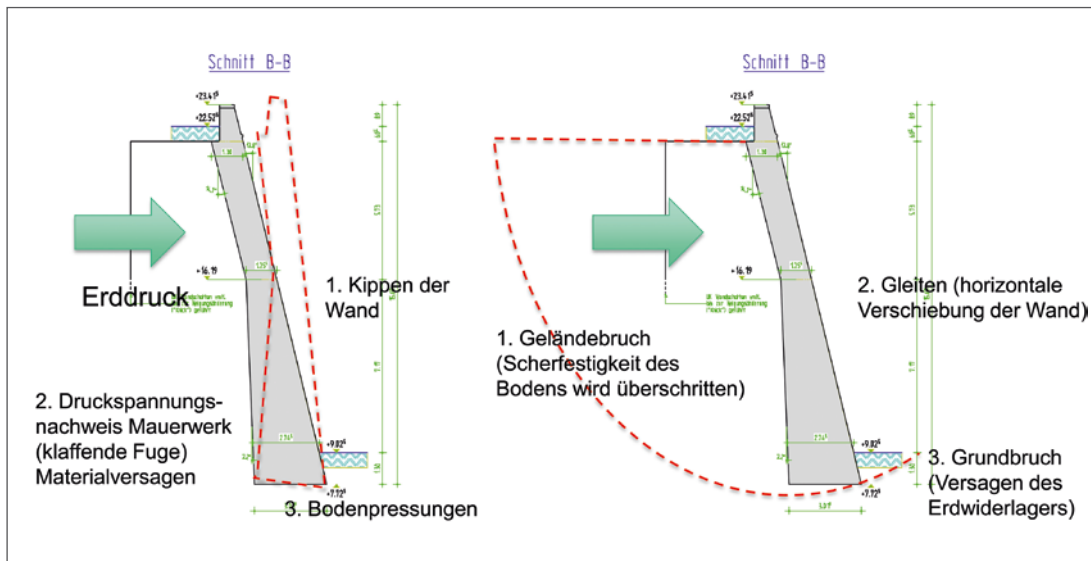


Bild 11
Das Versagen kann innerhalb der Tragstruktur (innere Versagensmechanismen) oder innerhalb des Bodenkörpers (äußere Versagensmechanismen) auftreten.

Im Übergang der Wandschotten zum Stützwand-mauerwerk war durch oberseitige Schürfen der Abriss zu erkennen. Statisch konnten die Schotten nicht herangezogen werden. Gleichzeitig musste festgehalten werden, dass die Stützwand – bedingt durch den Erddruck – versucht, sich der Last zu entziehen, indem sie nach vorn abkippt.

Ebenfalls wurden zahlreiche Rissbilder und Ausbauchungen sowie strukturelle Schäden, bedingt durch Verwitterung und Bewuchs, am Mauerwerksverband festgestellt.

3.2 Untersuchung zur Geometrie und zum Tragwerk

Auf Grundlage der Geländeuntersuchungen wurde ein differenziertes Baugrundmodell entwickelt, das als Grundlage für die Erddruckberechnungen zur Ermittlung der auf die Stützwände einwirkenden und rückhaltenden Kräfte diente. Dabei musste berücksichtigt werden, dass bei Extremhochwässern des Rheines (BHW 100 und 200) die rheinseitige Straße geflutet und entsprechend hohe Grundwasserstände im Hinterfüllbereich der Stützwände zu berücksichtigen sind.

Die Trag- bzw. Standsicherheitsnachweise wurden in enger Zusammenarbeit zwischen Tragwerksplanern und geotechnischen Sachverständigen erbracht. Hierbei wurde neben den statischen Berechnungen seitens des Tragwerksplaners eine

Vielzahl von geotechnischen Ermittlungen vorgenommen:

- Erddruckberechnungen mit verschiedenen Bemessungssituationen
- Stützwandberechnungen zur Ermittlung der Ausnutzungsgrade für Gleit- und Grundbruchsicherheit
- Standsicherheitsberechnungen nach DIN 4084 [3] zur Ermittlung der kritischen Gleitkreise und polygonalen Gleitlinien mit den höchsten Ausnutzungsgraden

An Stützwänden sind folgende spezifischen Versagensmechanismen aufgrund der besonderen Beanspruchung aus dem einseitigen Erddruck möglich (Bild 11):

Innere Versagensmechanismen (Versagen innerhalb der Tragstruktur)

1. Kippversagen (keilförmiger Mauerwerkstumpf)
2. Klaffung (Druckspannungsnachweis bzw. Nachweis der Klaffung)
3. Überschreitung der zulässigen Bodenpressung (inkl. Klaffung im Fundament)
4. Gleitversagen im Mauerwerk (Schub)
5. Strukturelle Schäden (Durchwurzelung, Hohllagen, Ausbauchungen)
6. Mangelhafte Materialität (Fugen, Steine, Ausführungsqualität)

Äußere Versagensmechanismen (Versagen innerhalb des Bodenkörpers)

Bild 12

Die Anker sind auf dieser Seite fast vollflächig eingebaut, nur in den Ziegelflächen lässt sich der Austausch des Materials für die verblendeten Ankertaschen noch erkennen. In den gemischten Bereichen des Mauerwerks ist der Austausch fast nicht zu sehen.

Bild 13

Für die Wiederherstellung der Südost-Ecke wurde fränkischer Muschelkalk als Ersatz für den ursprünglichen Drachenfels – Trachyt aus dem Siebengebirge verwendet.

1. Geländebruch (Scherversagen des Bodens)
2. Gleiten (horizontale Verschiebung der Wand)
3. Grundbruch (Versagen des Erdwiderlagers vor der Wand)

Für den Nachweis von Stützwänden, die durch einseitigen Erddruck beansprucht werden, ist es von größter Wichtigkeit, die möglichst realen Bodenverhältnisse zu ermitteln. Mit diesen Kennwerten werden die Beanspruchungen aus dem Boden auf die Wand ermittelt.

Im statischen Modell, das ebenfalls möglichst die realen Bedingungen erfassen und abbilden soll,

werden die ermittelten Beanspruchungen aufgebracht und unter Ansatz sämtlicher ermittelter Befunde anschließend die statischen Nachweise erstellt.

3.3 Materialuntersuchungen

Aufgrund der Gelände- und statischen Untersuchungen sowie den daraus resultierenden notwendigen statischen Instandsetzungsmaßnahmen folgten auch einige der notwendigen Materialuntersuchungen. Gerade um festzustellen, ob altes und neu geplantes Material kompatibel ist, musste geprüft werden, ob z. B. die Materialien, die bei der Instandsetzung durch Anker oder im Bereich der Ankertaschen Verwendung finden sollten mit dem umgebenden Bestandsmaterial vereinbar sind.

Aus dem Objekt waren für die Voruntersuchungen 12 Bohrkern entnommen worden. Die Bohrkern wurden in einer Bohrkernbeurteilung dokumentiert und repräsentative Bereiche für die Mörtelprobenahme festgelegt. Ergänzend kamen oberflächennah, händisch entnommene Proben aus dem Verfug- und Mauermörtel hinzu. An insgesamt 30 Proben wurde die Druckfestigkeit des Mörtels bestimmt. In Abhängigkeit der augenscheinlichen Beschaffenheit und unter Berücksichtigung der Lage im Bauwerk wurde der Mörtel bestimmten Kategorien, einschließlich einer Druckfestigkeitsklasse, zugeordnet. Die Festigkeiten des Mörtels entsprachen hauptsächlich den Festigkeitsklassen IIa bis III.

An insgesamt 20 Proben wurde der Gehalt an mauererschädlichen Salzen bestimmt. Die Belastung des Mauerwerks war als gering einzustufen. Die Bestimmung des Gesamtsulfatgehalts zeigte ebenfalls keine signifikant erhöhten Werte. Lediglich lokal konnte ein erhöhter Sulfatgehalt im Bereich des Brüstungsmauerwerks nachgewiesen werden sowie an drei Stellen erhöhte Nitratgehalte. Ein erhöhtes Risikopotential in Bezug auf die Sulfatbeständigkeit bei der Mörtelauswahl wurde dahingehend nicht festgestellt. Die Auswahl des Unterstopf- und Vergussmörtels der Ankerköpfe, des Injektionsmörtels für die Ankerstäbe sowie der Mauer- und Fugenmörtel erfolgte im Wesentlichen auf Grundlage der Festigkeitseigenschaften.



Für die Auswahl der Ziegel als Ersatzmaterial in geschädigten Bereichen sowie für die Vermauerung der Ankertaschen wurden die Eigenschaften von Bestandsziegel sowie neu gefertigter Ziegel geprüft. Neben der Wasseraufnahme, Rohdichte und Druckfestigkeit wurde auch die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit nach DIN 52252-1 [5] geprüft. Die Ziegel zeigten eine ausreichende Frostbeständigkeit und konnten für die Verwendung freigegeben werden.

Über 20 verschiedene Natursteinarten, Ziegel und Mörtel bilden heute die Bestandteile des Mauerwerks des Alten Zolls (Bilder 12 – 15). Die Natursteine wurden teilweise direkt als Bruchsteine verwendet oder sind teils als Werkstein verarbeitet eingebaut. In den Bereichen, die der Erbauungszeit um 1644 zugeordnet werden können, überwiegen die Natursteine des nahen Siebengebirges und einfache Feldbrandziegel.

Die in einer späteren Bauzeit ergänzten Bereiche erweitern das Spektrum der Natursteine vor allem um Materialien aus der Eifel. Außerdem finden sich wiederverwendete Werksteine, sogenannte Spolien, wahrscheinlich von Gebäuden, die im II. Weltkrieg zerstört wurden und beim Wiederaufbau sowie der Erweiterung in den 1950er Jahren Verwendung fanden. An den verwendeten Materialien und Mauerwerksverbänden lassen sich die in der Vergangenheit erfolgten Reparaturen und Instandsetzungen ablesen und die einzelnen Maßnahmen rekonstruieren.

Ein großer Anspruch bei der Instandsetzung bestand darin, dass der Austausch desolater Steine erst bei differenzierter Betrachtung erkennbar wurde. Hierfür erfolgte in einem intensiven Prozess mit der Denkmalpflege baubegleitend die Festlegung für die zur Anwendung kommenden Ersatzmaterialien. Zum einen wurden Steine für den Ersatz verwitterter, gerissener und nicht wiederverwendbarer Steine benötigt, zum anderen wurde der Einsatz von neuem Material für die Verblendung der ausgestemten Ankertaschen notwendig. Größere wiederverwendbare Fragmente der Mauerwerksquader und Naturwerksteine wurden geborgen und zu kleineren zugerichtet. Besonders sorgfältig erfolgte die Bergung von Resten von Werksteinen aus Drachenfels-Trachyt und von Teilen der Basaltsäulen und deren Lagerung für eine Wiederverwendung. Beide Natursteine wurden noch bis vor 100 Jahren im nahen Siebengebirge gebrochen, jedoch gibt es sowohl regional als auch überregional kein äquivalentes Ersatzmaterial für den Trachyt vom Drachenfels. Dieser sorgfältige Umgang mit den vorhandenen Ressourcen bewährte sich auch bei der Restaurierung des ehemaligen Festungstors auf der Südseite der Bastion, dem heutigen Husaren Ehrenmal. Notwendige Vierungen konnten aus den großen, aber oberflächlich stark verwitterten Steinen des Bestandsmauerwerks gewonnen werden, die für den Wiedereinbau in den Mauerwerksverband aufgrund der schadhaften Stellen zu klein geworden waren.

len und deren Lagerung für eine Wiederverwendung. Beide Natursteine wurden noch bis vor 100 Jahren im nahen Siebengebirge gebrochen, jedoch gibt es sowohl regional als auch überregional kein äquivalentes Ersatzmaterial für den Trachyt vom Drachenfels. Dieser sorgfältige Umgang mit den vorhandenen Ressourcen bewährte sich auch bei der Restaurierung des ehemaligen Festungstors auf der Südseite der Bastion, dem heutigen Husaren Ehrenmal. Notwendige Vierungen konnten aus den großen, aber oberflächlich stark verwitterten Steinen des Bestandsmauerwerks gewonnen werden, die für den Wiedereinbau in den Mauerwerksverband aufgrund der schadhaften Stellen zu klein geworden waren.

Bild 14

Blick auf die sanierte südliche Bastionsmauer mit dem restaurierten Husaren Ehrenmal, dem ehemaligen feindseitigen Festungstor der Bastion

Bild 15

Blick auf die sanierte Südost-Ecke der Bastion mit dem restaurierten Husaren Ehrenmal



Für den Austausch der desolaten Eckquader der Bastion wurde neues Ersatzmaterial notwendig. Steinhöhen von 25 bis 40 cm und Längen bis zu 80 cm erforderten diese Entscheidung. Zum Einsatz kam fränkischer Muschelkalk. Das Material wird im Rheinland seit mehr als 100 Jahren als Ersatz für den nicht mehr verfügbaren Drachenfels-Trachyt verwendet. Beide Gesteine sind aufgrund ihrer Genese chemisch völlig unterschiedlich zusammengesetzt und weisen daher auch verschiedene Eigenschaften, z. B. beim Verwitterungsverhalten auf. Dennoch wird der Muschelkalk häufig als Ersatzmaterial für den Drachenfels-Trachyt eingesetzt, da er sich nach einiger Zeit der Bewitterung gut dem ursprünglichen graubläulichen Erscheinungsbild des Trachyts anpasst.

Um dem partiell heterogenen Bild der verwendeten Naturwerksteine des Bestandes, bedingt durch vorangegangene Reparaturen und dem teilweisen Wiederaufbau nach dem II. Weltkrieg, gerecht zu werden, wurden im Mauerwerksverband außerdem noch rote Eifelsandsteine und Grauwacke von der Mosel verwendet. Für die Reparatur gerissener Teile der Brüstungsabdeckung war Basaltlava aus der Eifel verfügbar, was auch dem Bestand entspricht.

Für den Austausch der vielfach geschädigten Feldbrandziegel wurden umfangreich neue Ziegel bemustert. Die Wahl fiel auf einen industriell gefertigten Handformziegel, d. h. zunächst erfolgt die Herstellung des Rohlings traditionell in einer Holz-

form, was für ein lebhafteres Bild der fertigen Steine sorgt. Der Brennprozess unterliegt jedoch industriellen Bedingungen, um die Herstellung günstiger zu gestalten und möglichst gleichbleibend technische Werte für die Einzelsteine zu erzielen. Aus den Probebränden wurde eine Auswahl von fünf bis sechs verschiedenen Rottönen für die Ziegelfärbung getroffen. Deutlich hellere, dunklere oder gelblichere Ziegelmauersteine durften nicht verbaut werden.

4 Maßnahmen zur statischen Ertüchtigung des Mauerwerks

Auf Grundlage der Ergebnisse der Bestands- und Schadensaufnahme zu den verwendeten Baumaterialien, der Baugrunduntersuchungen und den Berechnungen der statischen Anforderungen konnte in der Folge ein Konzept für die statische Ertüchtigung und Instandsetzung des Mauerwerks entwickelt werden.

4.1 Statische Ertüchtigung durch Bodenvernadelung

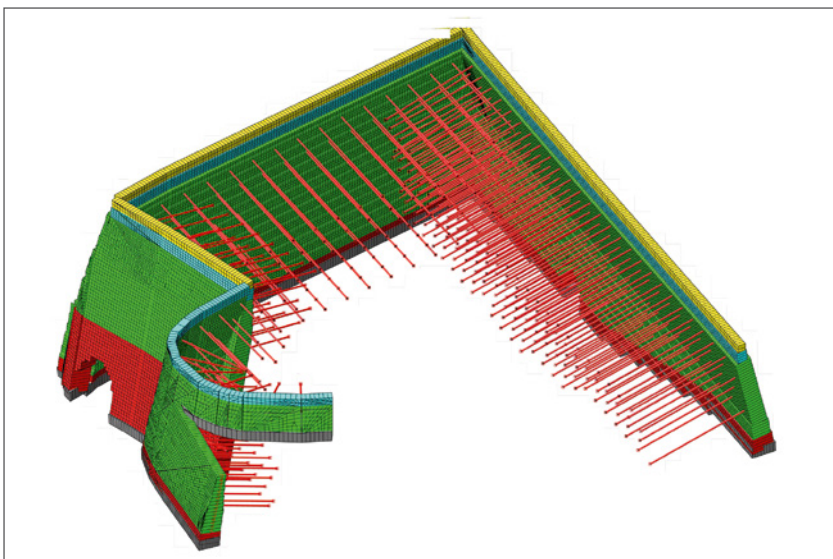
Da eine genügende Standsicherheit der Stützwände nicht nachgewiesen werden konnte, wurde seitens der Tragwerksplanung und dem geotechnischen Sachverständigen ein Konzept zur Ertüchtigung der Stützwände mittels einer „Rückverankerung“ erarbeitet. Dabei sollte die Rückverankerung in Form einer Bodenvernagelung durchgeführt werden. Hierbei wird ein ungespanntes Stahltragglied komplett mit Zementsuspension im Baugrund verpresst. Die ca. 90,0 bis 120,0 mm durchmessenden Nägel binden in der Hinterfüllung und im Bereich der unteren Lagen in die Kiessande ein. Dabei musste im besonderen Maße auf die Belange des Denkmalschutzes bezüglich der Ausbildung der Ankertaschen Rücksicht genommen werden.

Bei der Planung der Vernagelung waren der begrenzte Arbeitsraum, die Baustelleneinrichtung über ein Arbeitsgerüst, die Stützwand-Querschotte und der Tunnel zu berücksichtigen.

Dies führte dazu, dass eine rasterartige Vernagelung mit einer regelmäßigen, vertikalen Anordnung

Bild 16

Das 3D-Modell visualisiert die Ankeranordnung bei der Optimierung.



der Nagelansatzpunkte (ca. 1,5 ... 2,5 m Abstand) nicht möglich war, wobei der vertikale Abstand der Nägel z. T. bis auf 5,50 m aufgeweitet wurde. Erdstatisch gesehen ist dann die Sanierung als Abstützung der Stützwand mittels Mikropfählen nach DIN EN 14199 [4] betrachtet worden. Dieser Sanierungsansatz ist ausführungstechnisch als identisch mit einer Vernagelung zu beurteilen. Jedoch mussten für die erdstatische Betrachtung auch Nachweise der „tiefen Gleitfluge“ geführt werden, was

in Teilbereichen zu einer erheblichen Verlängerung der „Nägel“ bzw. Mikropfähle führte.

Während die Anordnung und die anzusetzenden Kräfte auf die Mikropfähle durch den Tragwerksplaner ermittelt wurden, erfolgte die Ermittlung der Pfahllängen sowie die entsprechenden Nachweise zur Aufnahme der Pfahlzugkräfte in den Baugrund, durch den geotechnischen Sachverständigen (Bild der 16 – 18).

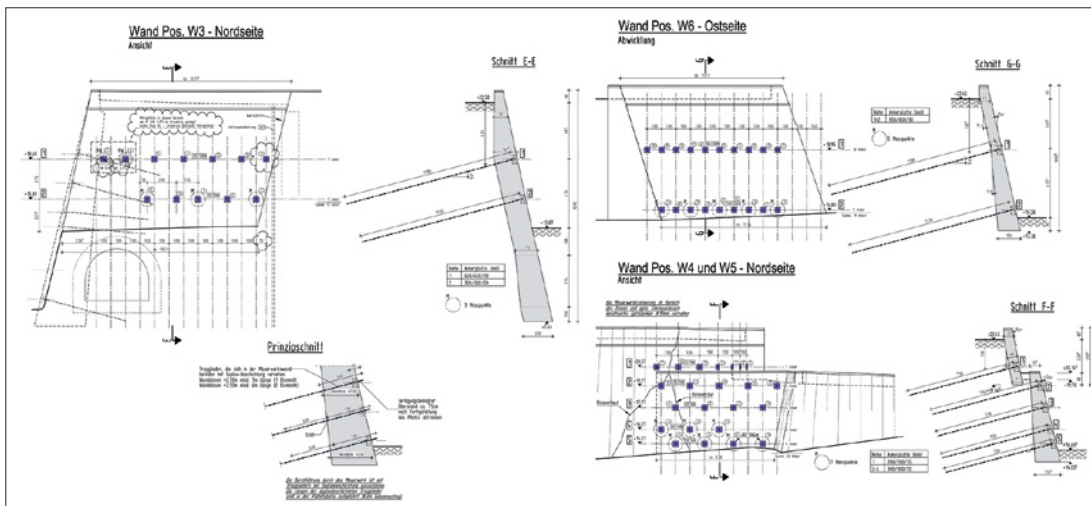


Bild 17

Die Rückverankerung der Stützwand des Alten Zolls mittels Mikropfählen wird auch für die Ausführung detailliert geplant.

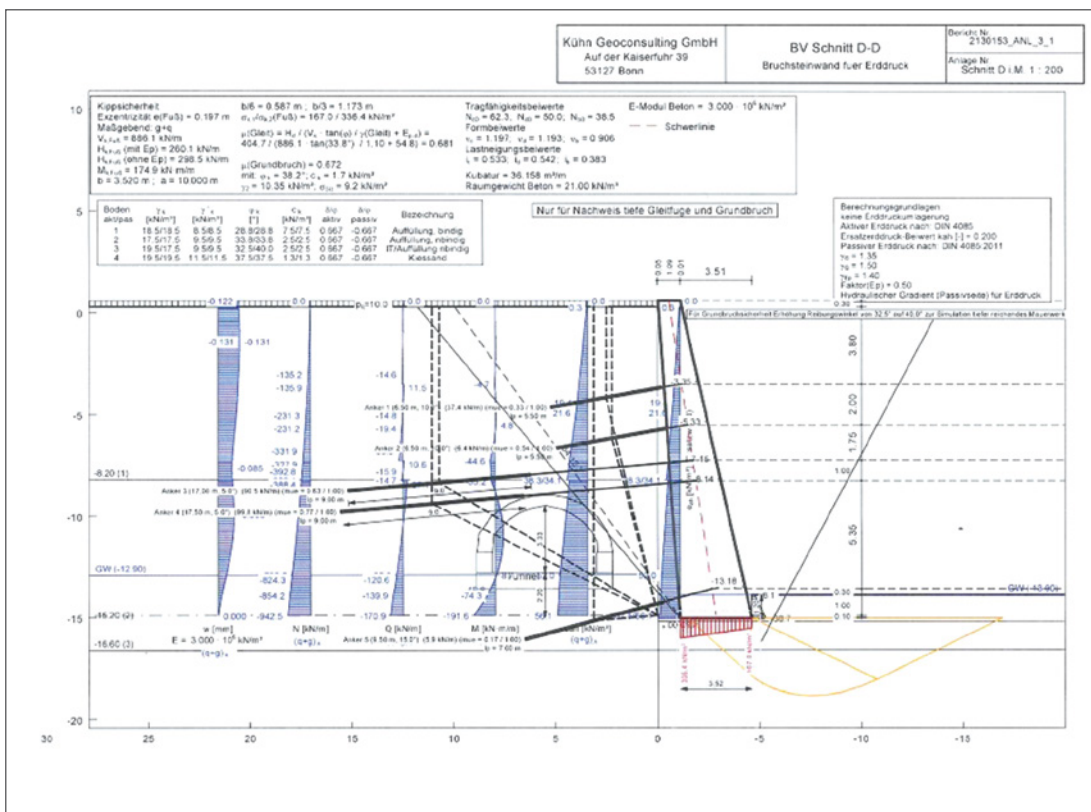


Bild 18

Der im Bauwerk vorhandene Tunnel musste bei der Anordnung der Mikropfähle berücksichtigt werden.



Das Bohren der Mikropfähle und die Mauerwerks-sanierungen machten Arbeiten von einem Gerüst aus notwendig. Dementsprechend musste ein möglichst kleines Bohrgerät eingesetzt werden. Daher fiel die Auswahl auf das System mit selbstbohrenden Mikropfählen (Ischebeck Titan). Im Unterschied zu den üblichen Stahlstab-Systemen ist hier keine Außenverrohrung notwendig, da eine Stützflüssigkeit über den inneren Hohlraum und die Stahlspitze in das Bohrloch gepresst wird und diese während des Bohrens das Bohrloch abstützt. Nachteilig gegenüber den Systemen mit Außenverrohrung ist, dass bei Vorkommen von Hindernissen die Bohrung eher abgebrochen und versetzt werden muss, da das Bohrgerät ein geringeres Drehmoment aufweist.



Im März/April 2015 wurde mit den Sanierungsarbeiten begonnen und bis zum Herbst 2015 sind insgesamt 240 Nägel mit Längen zwischen ca. 7,5 m und 19,0 m ausgeführt worden (Bilder 19 und 20). Die Nägel sollten Bemessungs-Zuglasten von ca. 100,0 bis 230,0 kN aufnehmen, was durch eine Reihe von Zugversuchen bestätigt wurde (Bild 21).

Aufgrund von Bohrhindernissen wurden lediglich ca. 5 Nägel mit reduzierter Länge ausgeführt. Dabei kamen verschiedene Verfahren zur Vermeidung von unkontrolliert austretendem Zementschlamm aus den Bohrlöchern zur Anwendung, sodass die Verschmutzungen der Wand minimiert wurden. Während das Bohren der unteren beiden Nagellagen aufgrund des Einsatzes einer Selbstfahrlafette relativ problemlos verlief, war das Bohren „im Gerüst“ durch das Umsetzen/Einrichten des Bohrgerätes aufwendiger (Bilder 22 und 23).

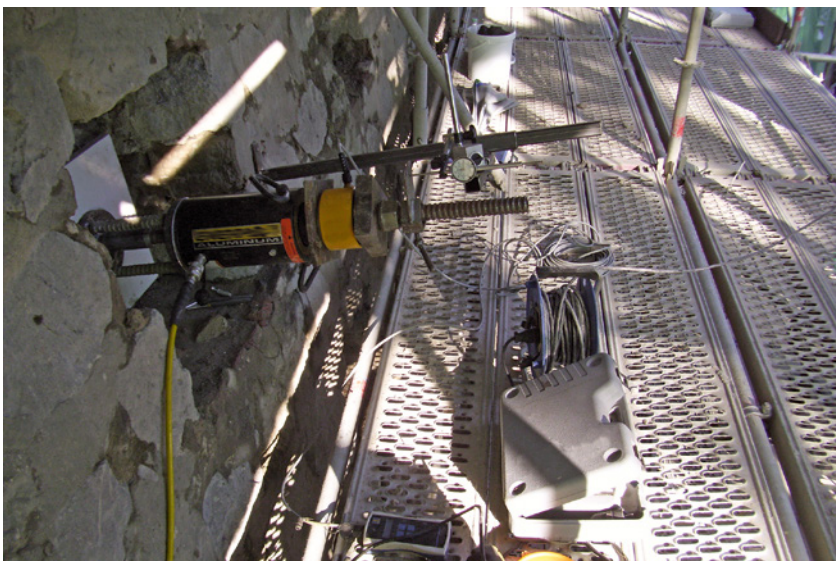


Bild 19

Im Teilbereich des Rondells auf der Nordseite sind auf dem Bild die bereits hergestellten Vernagelungen mit ihren Ankerplatten und dem folgenden Verblenden nach Vorlage des Bestandes erkennbar.

Bild 20

Ein massiver Einbau von Erdnägeln war besonders am Fuß der über 15 m hohen Stützmauer auf der Ostseite zur Verhinderung des Grundbruchs notwendig. Zusätzliche Anforderung war, den im Bauwerk von Süd nach Nord laufenden Tunnel bei der Vernagelung zu umgehen.

Bild 21

Die Bemessungszuglasten der Nägel wurden mittels Zugprüfungen nachgewiesen.

4.2 Sanierung der Mauer nach historischem Vorbild

Die handwerklichen Instandsetzungsarbeiten durch Maurer und Steinmetze gliederten sich in folgenden Ablauf:

1. Reinigungsarbeiten und Entfernen des biogenen Bewuchses und Wurzelwerks
2. Instandsetzung der schadhaften Fugen
3. Austausch verwitterter, gebrochener Ziegel und Natursteine
4. Prüfen und Abarbeiten von Schalen an den verwitterten Natursteinen
5. Wiederherstellung des Verbandes im Bereich von Rissen
6. Rück- und Wiederaufbau von durch Wurzeln zerstörter Bereiche
7. Vernadeln und Verklammern von gebrochenen Bauteilen
8. Herstellen und Verblenden der Ankertaschen nach Vorbild des Bestandes
9. Dokumentation der Instandsetzungsarbeiten

Besonderes Augenmerk lag auf der bestandsgetreuen Wiederherstellung des Mauerwerksverbandes. Auf Grundlage der vorherigen fotografischen Dokumentation wurden alle desolaten Bereiche nach Vorbild des Bestandes wiederhergestellt (Bilder 24 – 26). Jede der über 250 Ankertaschen wurde entsprechend des vorhandenen Bestandes nachgebildet.



Bild 22

Das Bohren mit Selbstfahrlafette im Bereich der beiden unteren Lagen ermöglichte eine problemlose Ausführung.

Bild 23

Die Bohrung im Gerüst herzustellen war deutlich aufwendiger.

Bild 24

Die über 250 Ankertaschen wurden exakt nach Vorbild des Bestandes, welcher vorher fotografisch dokumentiert wurde, nachgebildet und die Ankerplatten mit den entsprechenden Steinen verblendet.



Bild 25

Je nach Einbaulage wurden die Durchmesser und Längen der Anker sowie die Ankerplatten ressourcen- und material-schonend bemessen.

Bild 26

Aufbauend auf der Erfahrung der Steinmetze und Maurer konnten auch an komplizierten Bereichen wie der Nordost-Ecke die massiven Eckquader ausgebaut und durch neue ersetzt werden.

5 Gewölbefund

Bei Bestandsbauten muss trotz sorgfältiger, umfangreicher Untersuchungen und Planung auch immer mit Unvorhersehbarem gerechnet werden, worauf dann während der Bauphase zu reagieren ist.

So war es auch am Alten Zoll. Am gravierendsten für den Bauablauf war dabei ein Gewölbefund unterhalb des Rondells. Während der Kernbohrarbeiten wurden innerhalb des Rondells auf der Nordseite des Alten Zolls (Konviktstraße) Hohlräume entdeckt. Nach Öffnen der Wand an einer

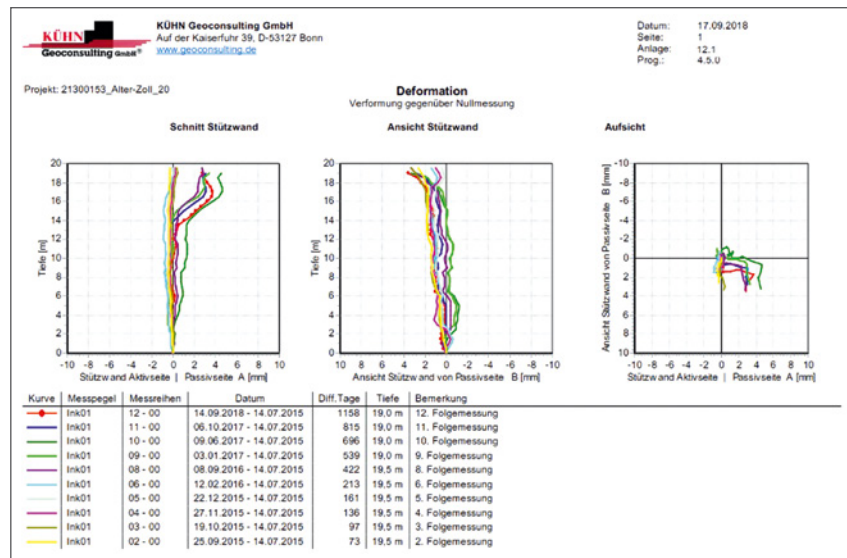
Stelle wurde ein Gewölbe mit einem Vorraum lokalisiert. Die Decke des Gewölbes ist als Kuppel mit einem ovalen Schlussstein ausgebildet (Bild 27). Die Grundform des Raums ist aber nicht rund, sondern weist mehrere nicht rechtwinklige Ecken auf. Die Wände sind zum Teil gewölbt, zum Teil gerade. Aus welcher Zeit dieser Raum stammt, der mit dem Scheitel ungefähr auf dem äußeren Bodenniveau liegt (Bild 28), ist bislang nicht bekannt. Erkennbar sind jedoch zumindest mehrere Bauphasen, die allerdings zurzeit nicht sicher datiert werden können.

Im Raum befindet sich ein Schacht, der nachträglich eingebaut und stumpf unter das Gewölbe gemauert wurde. Unterhalb von zwei Metern des Raumbodens ist der Schacht mit Schutt gefüllt. Das Entfernen des Schutts birgt das Risiko eines Einsturzes. Auf drei Seiten des Raumes sind Reste von Öffnungen zu erkennen, die wahrscheinlich ebenfalls aus unterschiedlichen Bauphasen stammen. Eine Öffnung ist aus Ziegeln gemauert, von den beiden anderen, jetzt zugemauerten ehemaligen Öffnungen, sind noch die Fenstergewände zu erkennen. Auch sie könnten aus verschiedenen Bauphasen stammen.

Zu welchem Zweck der Raum erstellt wurde, ob es ein Keller war, eine Etage eines Turms oder etwas anderes ist noch völlig unklar. Zumindest Teile des Gewölbes könnten vermutlich aus der Bauzeit des Alten Zolls stammen.

Die Quelle „*Memoire sur la ville de Bonn*“ von Ingenieur de Villemont (1702), die den Tunnel durch die Bastion als Pulvermagazin beschreibt, spricht noch von einem weiteren Magazin, das sich nicht weit vom Tunnel in einem alten Turm befindet, kleiner ist und verborgen unter dem Festungswall liegt. Dass in der Quelle von dem Gewölbe die Rede ist, welches sich heute unterhalb des Rondells befindet, kann bislang nur vermutet werden.

Das Gewölbe wurde im Zuge der Instandsetzung mit einem reversiblen Flüssigboden verfüllt, um einerseits den Erhalt des Gesamtbauwerks Alter Zoll zu gewährleisten und andererseits das Gewölbe zu erhalten. Eine Verfüllung mit anderen Materialien, etwa mit Beton, wäre nicht reversibel gewesen und fand daher aus denkmalpflegerischen Gründen keine Anwendung.



6 Schlussbetrachtung

Zur Kontrolle der Stützwandverformungen wurden drei Inklinometer-Messstellen auf dem Plateau eingerichtet (Bild 29). Dabei handelt es sich um Alu-Inklinometerrohre, die in verrohrten Kernbohrungen bis zu einer Tiefe von 20,0 m eingebaut wurden. Durch das Herunter- und Hochfahren der Inklinometer-Sonde in den Rohren wurde zunächst eine Nullmessung der Rohrlage getätigt. Alle weiteren Messungen messen dann in zwei Achsen die Abweichungen der Rohrlage zu der Nullmessung, sodass potenzielle Bewegungen im Hinterfüllbereich der Stützwand gemessen werden können. Es wurden geringe Verformungen < 1,0 cm festgestellt, die im Zuge der im Juli/August 2016 erfolgten Verdichtungs- und Landschaftsbauarbeiten auftraten. In den letzten vier Messungen nach Ausführung der Bautätigkeit ließen sich keine weiteren vermerklichen Verformungen mehr feststellen.

Die Baumaßnahme wurde 2017 erfolgreich abgeschlossen (Bild 30). Die Inklinometer-Messungen werden als jährliche Kontrollmessungen weitergeführt.

Damit die ausgeführten Instandsetzungsmaßnahmen am Alten Zoll möglichst dauerhaft und nachhaltig bleiben, wurde ein Pflegehandbuch für die regelmäßige Inspektion und Wartung dem Bauherrn, der Universität als Eigentümerin sowie der Stadt Bonn als Nutzer übergeben. Besonders durch die schrägen Wände der ehemaligen Bastion besteht leicht die Gefahr, dass sich Pflanzensamen und biogener Bewuchs auflagern und in Folge intakte Fugen schwächen oder zerstören. Dies würde eine erhöhte Angriffsfläche für weitere Schäden durch Frostsprengung in den entstandenen Rissen bieten. Im Turnus von fünf Jahren ist es daher angeraten, dass Bauwerk zu befahren, um Mauerwerksverband und Fugen zu kontrollieren. Beginn-

Bild 27

Innenaufnahme des bei Kernbohrarbeiten gefundenen Gewölbes unterhalb des Rondells

Bild 28

3D-Laserscan/Punktwolke des Gewölbes und dessen Lage im Gelände. Man sieht, dass die Gewölbekuppel unterhalb der Erdgleiche liegt.

Bild 29

Bewegungen im Hinterfüllbereich können durch Inklinometermessungen ermittelt werden.



Bild 30

Der romantische Blick vom Plateau des Alten Zolls ins nahe Siebengebirge. Der „Alte Zoll“ hat seinen entsprechenden Rahmen nach der Wiedereröffnung des Denkmals für die Öffentlichkeit zurückbekommen.

nende Besiedlungen mit wurzelbildenden Pflanzen sind zu entfernen sowie Bereiche mit gerissenen Fugen zu reparieren, um weiteren Schäden vorzubeugen. In den nächsten Jahren besteht sicher kaum Bedarf für Wartungsmaßnahmen, aber gerade nach Ablauf dieser Zeit darf eine regelmäßige Pflege und Wartung nicht vergessen werden.

Weiterführende Literatur

- [1] Wirtz, Rut: Der Alte Zoll in Bonn, Archäologie im Rheinland 1995, S. 177–180.
- [2] Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW (Hrsg.): Informationsflyer zur Sanierung des Mauerwerks und Wiederherstellung des statischen Tragsystems am „Alten Zoll“ der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Köln, 2014.
- [3] DIN 4084:2009-01 Baugrund – Geländebruchberechnungen.
- [4] DIN EN 14199:2015-07 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle.
- [5] DIN 52252-1:1986-12 Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Vormauerziegeln und Klinkern – Allseitige Befrostung von Einzelziegeln.

- [6] Schmidt, Ulf/ Sandner, Markus/ Neugebauer, Holger/ Blume, Dirk/ Arens, Petra: Nur wer das Mauerwerk kennt, wird es erfolgreich sanieren. Mauerwerk beurteilen, prüfen, sanieren, Teil 1: Untersuchungsmethoden, in: B+B Bauen im Bestand 7/2018, S. 24–29.
- [7] Schmidt, Ulf/ Sandner, Markus/ Neugebauer, Holger/ Blume, Dirk/ Arens, Petra: Steht wieder wie eine Eins. Mauerwerk beurteilen, prüfen, sanieren, Teil 2: Instandsetzung des „Alten Zolls“, in: B+B Bauen im Bestand 1/2019, S. 44–51.

Abbildungen

Bild 2: Tuschediator, Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Alter_Zoll_Rheinseite_Bonn.jpg

Bild 8: Wolkenkratzer, Luftbildfotografie Klaus Göhring, Hennef, Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Bonn-522_Alter_Zoll.JPG

Bilder 9, 10, 11, 16, 17: Hempel Ingenieure, Köln

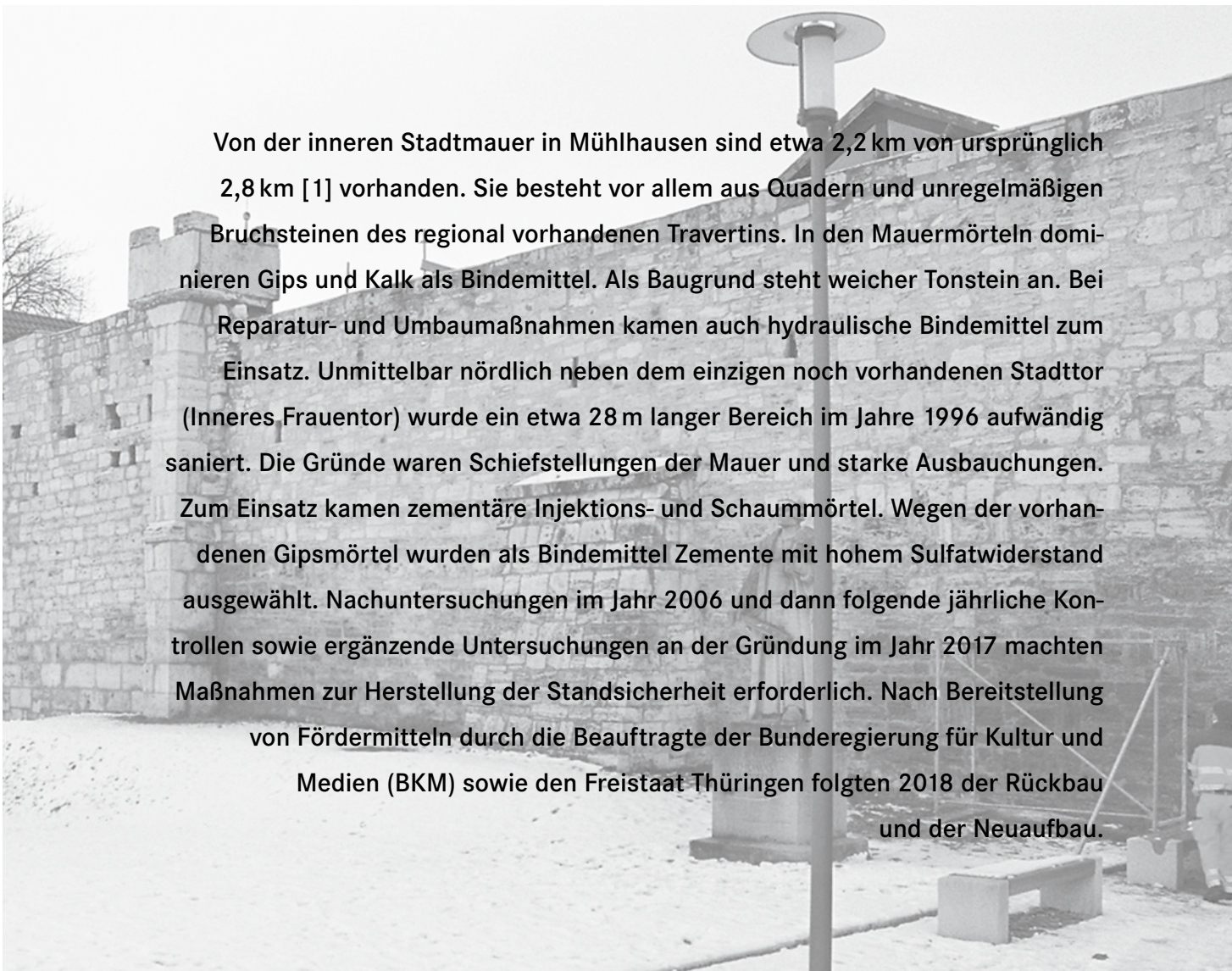
Bilder 18, 21–23, 29: Kühn Geoconsulting, Bonn

Bild 28: Pilhatsch Ingenieure, Bonn

Alle anderen Abbildungen von Sandner Architekten

Stadtmauer am Frauentor in Mühlhausen (Thüringen) – Keine Rettung im Bestand!

von Hans-Werner Zier, Heike Dreuse, Stefan Zeuch, Alban Huschenbeth



Von der inneren Stadtmauer in Mühlhausen sind etwa 2,2 km von ursprünglich 2,8 km [1] vorhanden. Sie besteht vor allem aus Quadern und unregelmäßigen Bruchsteinen des regional vorhandenen Travertins. In den Mauermörteln dominieren Gips und Kalk als Bindemittel. Als Baugrund steht weicher Tonstein an. Bei Reparatur- und Umbaumaßnahmen kamen auch hydraulische Bindemittel zum Einsatz. Unmittelbar nördlich neben dem einzigen noch vorhandenen Stadttor (Inneres Frauentor) wurde ein etwa 28 m langer Bereich im Jahre 1996 aufwändig saniert. Die Gründe waren Schiefstellungen der Mauer und starke Ausbauchungen. Zum Einsatz kamen zementäre Injektions- und Schaummörtel. Wegen der vorhandenen Gipsmörtel wurden als Bindemittel Zemente mit hohem Sulfatwiderstand ausgewählt. Nachuntersuchungen im Jahr 2006 und dann folgende jährliche Kontrollen sowie ergänzende Untersuchungen an der Gründung im Jahr 2017 machten Maßnahmen zur Herstellung der Standsicherheit erforderlich. Nach Bereitstellung von Fördermitteln durch die Beauftragte der Bundesregierung für Kultur und Medien (BKM) sowie den Freistaat Thüringen folgten 2018 der Rückbau und der Neuaufbau.

1 Die historische Stadtmauer von Mühlhausen (Thüringen)

Im Jahr 967 wird die Stadt Mühlhausen als Königs-
pfalz [2] erstmals erwähnt. Nach Bühner [3] gehörte die Stadtmauer im 13. Jahrhundert zu den größten Anlagen ihrer Art. An gleicher Stelle wird berichtet, dass nach dem vollständigen Ausbau im späten Mittelalter sieben Tore und mindestens 38 Türme zur Stadtbefestigung gehörten.

Bild 1

Frauentor und südlich davon
geschaffene Durchgänge 2006

Bild 2

Stadtmauer am Frauentor
mit starkem Bewuchs



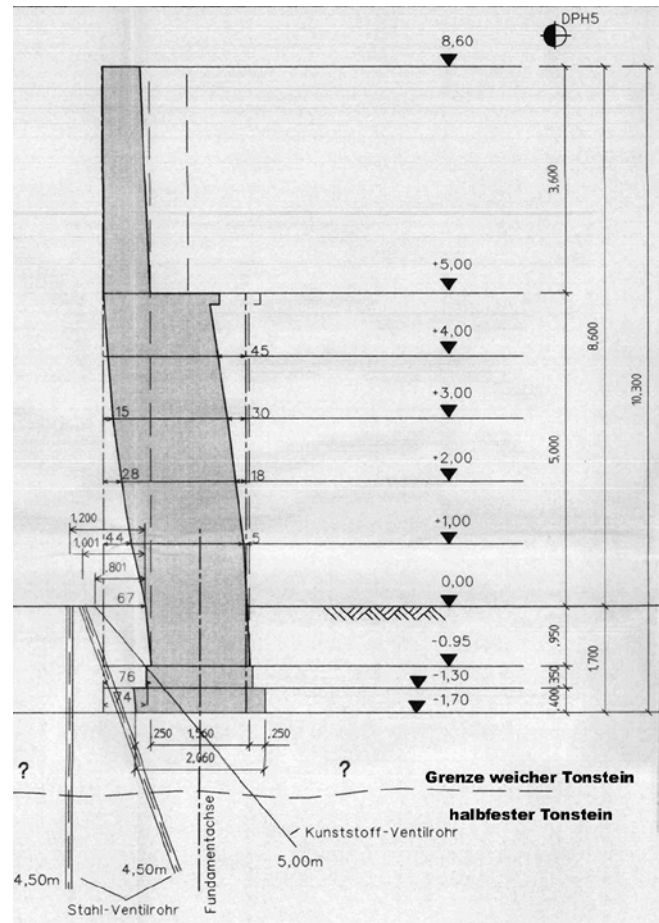
Im Laufe der Geschichte verloren Stadtmauern ihre militärische Bedeutung und wurden an anderen Orten teilweise vollständig zurückgebaut. Auch in Mühlhausen erfolgten an verschiedenen Stellen Rückbauten. So blieb von den inneren Stadttoren nur das Frauentor. Im unmittelbaren Umfeld des Tores (Bilder 1 und 2) wurde 1886 nördlich neben dem Tor ein Durchgang durch die Mauer geschaffen und 1900 südlich ein Torbogen für die Straßenbahn eingefügt sowie 1953 ein zweiter Durchgang für Fußgänger [3]. Es ist davon auszugehen, dass während dieser Baumaßnahmen auch andere als die im ursprünglichen Bestand vorhandenen Mörtel zum Einsatz kamen. So ist auch von hydraulischen Bindemitteln in den Mörteln auszugehen.

Den Zustand der Stadtmauer in den 1980er Jahren zeigt Bild 2. Direkt vor der Stadtmauer hatte sich starker Baum- und Strauchbewuchs ausgebildet.

Etwa 27 m der Stadtmauer nördlich neben dem Frauentor wurden 1996 einer umfangreichen Überarbeitung unterzogen. Anlass waren starke Ausbauchungen und Schrägstellungen der Mauer sowie Risse. Bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts war ein Pfeiler zur Sicherung vor die Mauer gesetzt worden. Deutlich unterscheiden sich die durch den Durchbruch 1886 geschaffenen neuen Mauerstrukturen von den in Richtung des Pfeilers vorhandenen Strukturen (Bilder 3a und b).

Um das äußere Erscheinungsbild der Mauer zu erhalten, wurden für die Sanierung der Mauer verschiedene Injektionstechniken angewandt. Eine Gründungssicherung ist nach dem SOILFRAC-Verfahren „System Keller“ mit 23.097 Litern [4] Verpresssuspension über 81 Bohrlöcher auf der Westseite der Mauer vorgenommen worden. In Bild 4 sind schematisch die Lagen der Bohrungen zur Gründungssicherung auf einer Achse im Bereich einer Ausbauchung in der Stadtmauer dargestellt. Es wurde von Gründungstiefen bis zu 1,70 m ausgegangen.

Zur Füllung von Hohlräumen im Inneren des Mauerwerks kamen 22.184 Liter [4] Schaummörtel (Bindemittel: Zement mit hohem Sulfatwiderstand) zum Einsatz. Danach sind 219 Edelstahlnadelanker und sieben Einzelzuganker aus Edelstahl eingebaut worden. Diese wurden mit Zementleim (Zement mit hohem Sulfatwiderstand) verpresst.



2 Zustandsuntersuchungen im Jahr 2006

In den Jahren 2004 und 2005 waren erneute Rissbildungen im Bereich der Ausbauchung an der Stadtmauer und die Aufweitung von Fugen im Bereich des Wehrgangs festgestellt worden. Ziele der daraufhin ausgelösten Zustandsuntersuchungen im Jahr 2006 waren die Eingrenzung möglicher Ursachen für diese Veränderungen und die Ableitung von Schlussfolgerungen für mögliche Schadensentwicklungen.

Auf der West- und der Ostseite im Bereich der Ausbauchung wurden zwei Probeachsen mit je zwei Höhenpunkten über Bohrkernentnahmen beprobt (Bilder 5 und 6).

Im Mauerwerk sind hohe Feuchtebelastungen nachgewiesen worden. Die Durchfeuchtungsgrade bewegten sich in den Mörteln und Steinen in einem Bereich zwischen 0,3 und 0,8. Als Mauermörtel konnten Gipsmörtel (Gipsgehalte etwa 65 bis

80 M.-%) nachgewiesen werden. Auch das Hinterfüllmaterial enthielt sehr hohe Gipsanteile. Infolge der hohen Feuchtebelastung kam es zu einer Reduktion der Festigkeiten in den Gipsmörteln.

Die Verringerung der Festigkeit in den Mauermörteln nach dauerhafter starker Durchfeuchtung im Zusammenhang mit der Neigung der Mauer nach Westen und damit verbundene Lastumverteilungen wurden als eine Ursache für die Ausbauchung des Mauerwerks angenommen.

Verdunklungen der Oberflächen (Feuchte) auf Teilflächen der nach Westen exponierten Wandfläche wurden auf Anreicherungen von Salzen, die stark hygroskopisch wirken, zurückgeführt. Bei den Salzen handelte es sich um Nitrate und Chloride, die in den Verdunstungszonen im und an den Maueroberflächen angereichert waren. Die hohen Belastungen in den unteren Wandbereichen mit hohen Feuchtegehalten deuteten auf die Einleitung von Fäkalien (in der Vergangenheit) in unmittelbarer Nähe der Mauer hin.

Bild 3 a + b

Ausbauchung in der Stadtmauer nördlich vom 1863 geschaffenen Durchgang a - 1970er Jahre, b - 2006

Bild 4

Auszug aus einer schematischen Zeichnung zur Vorbereitung von Baumaßnahmen 1995



Bild 5
Untersuchungsbereich an der
Westseite der Stadtmauer

Bild 6
Untersuchungsbereich an der
Ostseite der Stadtmauer

Bild 7
Detailansicht 1 von der
Westseite – Ausblühungen auf
Verfugmörtel



Bei den Untersuchungen wurde beobachtet, dass partiell weiße Bildungen auf den Travertinoberflächen (Bild 8) vorhanden sind. Diese Bildungen sind als Gips identifiziert worden. Der Gips ist aus den Mörteln im Mauerwerk mit Wasser über die Porensysteme im Stein an die Wandoberfläche transportiert worden und kristallisierte dort aus. Damit war der Beweis erbracht, dass das Steinmaterial für Wasser durchlässig ist. Es erschien somit auch der umgekehrte Weg des Wassers von außen in das Mauerwerk hinein wahrscheinlich. Schräggestellte Flächen begünstigten das Eindringen von Wasser.

Um dem Fortschritt der Ausbauchung der Mauer und dem Fortschreiten ihrer Schrägstellung entgegenzuwirken, waren Maßnahmen zur Baugrundstabilisierung und zur Sicherung der Mauerschalen durch die Verfüllung von Hohlräumen mit Schaumörtel und zusätzliche Vernadelungen ausgeführt worden. Bei diesen Maßnahmen kamen zementhaltige Materialien zum Einsatz. Neben den bereits erwähnten Alkalisulfaten bildeten sich im Kontakt mit den Gipsmörteln Ettringit und Thaumasil. Diese beiden Minerale gelten als stark bauschädigend. Die Bildung konnte durch die Verwendung von Zementen mit hohem Sulfatwiderstand nicht verhindert werden.

In den Kernbereichen der Schaummörtel waren außer dem im Zement normal vorhandenen Ettringit keine Hinweise auf verstärkte Neubildungen nachweisbar. Diese Hinweise gab es dafür aber an Stellen, an denen die alten Mauer- bzw. Verfüllmörtel und die Schaummörtel in direktem Kontakt standen.

In den mit Schaummörtel injizierten Hohlräumen konnten die Poren dieses Mörtels in gewissem Umfang die durch die Treibminerale entstehenden Spannungen aufnehmen sowie mineralische Neubildungen einlagern.

Im Bereich der im Mauerwerk eingebrachten Anker und am Mauerfuß waren aber scheinbar nicht oder nur gering porosierte zementhaltige Materialien für die Verpressung der Nadeln verwendet worden. In diesen Bereichen konnten die sich bildenden Treibminerale Rissbildungen verursachen. Mit der Zunahme der Rissweiten und -anzahl kam es dann zu stärkeren Feuchteinträgen und zu einer Beschleunigung der Schadensentwicklung.

Zur Abschätzung des Schadensverlaufs wurden Verformungs- und Neigungsmessungen, die kontinuierlich über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden sollten, am Mauerwerk empfohlen. Auf diese Weise sollte der Schadensprozess erfasst und der Schadensverlauf quantifiziert werden. Parallel dazu wurde der Beginn der Planung von grundlegenden Sanierungsmaßnahmen empfohlen.

3 Zustandsuntersuchungen im Jahr 2017

Durch die Stadt Mühlhausen ist unmittelbar nach den im Jahre 2006 durchgeführten Untersuchungen ein Statiker mit regelmäßigen Kontrollen von Veränderungen der äußeren Erscheinung (Neigung, Rissweiten, Ausbauchung) der Stadtmauer beauftragt worden. Nach etwa zehn Jahren wurde die sich einstellende Neigung der Stadtmauer als kritisch bewertet.

Zur Vorbereitung der Sanierungsplanung sind ergänzende Untersuchungen zum Mauerwerksaufbau im Bereich zwischen Frauentor und nördlich

von diesem befindlichen Pfeiler durchgeführt worden.

Mehrere Sondierungsbohrungen wurden oberflächennah an den erdberührten Seiten des Gründungsmauerwerks bzw. schräg nach unten in das Gründungmauerwerk ausgeführt. Der beprobte Bereich befindet sich zwischen dem ersten Strebe- Pfeiler hinter einer Ausbauchung des Mauerwerks nördlich vom Frauentor und dem Frauentor selbst. Aus den Untersuchungen an Materialproben aus den Bohrkernen ging hervor, dass im genannten Bereich im Gründungsmauerwerk

- Gipsmörtel in drei von sechs Bohrungen nachweisbar war,
- Injektionsschaummörtel im Bereich einer Bohrung bis in die Gründungssohle vorkamen und
- Treibmineralbildungen als Reaktionsprodukte aus Zement und Gips in drei von sechs Bohrungen festzustellen waren.

Damit wurde festgestellt, dass gipshaltige Mörtel nicht nur im Bereich der Schrägstellung bzw. der Ausbauchung vorhanden waren, sondern auch im erdberührten Teil (Gründung) des Mauerwerks. Weiterhin waren hierher auch zementhaltige Injektionsstoffe gelangt.

Zur Sondierung der Gründungstiefe der Mauer wurden Schürfen angelegt. Dabei sind sehr geringe Gründungstiefen (teils nur 0,6 m) festgestellt worden.

Bild 8
Detailansicht 2 von der Westseite – punktuelle Gipsablagerungen auf Travertin





4 Rückbau und Situation im Inneren des Mauerwerks

Die Stabilisierung des hier relevanten Teilbereiches der Stadtmauer unter weitestgehender Erhaltung des vorhandenen Bestandes im Jahr 1996 erwies sich 20 Jahre später als instabil. Neben den seit 2006 bekannten Folgen des Wassereintrags und der Unverträglichkeiten der für die Sanierung eingesetzten mineralischen Baustoffe mit denen des Altbestandes kamen 2017 neue Erkenntnisse zu Unzulänglichkeiten im Bereich der Gründung hinzu. Es war davon auszugehen, dass diese bereits Jahrzehnte vor der Sanierung 1996 einen wesentlichen Beitrag zur Ausbildung der Ausbauchungen und zur Schrägstellung der Mauer lieferten.

Im Februar 2018 wurde zunächst mit dem Rückbau eines etwa 17 m langen Abschnittes der Stadtmauer unmittelbar nördlich neben dem Frauentor begonnen.

Bei den vorgefundenen Rückbauzuständen waren die Folgen von Zementanwendungen auf die inneren Strukturen des Mauerwerks gut sichtbar. Unverträglichkeiten zwischen Gipsmörteln im Bestand und Injektionsstoffen (Bilder 9 bis 11) waren deutlich sichtbar an weißen Reaktionssäumen und Rissbildungen. Ebenso bestätigten sich die 2017 nach Sondierungen festgestellten Schwächen im Bereich der Gründung.

Durch die Injektage mit zementärem Schaummörtel ist vielleicht kurz nach der Ausführung eine



Bild 9

Kernbereich der Mauer mit sichtbaren Injektionen und Reaktionssäumen zum Bestandsmörtel

Bild 10

Injektionsschaummörtel im Kontakt mit Gipsmörtel unter Bildung von Reaktionssäumen

Bild 11

Riss im Injektionsschaummörtel und Reaktionssaum im Kontakt zum Maueremörtel

Verfüllung mit Verbund zum Bestand erreicht worden. Vorgefunden wurden beim Rückbau Riss-systeme, Reaktionssäume und Auflockerungen in den Strukturen infolge von Treibmineralbildungen. Diese sind bedingt durch Materialunverträglichkeiten zwischen Gipsmörteln im Bestand und dem zementär gebundenen Injektionsschaum (Bilder 12 bis 15).

Auch im Bereich eines Pfeilers, der das erste Bau-feld (ca. 17 m neben dem Frauentor) abschließt, sind noch sichtbar großvolumige Verfüllungen mit zementär gebundenem Injektionsschaummörtel vorhanden. Es war davon auszugehen, dass diese auch mindestens im Mauerwerk direkt hinter dem Pfeiler vorhanden sind. Als Ergebnis von Sondierungen mussten weitere 12 m der Stadtmauer zurückgebaut werden.

Bei Ortsbegehungen im Februar und März 2018 wurden aus dem im Rückbau befindlichen Mauerwerk Proben entnommen und für Untersuchungen sichergestellt.

Bereits in Bild 9 deutet sich an, dass eine Vielzahl von Gewindestäben mit Zementsteinumhüllung vorhanden war. Überwiegend ist eine Situation wie in den Bildern 16 und 17 dargestellt angetroffen worden.

Im Zementstein (Bilder 16 und 17) befinden sich Bruchflächen unterschiedlicher Erscheinungs-formen. Es handelt sich um Bruchflächen mit sehr dunklen glatten Oberflächen („0“) und gleiche

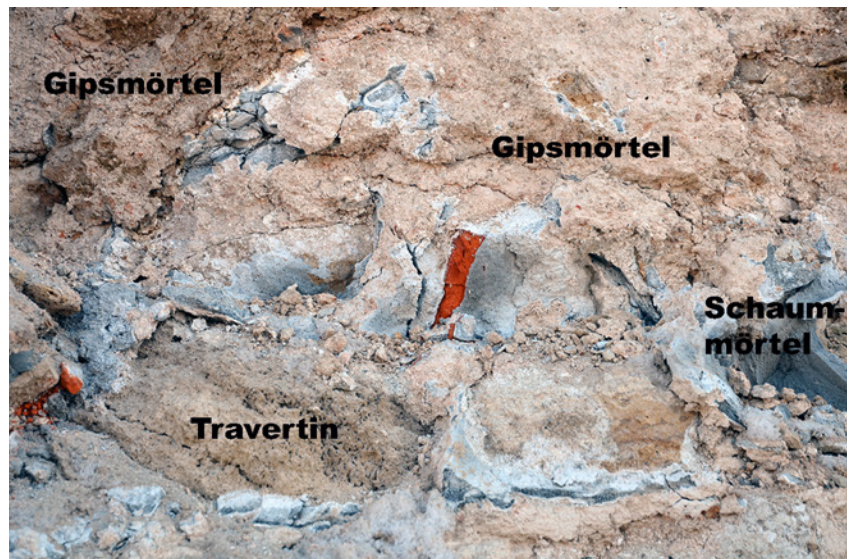
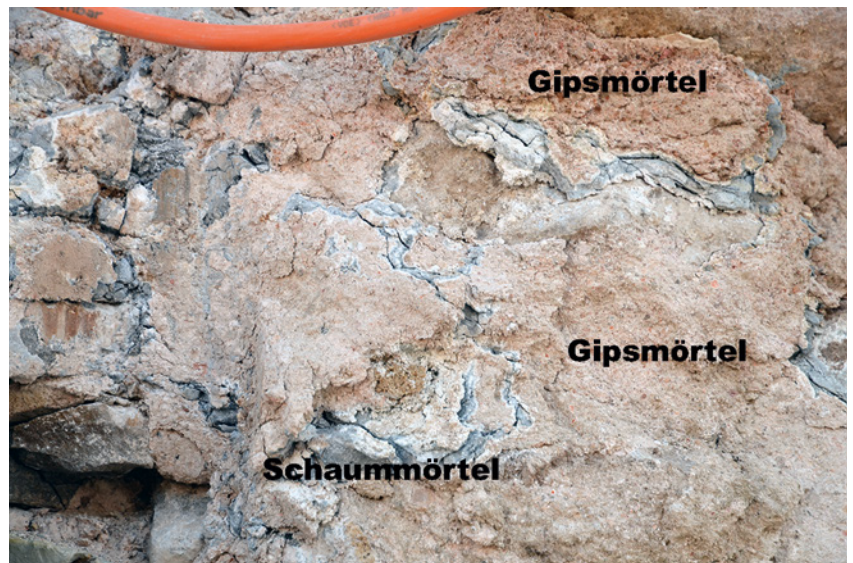


Bild 12

Injektionsschaummörtel im Kontakt zu Gipsmörtel

Bild 13

Injektionsschaummörtel im Kontakt zu Gipsmörtel

Bild 14

Zersplitterter Zementstein um einen Gewindestab nach Kontakt mit Gipsmörteln



Bruchflächen, die mit einer hellen Schicht („A“) belegt sind. Darin sind Anzeichen für deren Vorhandensein bereits in der Einbaulage zu sehen. Möglich gewesen wäre auch eine Entstehung der Bruchflächen während der mechanischen Beanspruchungen beim Rückbau der Stadtmauer.

An den mit („1“) gekennzeichneten Stellen befindet sich eine feine Streifung. Es handelt sich um den Zementstein durchziehende Reaktionssäume. Diese bildeten sich in der Folge von mechanischen Spannungen aus Rissystemen, die dünne Lagen im Zementstein in den Kontaktbereichen zum angrenzenden Material ablösen. In die entstehenden Risse konnte in Wasser gelöster Gips eindringen und dieser durch die Reaktion mit dem Zementstein treibmineralhaltige Säume bilden.

Auf der beschriebenen Schicht liegt eine weitere hellere Schicht (2) auf. Diese erreicht eine Schichtdicke von 1 bis 2,5 mm. Der ehemals vorhandene Durchmesser des Zementsteins betrug 50 mm. Wird von einer vollständigen Umhüllung mit dieser Schicht ausgegangen, ergeben sich Größenordnungen zwischen 40 und 100 mm/m. Daraus resultierende Dehnungen bewirken enorme Spannungen auf das Mauerwerksgefüge und den Zementstein im Bereich der Ankerverfüllung.

Auch bei Injektionen direkt in das Mauerwerk sind bei Kontakt zwischen Injektionsmaterial (Zementschaum oder Zementleim) und Gipsmörteln Reaktionssäume entstanden.

In Bild 18 ist eine solche Situation beispielhaft dargestellt. Ein Bruchstück aus dem Inneren des

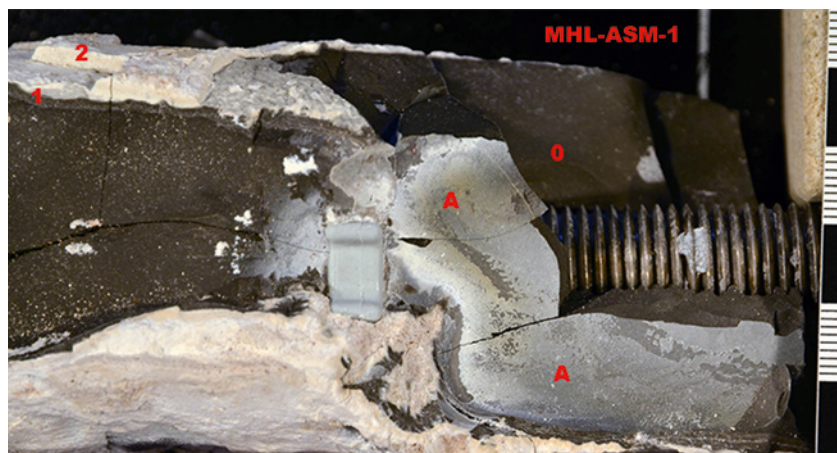
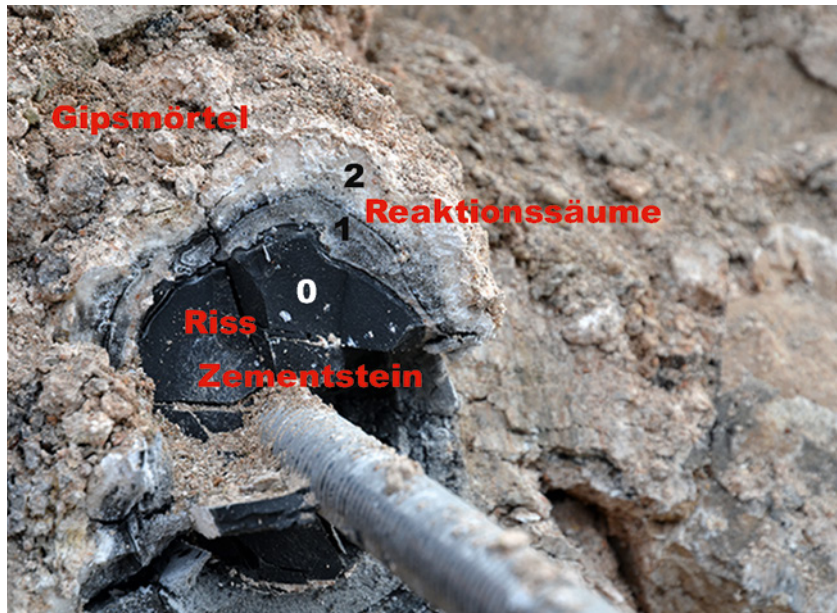


Bild 15

Abbruchbereich der Mauer unmittelbar am nördlich vom Frauentor gelegenen Strebeziegel

Bild 16

Umhüllung eines Gewindestabes im Mauerwerksbestand

Bild 17

Ansicht der Probe MHL-ASM-1 – Beispiel für zementäre Umhüllung (0) eines Gewindestabes und die Ausbildung eines Reaktionssaumes (1, 2) im Bereich der Bohrlochwandung

Mauerwerks wurde nach Trocknung bei Raumtemperatur (ca. 23 °C) in transparentes EP-Harz eingegossen und nach der Aushärtung ein Dünnschliff hergestellt.

Neben Zementstein sind in der Probe auch ein Travertinstück und Reste von gipshaltigen Mörteln sichtbar. Auffällig sind Rissysteme im Zementstein und auch im Travertin. Diese sind durch Spannungen, die infolge der Treibmineralbildung entstanden, bedingt. Anzeichen für die Treibmineralbildungen sind helle Reaktionssäume zwischen dem Zementstein und den gipshaltigen Mörteln.

Es bildeten sich somit auch in den nicht mit Stahlankern und -nadeln versehenen Mauerwerksstrukturen Reaktionssäume (Bild 19) mit vergleichbarem Erscheinungsbild wie in Bild 18 etwa parallel zur Kontaktzone Zementstein und Mauermörtel. Auch hier sind Rissysteme zu beobachten.

Im Kontakt zum Gipsmörtel (linker Bildrand in Bild 20 und mittig in Bild 21) sind teilweise inselartig verteilte dunkle Zementsteinbereiche vorhanden. In Richtung Kernbereich des Zementsteines (rechter Bildrand) verlaufen Rissysteme. Diese folgen dem Verlauf der Kontaktlinie zum Gipsmörtel.

Durch Reaktionen zwischen Gips aus dem Mauermörtel oder mit eindringenden Wässern umgelagerten Gips kommt es zur Bildung von Treibmineralen. Die Risse selbst entstehen bei Überschreitung der Zugspannungen im Zementstein nach Volumenzunahmen im direkten Kontakt zwischen Zementstein und Mauermörtel.

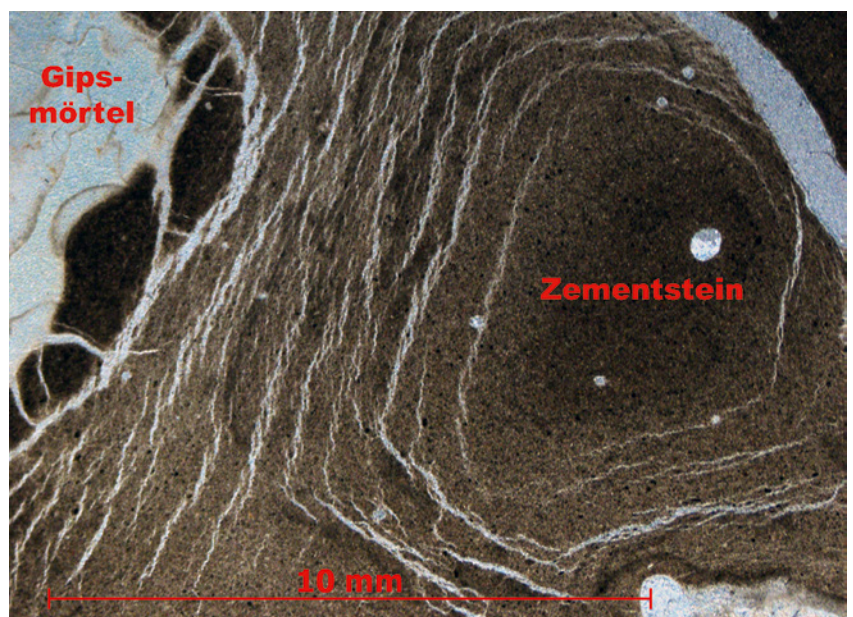
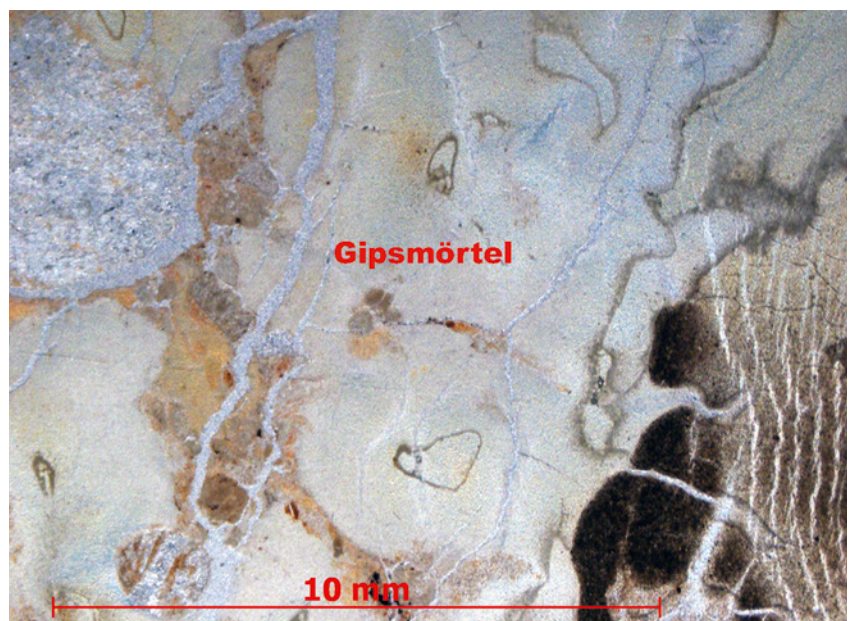
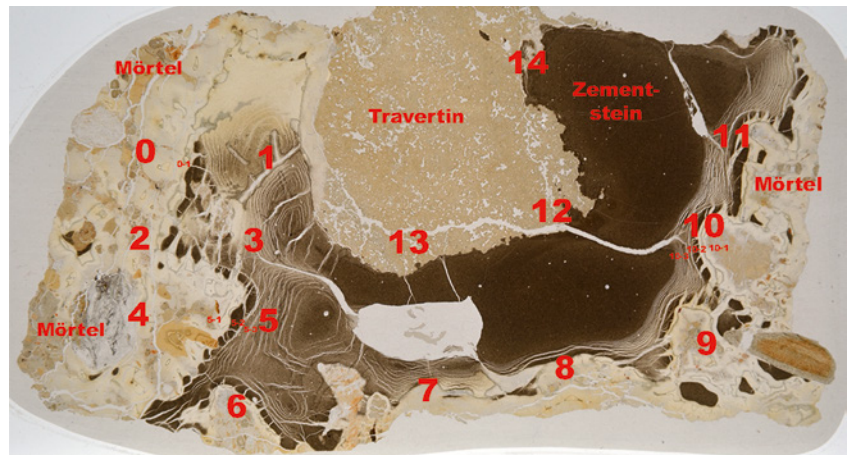


Bild 18

Schliff der Probe MHL-ASM4 (Dicke etwa 40 µm) aus dem Mauerwerk (unterer Bildrand etwa 9 cm)

Bild 19

Detail im Bereich 0 in Bild 18 – Zementstein im Kontakt zu Gipsmörtel

Bild 20

Detail im Bereich 5 in Bild 18 – Zementstein im Kontakt zu Gipsmörtel

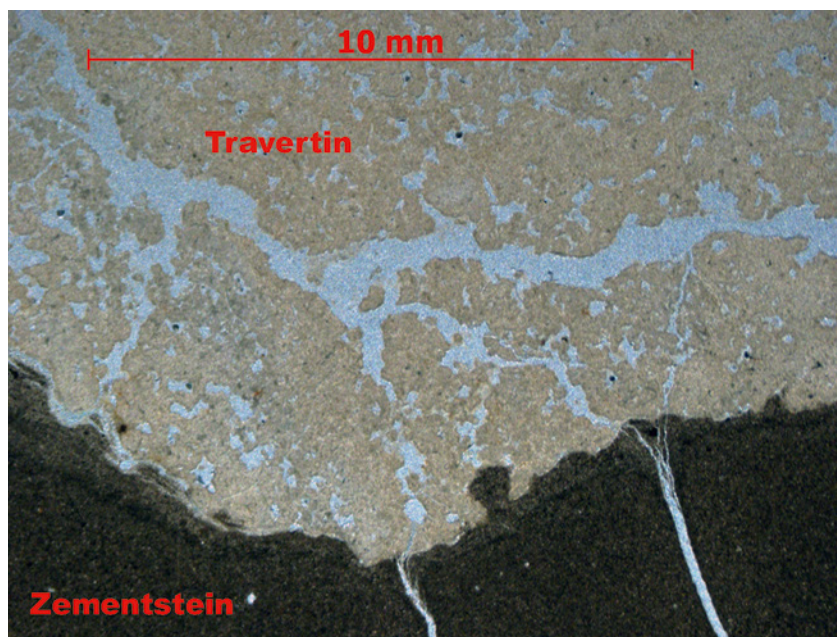
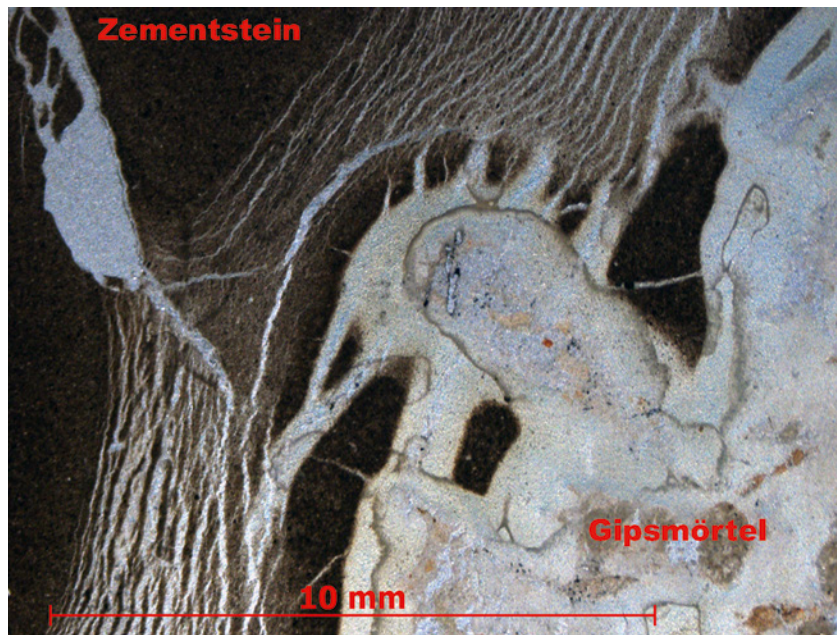


Bild 21

Detail im Bereich 11 in Bild 18:
Die Situation gleicht der in
Bild 20 beschriebenen.

Bild 22

Detail im Bereich 13 in Bild 18:
Kontakt zwischen Zementstein
(rechts im Bild) und Travertin

Risse im Zementstein (Bild 22) gehen auch direkt in den Travertin über. Bereits vorhandene Struktur-schwächen im Travertin scheinen die Ausbildung der Rissverläufe zu begünstigen. Die partiell vorhandene hohe Porosität im Travertin begünstigt den Wassertransport und somit auch von im Wasser gelösten Stoffen (z. B. Gips).

Die Untersuchungen zeigen, dass es nach Injektionen von Zementleimen (hier mit einem Zement mit hohem Sulfatwiderstand) zu Reaktionen mit gipshaltigen Mauermörteln gekommen ist.

Die Reaktionen bewirken zunächst die Bildung von Treibmineralen. Die damit verbundene Volumenzunahme an der Oberfläche des Zementsteines führt zu Spannungen in dessen Gefüge.

In einer ersten Phase kommt es zur Abschälung von 1 – 2 mm dicken Schollen an der Zementsteinoberfläche im Kontakt zum Mauermörtel. Diese Schollen brechen dann in kleine Stücke, die inselartig ausgebildet sind.

In einer zweiten Phase können gipshaltige Wässer durch die entstandenen Risse in den Zementstein eindringen und dort mit diesem unter Bildung von Treibmineralen reagieren. Es kommt zu einer Zermürbung der Zementsteinstruktur und zur Ausbildung neuer Risse.

Zur Zuordnung der stofflichen Veränderungen wurden Untersuchungen an Teilpräparaten aus den zuvor beschriebenen Bildungen durchgeführt.

In Bild 23 sind Röntgendiffraktogramme von Teilpräparaten aus der Probe MHL-ASM1 (siehe auch Bild 17) zusammengestellt. Dabei handelt es sich um Zementstein (0), Material aus dem Übergang zwischen Zementstein und Reaktionssaum (1) sowie aus dem Reaktionssaum ohne sichtbare Zementsteinreste (2). Im Zementstein finden sich keine Hinweise auf signifikante Anteile an Ettringit und Thaumasit oder hohe Gipsanteile. Im Übergang zur von dünnen Streifen durchzogenen Randzone des Verpressmaterials sind Gips und Ettringit sicher nachweisbar. Mit dem Erreichen der Randzone zur nach außen folgenden weißen bis gelblichen relativ homogen erscheinenden Schicht verringert sich der Gipsgehalt wieder deutlich und der Anteil an Ettringit steigt erheblich. Neben Ettringit können auch Anteile an Thaumasit auftreten.

An den gleichen Teilproben erfolgten weiterhin Untersuchungen mittels Differential-Thermoanalyse

(DTA) (Bild 24). Im Temperaturbereich bis etwa 400 °C wird vor allem Hydratwasser aus Bindemitteln und Treibmineralen abgegeben. Feststellbar ist, dass die Masseverluste in den Proben aus dem Übergang und dem Reaktionssaum im Vergleich zum Zementstein deutlich höher sind. Im Vergleich zu einem synthetischen Ettringit deutet sich an, dass im Reaktionssaum überwiegend mit diesem Mineral zu rechnen ist.

In der Teilprobe „Zementstein (0)“ ist der Masseverlust durch Wasserabgabe während der DTA (Tabelle 1) im Temperaturbereich zwischen 100 und 400 °C etwa 4mal so hoch wie die Wasserbindung, die sich theoretisch ausschließlich bei Abgabe aus Ettringit ergeben würde. Die Ursache ist das zusätzliche Vorliegen anderer Bindemittelhydrate aus dem Zementstein. Die realen Ettringitanteile sind erheblich geringer als die hier fiktiv berechneten.

Eine ähnliche Situation ist für die Teilprobe „Übergang (1)“ festzustellen. Die Ettringitgehalte sind deutlich höher und die Anteile des Wassers aus anderen Bindemittelhydraten geringer. Somit ist in der Teilprobe noch mit anteiligen Zementsteinresten zu rechnen.

In der Teilprobe „Reaktionssaum (2)“ ist davon auszugehen, dass die Masseverluste zwischen 100 und 400 °C bei der DTA im genannten Temperaturbereich nahezu vollständig durch die Wasserabgabe aus Ettringit bedingt sind. Deshalb muss von einem Ettringitgehalt von etwa 73 M.-% im Reaktionssaum ausgegangen werden.

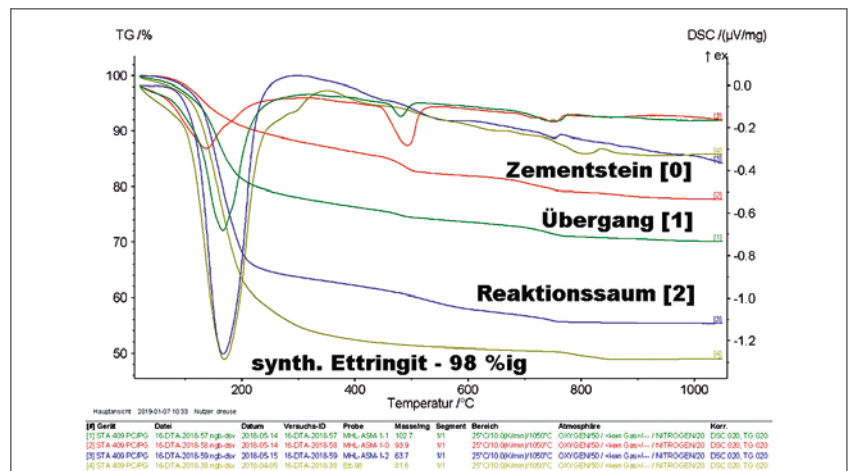
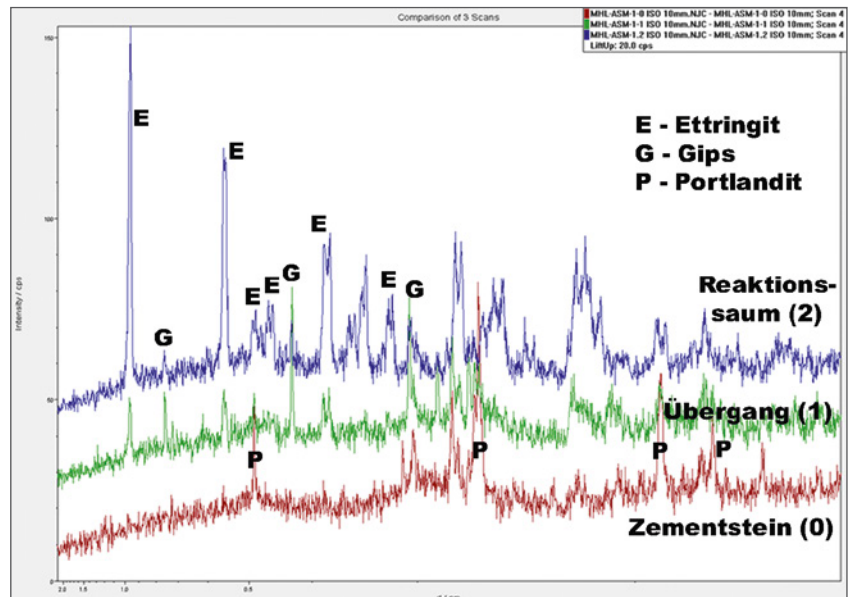


Tabelle 1

Zusammenstellung von Untersuchungsergebnissen für die Probe MHL-ASM1 (Angaben in M.-%)

	Zementstein (0)	Übergang (1)	Reaktionssaum (2)
Masseverlust bei DTA zw. 100 – 400 °C	12,1	20,6	35,8
Calciumhydroxid auf Basis der DTA	15,6	9,2	0
Calciumcarbonat auf Basis der DTA	9,3	7,0	5,8
Gesamt-Sulfat (SO ₃)	1,4	10,9	13,9
Dihydrat auf Basis Gesamtsulfat	3,0	23,4	29,9
Ettringit auf Basis Gesamtsulfat	7,3	57,0	72,7
Wasserbindung in Ettringit nach Zeile 6	3,4	26,8	34,2

Bild 23

Vergleichende Zusammenstellung von Röntgendiffraktogrammen

Bild 24

DTA- und TG-Kurven von Teilpräparaten aus der Probe MHL-ASM1

5 Anforderungen für den Neuaufbau und dessen Realisierung

Bild 25

Vorbereitung der Ausbildung einer Gründung aus Stahlbeton

Bild 26

Beginn der Aufmauerung im Bereich eines späteren Durchgangs



Die während des Rückbaus vorgefundene Situation und die parallel erhaltenen Untersuchungsergebnisse bestätigen die bereits 2006 und 2017 auf der Basis punktueller Sondierungen vermuteten Schadensursachen.

Die Zerrüttung der inneren Mauerwerksstrukturen, die hochgradigen Unverträglichkeiten einiger Baustoffe untereinander, die fehlende Gründungssicherheit sowie die vorhandene Schrägstellung der Mauer erforderten zeitnah einen Rückbau eines etwa 17 m langen Abschnittes der Stadtmauer. Während des Rückbaus tat sich für einen etwa 12 m langen anschließenden Bereich die gleiche Situation auf.

Für den Neuaufbau ergaben sich folgende Forderungen:

- Ausbildung einer sicheren Gründung,
- Ausbildung von durchgemauerten Mauerwerksstrukturen ohne Schalenausbildung,
- Erzeugung einer am alten Bestand angepassten optischen Erscheinung ohne Schiefstellung,
- Anbindung an das Frauentor und die verbleibende Mauer möglichst ohne Versatz,
- Ausbildung einer Abdichtung unter dem Wehrgang,
- Verwendung eines hohen Anteils des Steinmaterials aus dem Altbestand,
- ergänzende Verwendung von Steinen vergleichbarer Art aus Rückbauten anderer Objekte und
- Verwendung von Mörteln, die auf mögliche Restbelastungen mit sulfathaltigen Mineralen in den Steinen abgestimmt sind.

Kurzer Abriss über den Neuaufbau: Das neue Gründungsbauwerk (Bild 25) ist aus Stahlbeton errichtet worden. Grund war der Baugrund aus weichem Tonstein in engräumig wechselnder Qualität. Direkt auf die Oberfläche des Gründungsbauwerks (Bild 26) wurde mit der Errichtung des Natursteinmauerwerks aus Travertinquadern und -bruchsteinen begonnen. Als Mörtel kam Spezialmauer-

mörtel für Gipsmauerwerk zum Einsatz. Dieser soll Einwirkungen von Gips aus den Porensystemen des Travertins widerstehen. Das Bindemittel im Mörtel besteht zum überwiegenden Anteil aus Hüttensand und speziellen Anregern.

Seitens der Statik war eine hohe Stabilität der Mauer gefordert worden. Deshalb erfolgte eine Ausmauerung mit großen Steinen über den gesamten Querschnitt im Verband (Bilder 27 und 28).

Die Sichtfugen im Mauerwerk wurden bereits während der Aufmauerung realisiert. Der Mauermörtel ist an der Oberfläche bündig mit den Steinoberflächen abgezogen worden.

6 Resümee

Bereits im Jahr 1996 war bekannt [5, 6, 7], dass Zemente mit hohem Sulfatwiderstand zu Schäden in Mauerwerk mit Gipsmörteln führen. Trotzdem kamen sie zum Einsatz. Es war auch bekannt, dass Feuchte über die Steinoberflächen und über Abrisse im Bereich des Wehrganges in das Mauerwerk eindringt. Beide Effekte begünstigten die Bildung und schädigende Wirkung von Treibmineralen. Deshalb war es nicht verwunderlich, dass Schadensprozesse, die scheinbar kontrolliert eingedämmt wurden, weiter abliefen.

Glücklicherweise sind diese Prozesse bei Untersuchungen 2006 erkannt und in den Folgejahren beobachtet worden.

Der Eingriff in die Originalsubstanz erscheint dramatisch. Er ist aber eine Folge Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauernder Prozesse am hier vorgestellten Objekt. Die Prozesse sind nicht nur durch das unmittelbare Umfeld, wie Baum- und Strauchbewuchs oder angrenzende Bebauung, bedingt, sondern auch durch eine große Variation der Baumaterialien, die bei Sanierungs- und Umbaumaßnahmen zum Einsatz kamen.

Letztendlich war das Ziel der Maßnahme die Erhaltung des geschichtsträchtigen Gesamterscheinungsbildes der Stadtmauer im Bereich des Frauentores.



Bild 27
Querschnitt der Mauer im Bereich 1. Bauabschnitt



Bild 28
Mauer 1. Bauabschnitt bis in Höhe des Wehrganges

Literatur

- [1] <https://www.muehlhausen.de/index.php?id=377>.
14.11.2018
- [2] <https://www.muehlhausen.de/buerger-stadt/unsere-stadt/stadtgeschichte>. 14.11.2018
- [3] Bühner, P.: Die Demolierung der inneren Mühlhäuser Stadtmauer im 19. Jahrhundert, In: Mühlhäuser Beiträge, Hrsg. Mühlhäuser Geschichts- und Denkmalpflegeverein e.V., Heft 30, Mühlhausen, 2007, S. 85 – 99
- [4] Information der Stadtverwaltung Mühlhausen, Fachbereich Gebäude- und Grundstücksverwaltung, nach Bauunterlagen aus dem Jahr 1996
- [5] WTA-Merkblatt 2-11: Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden. Ausgabe:08.2018/D. Fraunhofer IRB Verlag. 2018
- [6] Zier, H.-W., Dreuse, H.: Unkenntnis schützt vor Schäden nicht. In: Bautenschutz + Bausanierung. Verlag Rudolf Müller. 2017. Heft 3. S. 36 – 40
- [7] Zier, H.-W., Dreuse, H.: Gipsmörtel und Gipsstein in Bauwerken – Probleme und Ansätze für die Sanierung. In: Natursteinsanierung 2012. Fraunhofer IRB Verlag. S. 9 – 23

Abbildungen

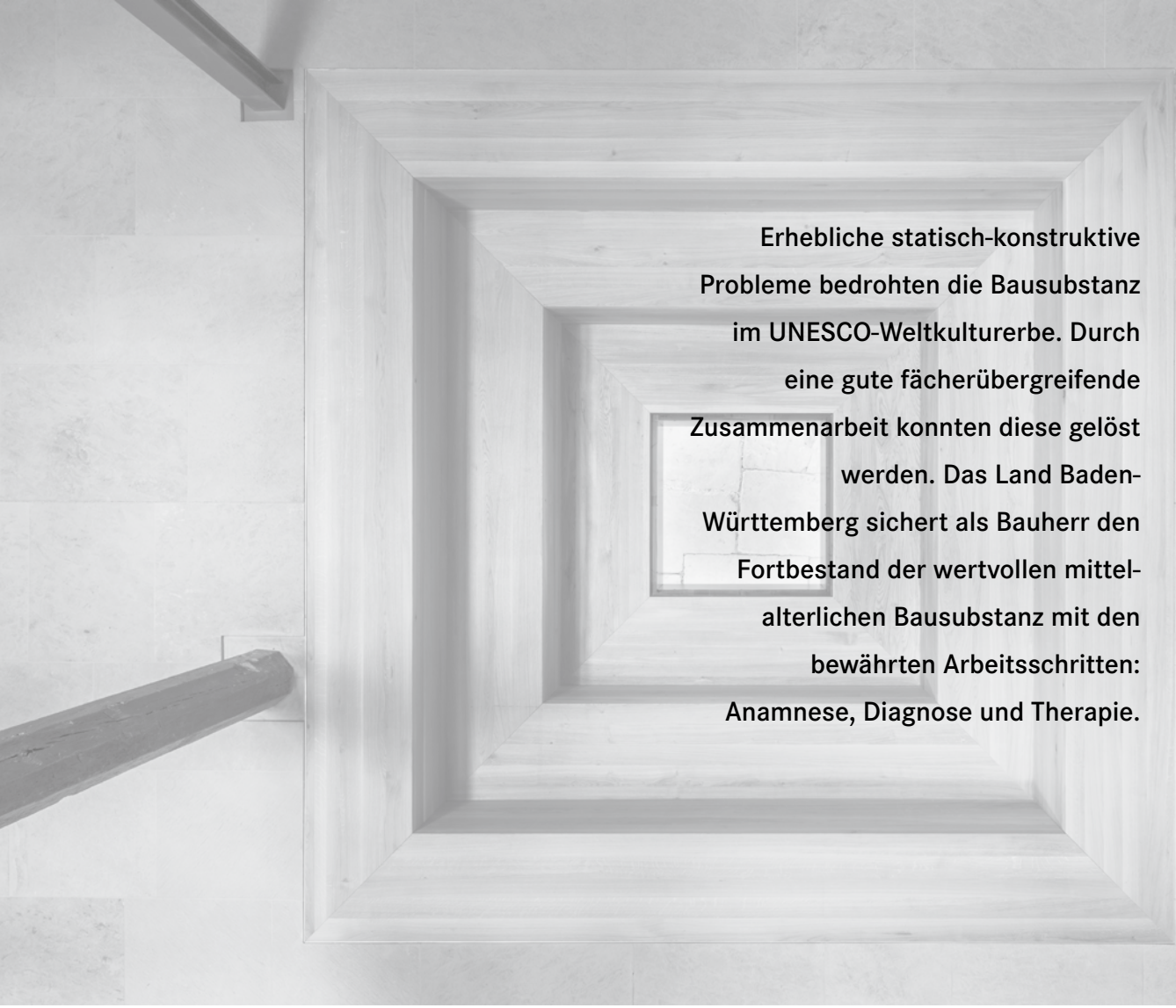
Bilder 1, 3b, 5 – 24, 27, 28 u. Titelbild:
Dr. Hans-Werner Zier MFPA Weimar

Bilder 2, 3a, 4: Stadtarchiv Mühlhausen

Bilder 25, 26: Stefan Zeuch Stadtverwaltung Mühlhausen

Kloster Maulbronn: Natursteinarbeiten am Herrenrefektorium und Herrendorment

von Holger Probst



Erhebliche statisch-konstruktive Probleme bedrohten die Bausubstanz im UNESCO-Weltkulturerbe. Durch eine gute fächerübergreifende Zusammenarbeit konnten diese gelöst werden. Das Land Baden-Württemberg sichert als Bauherr den Fortbestand der wertvollen mittelalterlichen Bausubstanz mit den bewährten Arbeitsschritten: Anamnese, Diagnose und Therapie.

1 Baugeschehen im Kloster Maulbronn

In den vergangenen Jahren konnten in der Klosteranlage Maulbronn umfangreiche Baumaßnahmen ausgeführt und abgeschlossen werden. Neben großen Maßnahmen an der Klosterkirche und im Kreuzgang wurden auch eine Reihe kleinerer Maßnahmen durchgeführt. Das Amt Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Pforzheim, hat diese Maßnahmen als Bauherrenvertreter, Projektleiter und meist auch architektonisch begleitet. Das größte Projekt war der Ausbau des Evangelischen Seminars Maulbronn für die doppelte Schülerzahl [1]. Mit dem Herrendorment Nord konnte 2018 der letzte Bauabschnitt an die Nutzer übergeben werden. Die Instandsetzung des Herrenrefektoriums wird aktuell noch ausgeführt und soll im Frühjahr 2019 abgeschlossen werden (Bild 1).

2 Die Legende vom Paradiesbaumeister

Das Herrenrefektorium ist eines der baugeschichtlich hochbedeutsamen Bauwerke des frühen 13. Jahrhunderts in der Klosteranlage. Zu diesen Bauteilen gehören neben dem Herrenrefektorium auch der südliche Kreuzgang und das Paradies, die Vorhalle der Klosterkirche.

Diese werden in der Literatur gern als „Maulbronner Protogotik“ bezeichnet [2], da sie im Übergangsstil der Frühgotik errichtet wurden und Stilmerkmale sowohl der Romanik als auch der Gotik aufweisen. Markantestes Kennzeichen dieser Bauphase sind Konsolsteine mit einem doppelten Halbmond-Motiv (Bild 2). Nun kann man dieses Motiv nicht nur in Maulbronn entdecken, sondern auch an zahlreichen weiteren Gebäuden der Epoche. Beispielhaft seien hier nur der Dom zu Magdeburg, die Michaelskapelle im Kloster Ebrach, die Burg Neipperg und das Kloster Walkenried genannt.



Bild 1
Kloster Maulbronn mit Herrenrefektorium (links) und Herrendorment Nord (rechts)

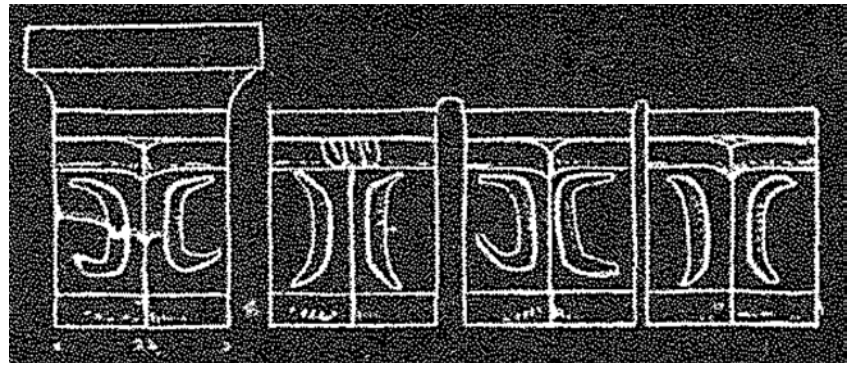
Dem Drang folgend, die Bauten des Mittelalters möglichst mit Einzelpersonen wie Baumeistern oder Steinmetzen in Verbindung zu bringen, wurde daher schon früh die Legende vom Maulbronner Paradiesbaumeister gesponnen. Bereits 1582 erkennt der Magdeburger Domprediger Sack in einem figürlichen Konsolstein den Baumeister Bohnesack (dokumentiert auch als Bohnensack bzw. Bohnsack) und beschriftet diesen Stein wohl auch gleich entsprechend. Max Hasak spinnt diese Legende 1896 weiter und erkennt im Meister Bohnesack den Erbauer des Magdeburger Bischofsgangs und der Maulbronner Bauten. Obwohl Richard Hamann diese Theorie bereits 1911 widerlegt hat, wird sie von Leopold Oelenheinz 1920 wieder aufgegriffen. Im Nachrichtenblatt der Denkmalpflege benennt er die Brüder Jordan und Berthold Bohnesack als Erbauer aller Halbmond-Bauten [3]. In den Halbmonden erkennt er zwei Bohnenschoten als Beleg für diese Theorie. Hermann Giesau veröffentlicht noch im selben Jahr eine Gegendarstellung [4]. Die Legende war aber einmal in die Welt gesetzt und geistert seither beständig durch Literatur und nun auch durch das Internet.

Hinzu kommt, dass sich das Halbmond-Motiv auch noch an anderer Stelle im Kloster Maulbronn findet: Auf zwei Grabplatten ist es ebenfalls zu erkennen (Bilder 3 und 4). Dies hat bereits zu weiteren Baumeister-Theorien geführt. So wird in einer Publikation der Eigentümerin der Stauferburg Magenheim Zeisolf II. von Magenheim als möglicher Paradiesbaumeister identifiziert [5].

Weitgehend unklar bleibt, ob es sich bei den Halbmonden überhaupt um Steinmetzzeichen handelt. Diese treten für gewöhnlich nicht in solch gehäufte Form und prominenter Position auf. So wie sich Zahn- und Rundbogenfries an den verschiedensten romanischen Bauwerken finden, könnte es sich auch schlicht um ein Stilmerkmal dieser eng mit den Staufern verbundenen Bauepoche handeln.

3 Das Paradies

Die Vorhalle der Klosterkirche, das sogenannte Paradies, ist zweifelsohne der qualitativste Bau-

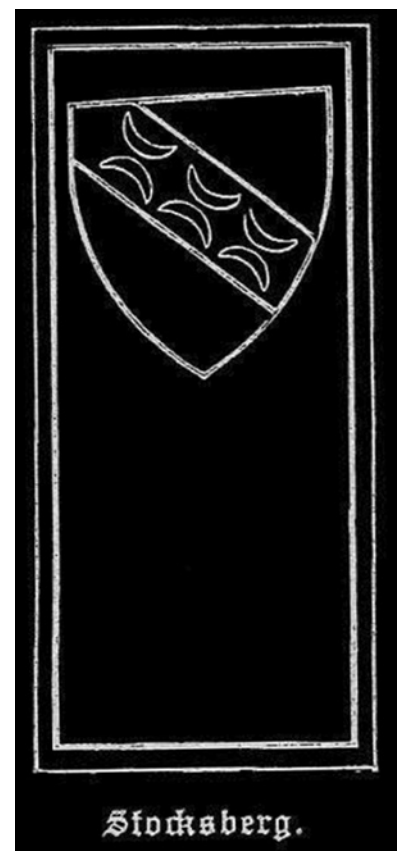
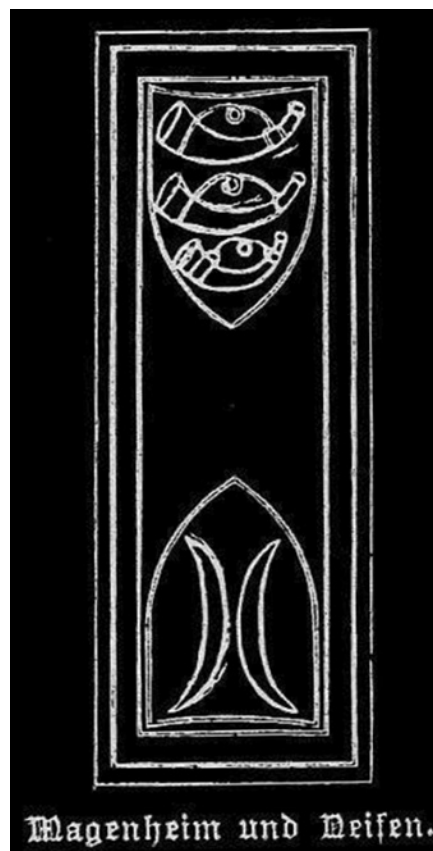


körper des frühen 13. Jahrhunderts in Maulbronn (Bild 5). Die Vorhalle diente als Ort der Rechtsprechung und Gerichtsbarkeit [6]. Mit Erreichen des Hauptportals erhielten damals Verfolgte Kirchenasyl. Die Grundform des Paradieses besteht aus drei Jochen, die von Kreuzrippengewölben überwölbt sind. Die Bögen folgen noch einer reinen -romanischen- Rundbogenform. Durch einen geometrischen Kunstgriff, der so einfach wie genial ist, liegt der Scheitelpunkt der längeren Diagonalrippen auf gleicher Höhe wie bei den kürzeren Schild- und Scheidebögen; sie beginnen auf unterschied-

Bild 2
Maulbronner Konsolsteine mit Halbmond-Motiv

Bild 3
Grabplatte mit Wappen Magenheim und Neifen

Bild 4
Grabplatte mit Wappen Stocksberg





licher Höhe. Während die profilierten Rippen -gotisch- in Pfeilerbündeln enden, folgen die Fenster wieder der -romanischen- Rundbogenform. Herausragend ist aber ein weiteres Merkmal: Während im zweischaligen Mauerwerk der romanischen Klosterkirche Innen- und Außenschale unabhängig voneinander aufgemauert sind, folgt das Paradies einer Art Baukastensystem. Die Horizontalfugen laufen innen und außen auf einer Höhe durch. Dies ist besonders auffällig auf Höhe der gestaltprägenden Kapitelle und Säulenbasen [7].

4 Der südliche Kreuzgang

Ein weiterer Teilbau dieser Epoche ist der südliche Kreuzgang. Typisch gotisch finden sich auch hier Gewölbe mit profilierten Rippen, die nun auch Spitzbogenform aufweisen. Die Fensterform bleibt mit ihrer Rundbogenform noch der Romanik verhaftet. Ursächlich dafür ist die Einführung einer „Angstripe“, die in die Außenfassade abgeleitet wird (Bild 6). Dadurch kann die Außenwand nicht vollständig aufgebrochen werden. Diese besondere Gewölbeausbildung findet sich auch im Herrenrefektorium wieder.

5 Das Herrenrefektorium

Gegenüber dem berühmten Dreischalenbrunnen liegt das Portal zum frühgotischen Herrenrefektorium, dem prächtigen Speisesaal der Mönche. Der Bau muss um 1230 fertiggestellt worden sein. Allein seine Dimensionen, zusammen mit der Qualität der Steinmetzzeichen, verdeutlichen den Anspruch eines repräsentativen Saals, der einer Königshalle durchaus würdig ist [8]. Spätestens bei diesem Bauwerk stellten die Mönche ihr Ideal der Bescheidenheit in den Hintergrund und brachten

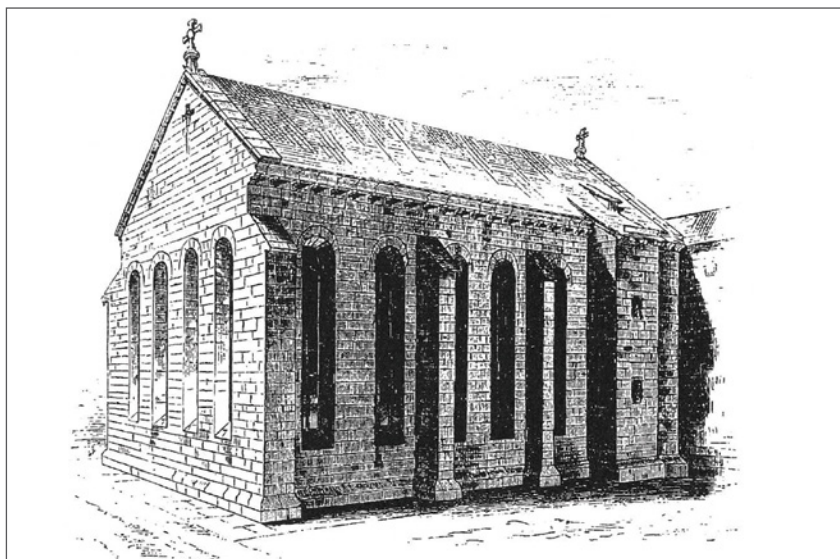


Bild 5

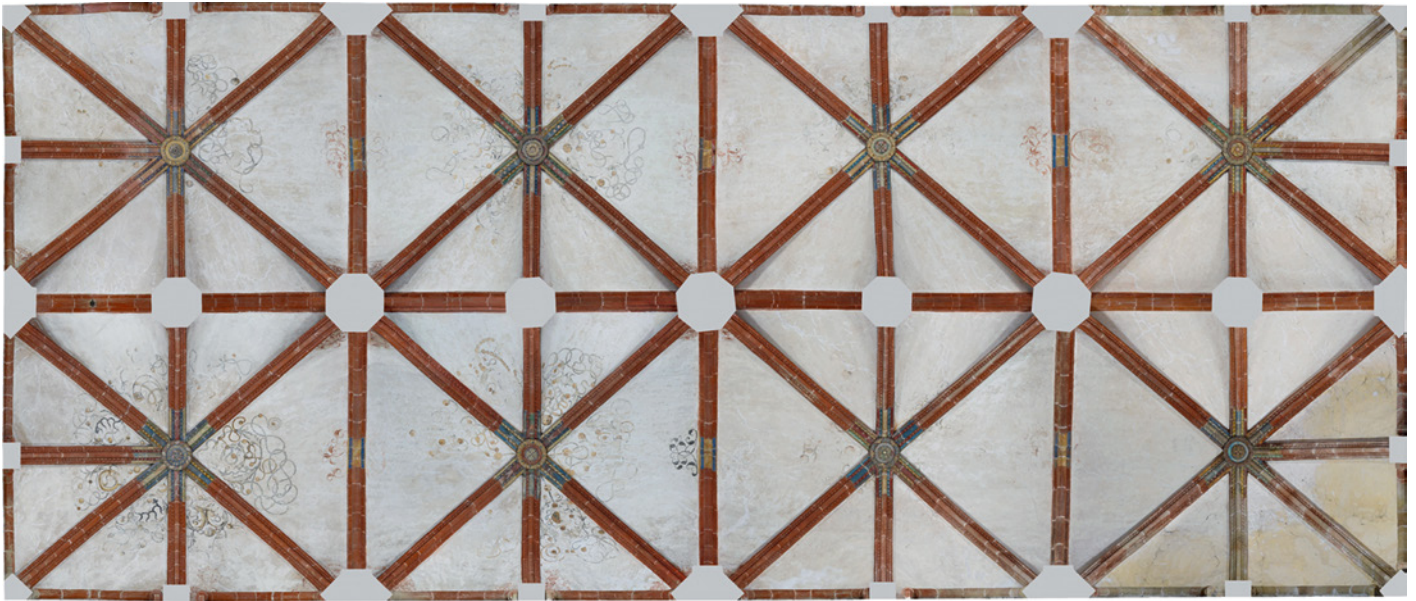
Das sog. Paradies – die Vorhalle der Klosterkirche

Bild 6

Kreuzgang Süd, Gewölbe mit „Angstripe“

Bild 7

Herrenrefektorium



die inzwischen aufgebaute Machtposition zum Ausdruck. Äußerlich ist das Gebäude mit seinen hohen Rundbogenfenstern noch stark der Romanik verhaftet (Bild 7). Im Inneren sind die Zeichen der neuen Zeit jedoch klar erkennbar. Insbesondere das zweischiffige Gewölbe mit den profilierten Rippen spricht die Sprache der Gotik. Lediglich ein Detail zeigt, dass man der neuen Bauform vielleicht noch nicht vollständig vertraut: wie im Kreuzgang ergänzen zusätzliche „Angstrippen“ zu den Außenwänden die Kreuzrippenform (Bild 8).

5.1 Schadensbild

Inhalt der Instandsetzungsmaßnahme am Herrenrefektorium waren Fäulnisschäden am Dachtragwerk, abrutschende Ortgang-Abdeckplatten, Gebäuderisse außen und innen, sowie verschiedene konservatorische Problemstellungen an der Natursteinfassade und der Innenraumschale. Weiterhin konnte ein eingelagertes Steinkreuz wieder auf dem Nordgiebel montiert werden.

Besonderes Augenmerk verdient jedoch ein großer Riss über dem nördlichsten Fenster der Westfassade (Bild 9). Dieser Riss war nicht nur außen, sondern auch innen deutlich erkennbar. Zudem waren im Innern einzelne Rippensteine bereits deutlich abgerutscht.

5.2 Schadensursache

Die nördliche Giebelscheibe weist im Gegensatz zu den Ost- und Westfassaden keine Pfeilervorlagen auf. Daher lag die Erklärung für das Rissbild nahe, dass der Diagonalschub der Gewölbe den Giebel weggedrückt und so den Schaden verursacht haben könnte. Eine genaue Bauaufnahme ergab jedoch, dass die Giebelscheibe keinerlei Verkipfung aufwies und die Schadensursache daher an anderer Stelle gefunden werden musste [9].

Bild 8
Gewölbe mit „Angstrippen“

Bild 9
Nordwestecke,
Riss über Fenster



Nach Stellung der Gerüste konnte das Schadensbild eingehender untersucht werden. Betrachtungen der Fassungsfolgen zeigten, dass der Schaden bereits kurz nach Errichtung des Gebäudes aufgetreten sein musste. Leider war er jedoch nicht zum Stillstand gekommen, sondern in den kom-

menden Jahrhunderten immer weiter gewachsen und auch bearbeitet worden. Selbst in den 1980ern gekittete Risse in den Gewölbesegele waren bereits wieder aufgerissen [10]. Nach Reinigung der Gewölbe von Spinnwebresten wurde auch dort das Schadensbild klarer erkennbar. Auf die Fährte der

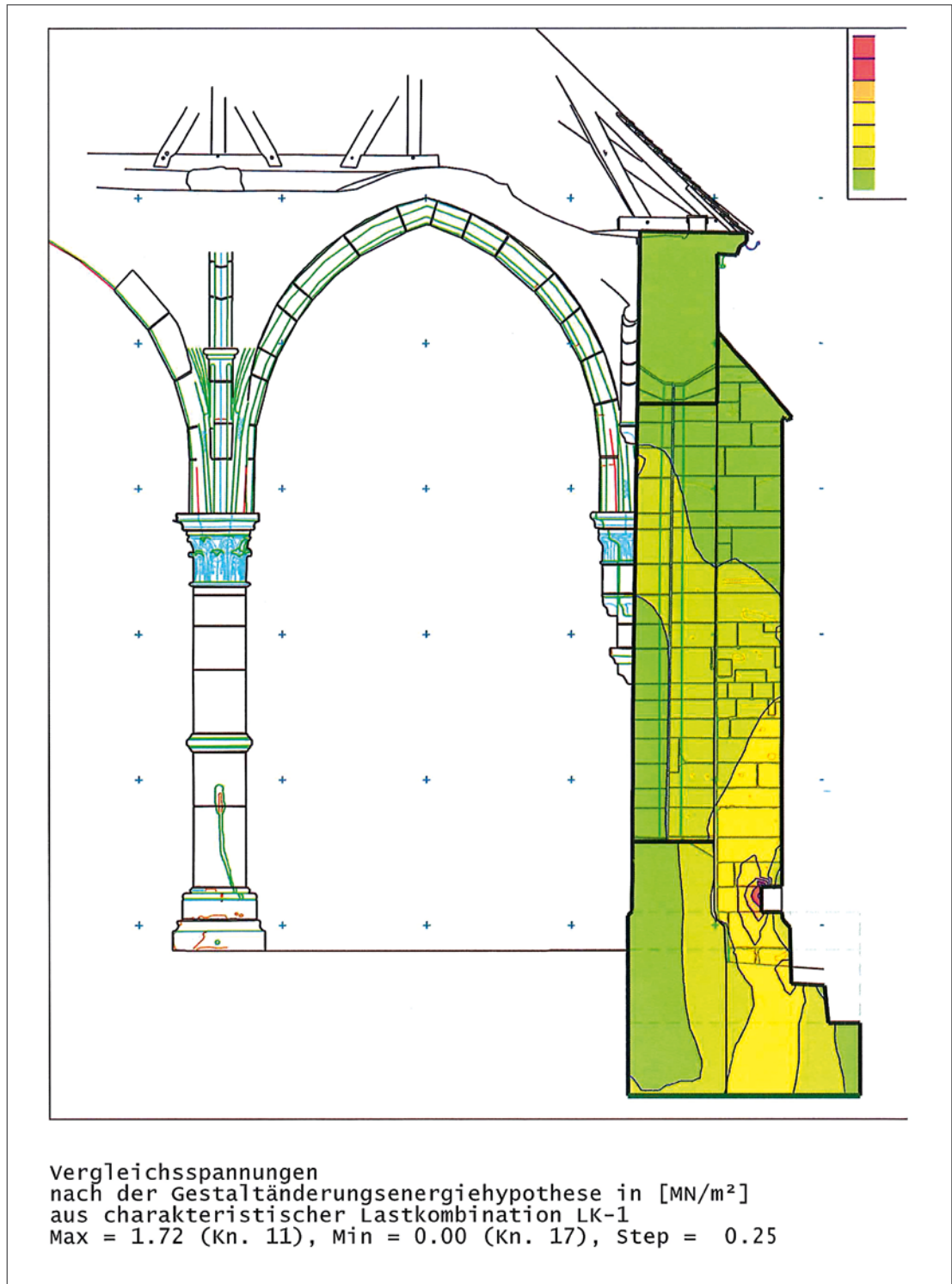


Bild 10
Pfeilervorlage,
statische Untersuchung

Schadensursache führten schließlich tiefe Risse in der Nord-Südachse der beiden nordwestlichen Gewölbejoche. Zudem war von außen in der Nahsicht erkennbar, dass die Wand nicht nur einen Riss aufwies, sondern der südliche Wandabschnitt auch komplett nach außen verkippt war.

Die Ursache für diese Verkipfung war schnell gefunden. Der Fußpunkt der naheliegenden Pfeilervorlage hatte sich mehrfach abgesenkt, so dass diese sich nicht mehr nach unten abstützen konnte und daher wie ein Rucksack an der Wandscheibe hing (Bild 10).

5.3 Schadensbehebung

Um die Schadensursache weiter untersuchen und beheben zu können, wurden zunächst Ost- und Westfassade des Herrenrefektorium temporär miteinander verspannt. Danach konnte der betreffende Pfeilerfuß freigelegt und näher betrachtet werden. Bereits wenige Zentimeter unter der Belageebene wurde die Schadensursache entdeckt. Im Zuge von früheren Reparaturmaßnahmen waren hier Steine mangelhaft ausgetauscht worden. Dies hatte zu den Setzungen des Pfeilerfußes geführt. Tiefere archäologische Grabungen ergaben keine weiteren Mängel am Fundament [11]. Baugrunduntersuchungen belegten, dass der Boden für Maulbronner Verhältnisse ausreichend tragfähig war [12]. Daher konnte auf weitergehende Eingriffe in die Fundamentierung verzichtet werden. Ein qualitätsvoller Ersatz der mangelhaften Bausubstanz beseitigte dann die Schadensursache abschließend (Bilder 11 und 12). Flankierend wurden die Risse, Schäden und Absenkungen an Putz und Stein konservatorisch behandelt [13].

6 Zeitreise in die Gründungsphase des Klosters Maulbronn

Wie um den Paradiesbaumeister ranken sich auch um die Gründungsphase des Klosters Maulbronn verschiedene Mythen. Widerlegt ist inzwischen die Legende, dass ein Maulesel im Salzachtal eine Quelle entdeckt habe und daher der Name Maulbronn stamme. Vielmehr kommt der Name wohl

von „Mulenbrunnen“, worin die Worte Mühle und Brunnen enthalten sind. Dies deutet darauf hin, dass die Zisterziensermönche sich keineswegs in einem wilden Tal ansiedelten und dieses urbar machten. Schriftliche Quellen lassen vermuten, dass es im Tal der Salzach bereits ein Hofgut gab, das zum Kloster Hirsau gehörte [14]. Das bleibt auch gültig, obwohl die Bespannung des romanischen Hauptportals der Kirche nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich von einem Maultier stammt.

Bild 11
Rückbau Pfeilerfuß

Bild 12
Neuersatz Pfeilerfuß



7 Das Herrendorment

Reste von Vorgängerbauten, die vielleicht zum vor- genannten Hirsauer Hofgut gehört haben, finden sich noch heute im Keller des Herrendorments [15]. Letzteres beherbergte ursprünglich den Schlafbereich der Herrenmönche und reicht baulich vom nördlichen Querhaus der Kirche bis über die unterirdisch verlaufende Salzach. Über die Dormenttreppe war der Schlafbereich mit dem Chor der Kirche verbunden, so dass die Mönche auf direktem Weg zu den Stundengebeten ins Chorgestühl kommen konnten. Auffällig ist, dass Kirchenlanghaus und Südquerhaus rechtwinklig aufeinander stoßen, das Nordquerhaus hingegen mit einem leichten Knick nach Norden führt. Auch dies ist eventuell ein Beleg dafür, dass auf vorhandene Bauten Rücksicht genommen wurde.

Bei den Umbaumaßnahmen für das Evangelische Seminar Maulbronn war das nördliche Herrendorment der letzte Bauabschnitt (Bild 13). Mit Klassenräumen, Musiksaal und Übzellen handelt es sich dabei um das Herzstück des Seminars. Statische Fragestellungen und die vielfach veränderte

Bausubstanz machten diesen Bauabschnitt zu einer besonderen Herausforderung.

7.1 Statische Probleme im Großen Keller

Der Große Keller ist das älteste Bauteil im nördlichen Herrendorment (Bild 14). Er bietet spannende Einblicke in das Bauschaffen der Romanik, da er nie fertig ausgebaut wurde. In seiner südwestlichen Ecke finden sich Reste des genannten Vorgängerbaus. In späteren Bauphasen wurde der Keller nach Norden und Westen erweitert. Auch im Obergeschoss und Dach gab es immer wieder bauliche Änderungen. Eine Schüttung von 1,50 Metern Höhe auf das Gewölbe des Großen Kellers sowie exzentrische Lasteinleitungen führten zu deutlichen Schäden. Das Kapitell einer Säule war mehrfach gerissen. In den Gewölberippen gab es Fehlstellen und Setzungen. Zudem waren in den Gewölben und Konsolsteinen weitere Risse zu beobachten. Bereits in den 1990er-Jahren musste der Keller daher geräumt und mit einer Hilfskonstruktion untergstützt werden.



Bild 13
Herrendorment Nord

Ein erster Schritt zur Untersuchung der Schäden und ihrer genauen Ursache war der schichtweise Ausbau der schweren Schüttung auf dem Gewölbe. Dies erfolgte unter archäologischer Begleitung. Dabei kamen interessante Befunde zu Tage, die untersucht und dokumentiert wurden. So befand sich über der südöstlichen Ecke des Großen Kellers ein kleineres Gewölbe mit Eingriffsöffnung von oben, das wohl ursprünglich zur Aufbewahrung von Wertgegenständen gedient hat (Bild 15). Als nächstes mussten die exzentrischen Lasteinleitungen aus dem Dachgeschoss in das Gewölbe so umgeleitet werden, dass deren Schadenspotential entkräftet wurde. Die Südostecke des Großen Kellers musste mit Hilfe von Bohr- und Verpresstechnik gesichert werden. Es folgten steinkonservatorische und steinmetzmäßige Ertüchtigungen unter größtmöglichem Substanzerhalt [16]. Anschließend wurde das gerissene Kapitell im Erdgeschoss mit Metallringen gesichert (Bild 16). Im Obergeschoss ersetzte eine leichte Schüttung aus Glasschotter den überschweren Bodenaufbau, um das Gewölbe dauerhaft zu entlasten.

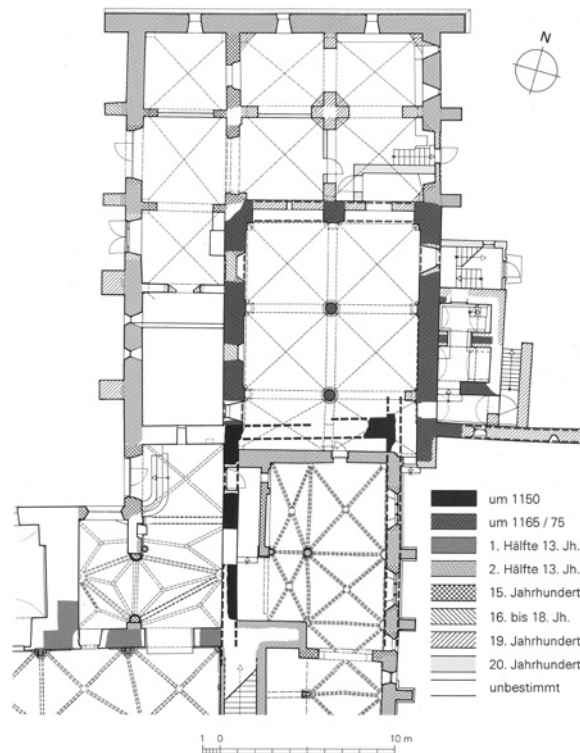


Bild 14
Bauphasen Erdgeschoss mit Großem Keller (dunkler Bereich)

Bild 15
3D-Scan Lichthof über Großem Keller

7.2 Barrierefreiheit und Brandschutz

Bereits mit Beginn der Planungen war klar, dass auch ein Schulgebäude im UNESCO-Weltkulturerbe gewisse Mindestanforderungen an den Brandschutz und die Barrierefreiheit erfüllen muss. Dies gilt umso mehr, wenn sich die Schulräume im Obergeschoss und Dach befinden. Frühe Entwürfe sahen daher ein außenliegendes Treppenhaus mit Aufzuganlage vor. Unter den Gesichtspunkten der Eingriffsminimierung und der Reversibilität ist dies sicherlich eine vielfach angewendete und bewährte Lösung. In Maulbronn wurden solche Anbauten bisher jedoch tunlichst vermieden, um das Gesamtbild der Anlage nicht zu beeinträchtigen.

Zum Glück konnte dieses Dilemma im Zuge der Bauausführung gelöst werden. Zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss gab es einen Deckenabschnitt, der bereits im 19. Jahrhundert eingestürzt war. Dort befand sich zu Beginn der Maßnahme eine Betondecke, die ohne Bedenken rückgebaut werden konnte. Durch eine äußerst genaue Bauaufnahme und präzise abgestimmte Planung gelang es, durch diese Deckenöffnung so-





wohl eine zusätzliche Treppe als auch einen Aufzug mit minimaler Über- und Unterfahrt zu führen. Die historische Dachkonstruktion blieb weitgehend unangetastet, indem der oberste Treppenlauf um neunzig Grad gedreht wurde (Bild 17).

7.3 Der Musiksaal

Obwohl das Kloster Maulbronn für den guten Erhalt seiner mittelalterlichen Bausubstanz bekannt ist, gibt es eine große, unrühmliche Ausnahme. Im Zuge der napoleonischen Neuordnung Europas wurde das Herzogtum Württemberg zum Königreich erhoben und Friedrich I. 1806 sein erster König. Auf seinen Wunsch wurde 1807 das Seminar in Bebenhausen geschlossen, die Schüler nach Maulbronn verlegt und die Anlage in ein Jagdschloss umfunktioniert [17].

Dadurch mussten in Maulbronn kurzfristig größere Räume geschaffen werden, was gravierende Umbaumaßnahmen zur Folge hatte. Die innere Grundstruktur des Herrendorments wurde komplett verändert. Zudem sind im gesamten Obergeschoss rasterartig angeordnete Rechteckfenster eingebaut worden, um die neu geschaffenen größeren Räume besser zu belichten.

Auch in den Bereich des heutigen Musiksaals im Dachgeschoss wurde stark eingegriffen. Wände wurden versetzt und später ganz entfernt, Deckenbalken hochgehängt und die gotischen Maßwerksfenster im Nordgiebel durch Rechteckfenster analog zum Obergeschoss ersetzt.

Der Zustand des Raumes zu Beginn der aktuellen Maßnahme war entsprechend unbefriedigend: ein großer, niedriger Raum mit schlechten akustischen Eigenschaften und ungenügender natürlicher Belichtung. Die spitzbogigen, gotischen Fenster waren zwar von außen noch ablesbar, innen aber nicht wahrnehmbar.

Im Zuge der Rückbaumaßnahmen und Freilegungen wurde daher ausgiebig diskutiert, ob es eventuell möglich und sinnvoll wäre, die Rechteckfenster hier ausnahmsweise rückzubauen und die Maßwerksfenster zu rekonstruieren. Ein zugesetztes Maß-

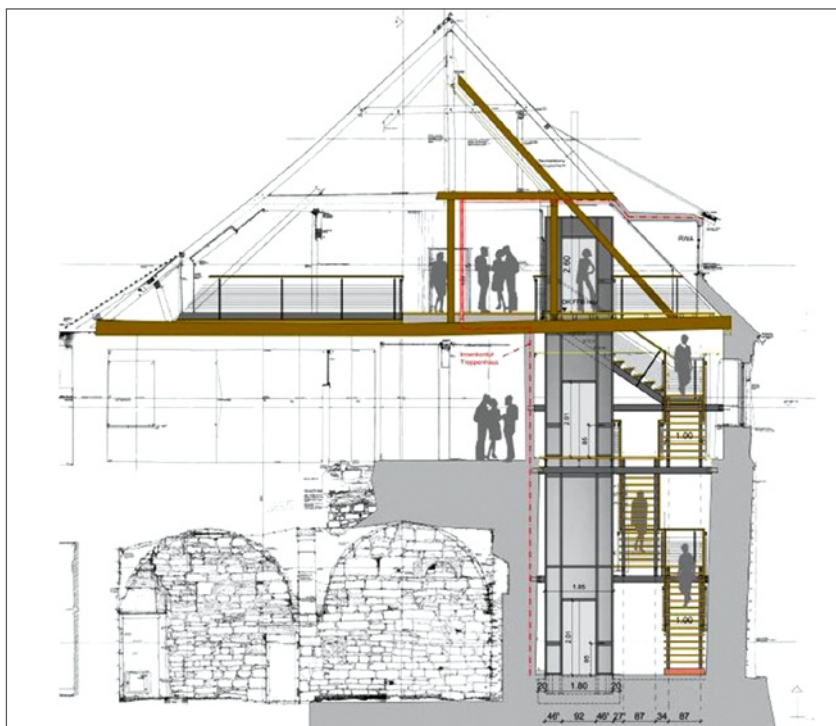


Bild 16
Großer Keller

Bild 17
Querschnitt

werksfenster war in der Fassade als Vorlage weitestgehend unversehrt erhalten geblieben. Diese Überlegung wurde im Detail durchgeplant und kalkuliert [18].

Es stellte sich jedoch heraus, dass eine Rekonstruktion gleich in mehrfacher Hinsicht problematisch wäre. Um die Natursteinstürze aus dem 19. Jahrhundert ausbauen und die abgearbeiteten Gewände ersetzen zu können, hätten weitere Rückbauten erfolgen müssen. Dabei wären wichtige Befunde unweigerlich verloren gegangen. Hinzu kam ein deutlich größerer Kostenaufwand als zunächst angenommen. Im engen Zusammenspiel aller Beteiligten wurde daher nach anderen Lösungen gesucht und diese schließlich auch gefunden. Durch einen Rückbau der Fensterbrüstungen und eine Öffnung des kleinen Spitzbogendreiecks über dem Fenstersturz wurde sowohl der Eingriff von 1807 als auch die ursprüngliche Form des Maßwerkfensers ablesbar gemacht (Bild 18). Zusätzliches Licht kam durch eine wiederaufgebaute Gaube auf der Westseite in den Raum. Die Freilegung der Deckenbalken optimierte die akustische Situation im Musiksaal (Bild 19).

8 Umgang mit Denkmalen

Auch 2019 lässt sich feststellen, dass die erarbeiteten Prinzipien im Umgang mit Denkmälern ihre Gültigkeit behalten haben. Der Sonderforschungsbereich 315 der Universität Karlsruhe hat hierzu in Maulbronn wichtige Grundlagenarbeit geleistet. Eine fächerübergreifende, konstruktive Zusammenarbeit ist unverzichtbar, um gute und dauerhaft tragfähige Ergebnisse zu erzielen. Größtmöglicher Erhalt der historischen Substanz und weitestgehende Reversibilität aller Eingriffe sollten Richtschnur für jede Entscheidung sein. Bei der Bearbeitung von Schäden an historischen Bauwerken haben sich die Verfahrensschritte – Anamnese (Aufnahme und Untersuchung), Diagnose (Erforschung und Bewertung der Ursachen) und Therapie (Behandlung) – bewährt.



Bild 18
Fenster des Musiksaals

Bild 19
Musiksaal innen

Literatur


- [1] Ministerium für Finanzen Baden-Württemberg (Hrsg.): Evangelisches Seminar Maulbronn. Sanierung und Ausbau. Ulm 2018
- [2] Knapp, U.: Das Kloster Maulbronn. Geschichte und Baugeschichte. Stuttgart 1997
- [3] Oelenheinz, L.: Vom Meister Bohnesack. in: Die Denkmalpflege. Berlin 1920
- [4] Giesau, H.: Wer war Meister Bohnensack. in: Kunstchronik und Kunstmarkt 56. 1920/21
- [5] von Lamezan, R.; Mangold, M.; Retsch, G.: Burg Magenheim. Dt. Burgenvereinigung 2000
- [6] Deimling, B.: Das mittelalterliche Kirchenportal in seiner rechtsgeschichtlichen Bedeutung. in: Die Kunst der Romanik. Könemann 1996
- [7] Knoch, P.: Klosterkirche Maulbronn. Bauaufnahme in Genauigkeitsstufe IV. Unveröffentlicht. Heidelberg 2010-2018
- [8] Mueller, C; Stober, K.: Kloster Maulbronn. Petersberg 2017
- [9] Landesamt für Denkmalpflege BW; Fischer, W.; Seidel, A: Herrenrefektorium. Bauaufnahme. Unveröffentlicht. 2017
- [10] Glaser, W.: Herrenrefektorium. Putz- und Fassungskartierung. Unveröffentlicht. Horb, 2017
- [11] Landesamt für Denkmalpflege BW: Herrenrefektorium. Archäologische Untersuchungen. Unveröffentlicht. 2018
- [12] Geotechnik Kärcher: Baugrunduntersuchung: Unveröffentlicht. Weingarten 2017
- [13] Bauer-Bornemann; Eger, F.; AeDis: Herrenrefektorium. Konservierungsmaßnahmen. Unveröffentlicht. 2018
- [14] Klunzinger, K.: Urkundliche Geschichte der vormaligen Cisterzienser-Abtei Maulbronn. Stuttgart 1854
- [15] Hassler, U.; Knoch, P.: Forschungsbericht zur Baugeschichte des Dormentbaus. in: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Berlin 1993
- [16] Wolfsholz A.; Betzold-Maak; Abel, J.: Herrendorment Nord. Natursteininstandsetzung. Unveröffentlicht. 2018
- [17] Ehmer, H.; Klumpp, M.; Ott, U.: Evangelische Klosterschulen und Seminare in Württemberg. Stuttgart 2006
- [18] Schäfer, H.; Abel, J.: Planungen zur Rekonstruktion von Maßwerksfenstern im Herrendorment. Unveröffentlicht. 2017

Abbildungen

- Titelbild: Dirk Altenkirch, Karlsruhe
Bilder 1, 9: VBBW, Pforzheim
Bild 2: Leopold Oelenheinz, Coburg
Bilder 3, 4, 7: Eduard Paulus, Stuttgart
Bilder 5, 13, 16, 18, 19: Dirk Altenkirch, Karlsruhe
Bild 6: Uwe Gaasch, Bamberg
Bild 8: Messbildstelle, Dresden
Bild 10: Büro für Baukonstruktionen, Karlsruhe
Bilder 11, 12: VBBW / Johannes Abel, Auggen
Bild 14: Landesamt für Denkmalpflege / Ulrich Knapp / Judith Risse
Bild 15: Landesamt für Denkmalpflege BW
Bild 17: VBBW / Peter Knoch, Heidelberg

Münster Salem, Westfassade – Konservierung der Konservierung Umgang mit gefestigtem Molassesandstein

von Albert Kieferle und Peter Reiner



Zwischen 1997 und 2002 fand eine teilweise Konservierung der Molassesandsteine des Münsters Salem statt. Ab 2013 erfolgte die Restaurierung seiner Fassade und die bereits vormals konservierten Bereiche mussten erneut überarbeitet werden. Dabei kam bei den Arbeiten um 2000 ein Konzept, basierend auf Kieselsäureester und Kieselzol als Bindemittel zur Anwendung. Es war geplant, bei der erneuten Konservierung bei diesem Konzept zu bleiben. Dies scheiterte jedoch an der Fließfähigkeit der Verfüllmaterialien. Stattdessen wurde eine nach der Vorfestigung nass in nass applizierte Verfüllung mit Steinsilikatkleber angewendet.

Baugeschichte

Die ehemalige Abtei, später dann Schloss in Salem, wurde im frühen 12. Jahrhundert in einer feuchten Ebene nördlich des Bodensees von den Zisterziensern gegründet. Wenig später ist die Abtei reichsunmittelbar und 1178 direkt dem Papst unterstellt worden. Auf diesem rechtlichen Fundament, das dafür sorgte, dass sie sich aus regionalen Turbulenzen und Querelen heraushalten konnte, wurde im späten 12. Jahrhundert ein erstes Münster errichtet. In den Folgejahren kam das Kloster dann zu einigem Reichtum und ab 1285 konnte das heutige Münster in den zu diesem Zeitpunkt modernen gotischen Formen errichtet werden. 1425 ist der Bau abgeschlossen worden (Bilder 1 und 2).

Bild 1
Münster Salem,
Ansicht Westfassade



1697 zerstörte ein Brand die Klostergebäude, die in der Folgezeit in barocken Formen neu aufgebaut wurden. Das Münster war beim Brand weitgehend unbeschädigt geblieben.

Spätestens im 18. Jahrhundert erfolgten umfangreiche Umbauten, mit denen wohl auch Instandsetzungen an der Fassade einhergingen. Die heutige Raumkonzeption des Chors geht auf einen Umbau der 1750er Jahre zurück. Zu diesem Zeitpunkt bekam das Münster auch eine barocke Ausstattung aus der Feuchtmeier Werkstatt. Nur kurz darauf wurde die Ausstattung abermals unter Johann Georg Dirr und Johann Georg Wieland umgestaltet. Diese Ausstattung mit ihren Alabasteraltären und der zurückhaltenden Wandgestaltung ist bis heute weitgehend unverändert erhalten.

Im Zuge der Säkularisation wurde das Kloster, das zwar im Zuge der französischen Revolution sehr bedeutend geworden war aber kaum noch Mönche beherbergte, geschlossen und die Besitzungen kamen schließlich zum Haus Baden. 1815 wurde der barocke Dachreiter durch einen schlichten hölzernen, mit Blech beschlagenen Dachreiter ersetzt. Erst um 1885 erfolgte eine umfangreiche Instandsetzung des Münsters. Im Zuge dieser Instandsetzung wurden dann auch die nicht sehr umfangreichen barocken Formen an der Fassade beseitigt. Diese Instandsetzung ist noch heute sehr gut erkennbar, da hier der graugrüne Rorschacher Sandstein Verwendung fand. Die ältesten Gebäudeteile wurden aus dem in der Region anstehenden gelblichgrünen Material errichtet. Daneben finden sich noch Bereiche, die aus einem grünlichen bis bräunlichen Sandstein bestehen. Die um 1885 erneuerten Bereiche umfassen grob den Sockelbereich einschließlich großer Teile der Strebepfeiler und die Ziergiebel des Langhauses, Chors und Querhauses.

Restaurierungsgeschichte des 20. Jahrhunderts

Bald nach der sehr umfänglichen Instandsetzung ab 1885 müssen sich neue Schäden gezeigt haben, die sich dieses Mal als Schalenbildung im eben erst eingebauten Rorschacher Sandstein äußerten. Dies

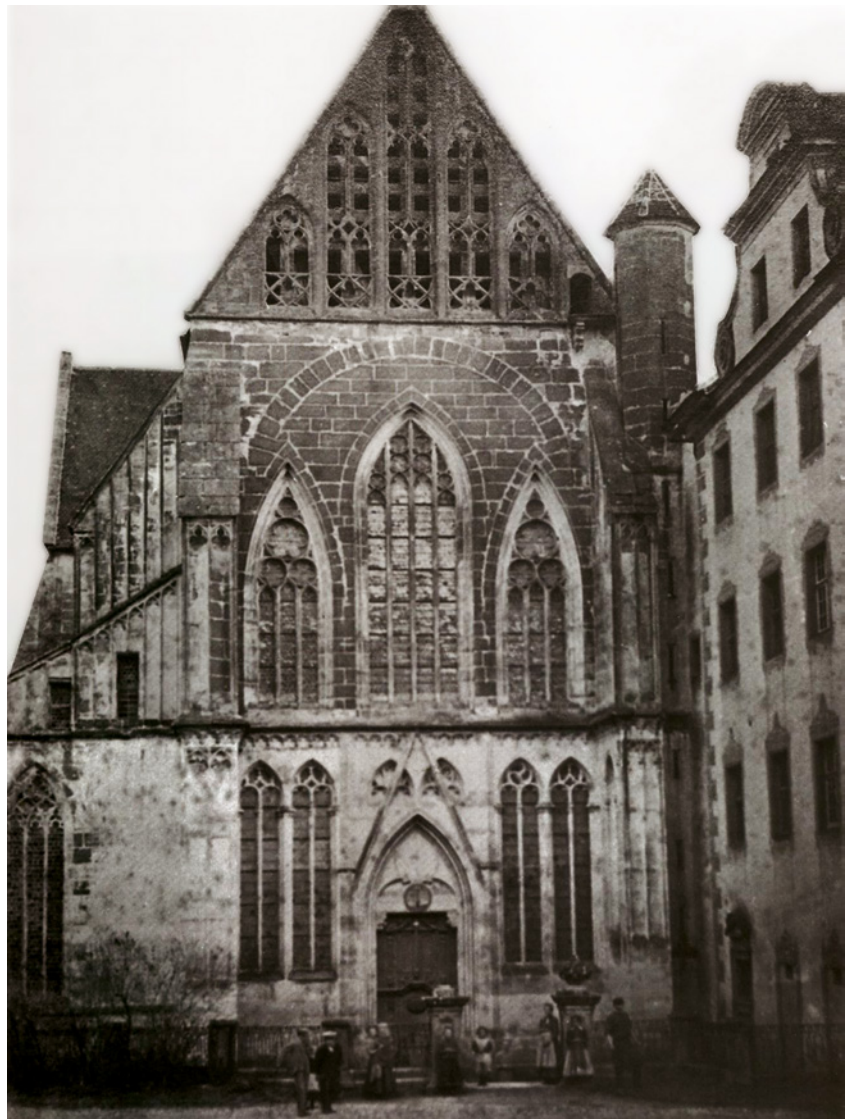
muss für die Bauherrschaft sehr entmutigend gewesen sein, was erst mal dazu führte, dass keine Maßnahmen ergriffen wurden. Spätestens seit den 1970er Jahren sind jedoch neue Wege untersucht worden. Eine erste Untersuchung zur Festigung mit Kieselsäureester wurde 1971 durch das Doerner-Institut in München durchgeführt [Wendler 1993]. Im Zuge des BMFT-Projekts ‚Steinzerfall/Steinkonservierung‘ wurden dann ab den frühen 1990er Jahren umfangreiche, detailreiche Untersuchungen vorgenommen, die später im Rahmen des deutsch-französischen Kulturabkommens fortgesetzt worden sind. Die Forschungsprojekte umfassten ebenso Grundlagenforschung, als auch anwendungsnahe Forschungsansätze. Hydrogeologische Untersuchungen wurden durch zerstörungsarme Untersuchungen zur Feuchteausbreitung im Mauerwerk ergänzt. Die Feuchteausbreitung im Porenraum des Steinmaterials wurde ebenfalls mit neuen, elektronenmikroskopischen Verfahren untersucht. Das Forschungsprojekt umfasste auch petrographische und baugeschichtliche Untersuchungen, eine erste Schadenskartierung [Ettl 2002a] [Zehnder 1993], Simulationen von Schadstoffschädigungen [Grassegger 2002] und schließlich eine Musterrestaurierung, die naturwissenschaftlich nachuntersucht wurde [Ettl 2002b].

Konservierende Sicherung 1997–2002

Ab 1996 wurde das Münster in Teilen eingerüstet, um eine Dachinstandsetzung vornehmen zu können. Es zeigte sich schnell, dass die Fassade in einem mindestens ebenso schlechten Zustand, wie die Dächer waren. Da Albert Kieferle und Peter Reiner in der näheren Vergangenheit Bestandsaufnahmen und Maßnahmeplanungen an sehr umfangreichen Bauwerken durchgeführt hatten, wurden sie angefragt, ob sie kurzfristig eine Planung für die zu diesem Zeitpunkt eingerüsteten Bereiche des Westgiebels und des Langhausobergadens durchführen könnten. Die Planung konnte sehr zügig umgesetzt werden, doch zeigte eine erste Kostenschätzung mit einer Hochrechnung über die gesamte Fassade, dass die Mittel nicht kurzfristig aufgebracht werden konnten.

Zusammen mit Otto Wölbert, Restaurator beim Landesdenkmalamt, entwickelten Kieferle und Reiner das Konzept einer ‚konservierenden Sicherung‘ (Bild 3). Es wurde bald klar, dass der verhältnismäßig kostspielige Steinaustausch nicht zu bewerkstelligen sein würde. Er sollte auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. Die Konservierungsanteile des Gesamtkonzepts schienen aber, wenn auch unter Schmerzen, umsetzbar. Im Hinblick darauf, dass die Verkehrssicherheit herzustellen war, mussten Schalen abgestoßen werden. Bereiche, die durch Abnahme der losen Oberflächen nicht sicherbar waren, was im Wesentlichen die Maßwerke der Giebel betraf, wurden mit Gittern gesichert, so dass wenigstens keine Steinstücke auf Passanten herunterfallen konnten. Ästhetisch

Bild 2
Westfassade nach 1850



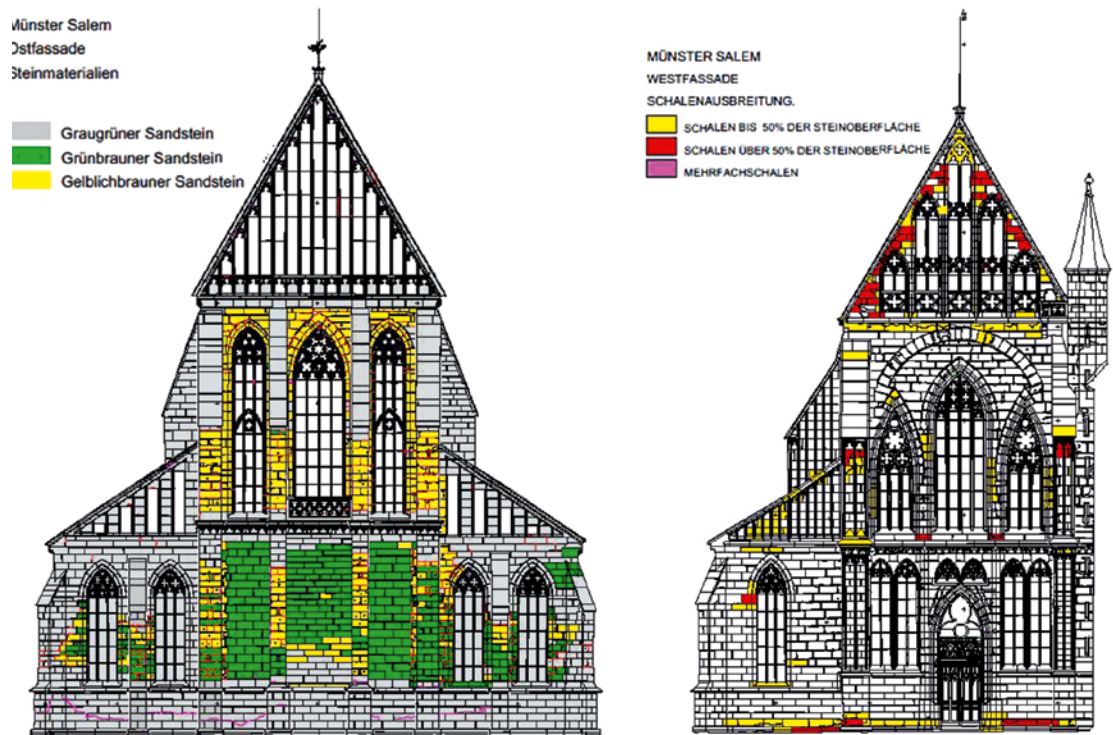


Bild 3
Kartierungen 1997 – 2001

war das Ergebnis deutlich schlechter, als der ange-troffene Zustand, aber das Objekt konnte wieder für die nächste Zeit ohne Gefahr benutzt werden [Wölbert/Kieferle 2002].

Die ‚sichernde Konservierung‘ sah neben der Abnahme der Schalen, die abzufallen drohten, die Riss- und Schalenverfüllung mittels kieselig gebundener Injektionsmaterialien sowie Kittungen und Schlämmungen auf derselben Basis für eine umfangreiche Festigung vor und schließlich Mörtelergänzungen mit Steinerfüllungsmörtel. Die verwendeten Materialien entsprachen denen für die Musterfläche, die von der Fa. Kaiser im Rahmen der Forschungsprogramme angelegt wurde und die die Fa. Kaiser auch lieferte. Schließlich mussten noch drei Werkstücke erneuert werden. Zwei, um einen Riss im Mauerwerk kraftschlüssig zu schließen und einer als Ersatz für eine fehlende Maßwerkstrebe.

Die Konservierungsarbeiten führte die Firma Bauer-Bornemann in drei Bauabschnitten zwischen 1998 und 2002 durch [Bauer-Bornemann 2002](Bild 4). Die Arbeiten wurden in einem Arbeitsheft der Denkmalpflege 2002 umfangreich dokumentiert und veröffentlicht. Die Fa. Bauer-Bornemann ging mit einer zu dieser Zeit sehr seltenen Routine an

die Arbeit. Die Arbeitsweisen waren zwar teilweise eher ungewöhnlich, aber sehr wohl wirksam. Auffällig war die von der Firma Bauer-Bornemann entwickelte Technik zur Verfüllung von Rissen und Schalen, die durch kurze Schläuche erfolgte, die auf die Steinoberfläche aufgeklebt und kontinuierlich nachgefüllt wurden, sodass das Verfüllmaterial mit nur minimalem Druck nach und nach einsickern konnte. Die Bearbeitung großer Flächen mit diesem Konservierungskonzept war zu diesem Zeitpunkt sehr selten. Die Festigung wurde vollflächig ausgeführt. Es wurden gut 21/m² Verfüllmaterial verbraucht [Dokumentation Bauer-Bornemann, 2002], [Eckstein et al. 2002].

Die Flächen wurden im Januar 2009 zum ersten Mal wieder im Rahmen des Monitoring durchgesehen. Zu diesem Zeitpunkt konnten keine nennenswerten Schäden festgestellt werden. Nach dem Kauf des Münsters und weiterer Teile der Abteigebäude bzw. des Schlosses im Jahr 2009 wurden die Restaurierungsarbeiten durch das Land unter Leitung von Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Ravensburg zunächst mit dringend notwendigen Sicherungsarbeiten aufgenommen, ab 2013 die Arbeiten am Münster. Eine erneute Befahrung der Fassade mit dem Hubsteiger

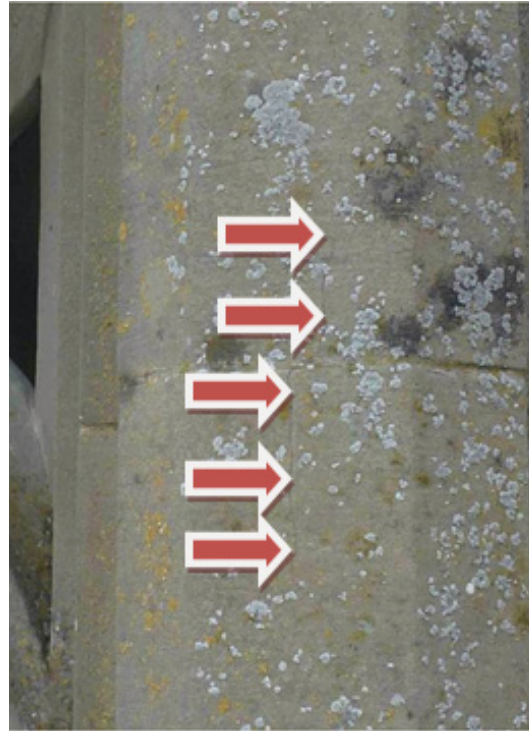


Bild 4
Verfüllung von Rissen und
Schalen um 2000

Bild 5
Neu aufgetretene Risse 2013

zeigte, dass Risse, die 1998 bereits beobachtet und verfüllt worden waren, sich geöffnet hatten (Bild 5).

Zunächst sollten das nördliche Langhaus und das Seitenschiff bearbeitet werden. Hier waren 1998 keine Arbeiten durchgeführt worden, sodass zunächst auf der Basis des bewährten Konzepts weitergearbeitet werden konnte. Der Eckstrebe- Pfeiler zwischen nördlichen Obergaden und West- fassade war allerdings bereits konserviert worden. Hier sollte das Restaurierungskonzept für die West- fassade vorbereitet werden.

Untersuchungen zum Verhalten gefestigter Molassesandsteine

Untersuchungsmaterial stand in Form von zu erneuernden Ecksäulen des Strebepfeilers und von Sockelsteinen zur Verfügung. Zunächst wurden die physikalischen Parameter von gefestigtem, gealtertem Molassesandstein und ungefestigtem Kern- bereich untersucht. Diese Untersuchungen führte das Labor Ettl und Schuh, München durch, das seit den Forschungsprojekten der frühen 1990er Jahre mit dem Objekt vertraut ist.

Untersucht wurden:

- das Quellverhalten als
 - Quelldruck und
 - Quellmaß sowie
- die Zugfestigkeit

jeweils an gefestigtem und ungefestigtem Molasse- sandsteinproben mit und gegen das Lager, wo- durch sich eine recht umfangreiche Messreihe ergab. Dieselben Untersuchungen wurden an einem Sockelstein wiederholt.

Das Quellmaß der ungefestigten Proben lag bei ca. 1 mm/m und entsprach den Werten aus der Literatur. Auch bei den Werkstücken mit gealterter Festigung lag der Wert in diesem Bereich. Das Quellmaß parallel und senkrecht zur Schichtung unterschied sich in der Regel nur unwesentlich. Bei neu eingebrachter Festigung war das Quellmaß mit ca. 0,33 mm/m bzw. 0,6 mm/m senkrecht zur Schichtung deutlich reduziert und zeigte auch eine deutliche Abhängigkeit zur Schichtung.

Ein Quelldruck, der in der Literatur [Kocher 2005] mit 0,03 bis 0,1 MPa angegeben wird, konnte an den Proben des Münster Salem nicht gemessen werden.

Die Haftzugsfestigkeit des gealterten Molassesandsteins streut zwischen 0,26 und 0,7 N/mm² und liegt deutlich unter den Werten des frischen Materials. Nach einer zweistündigen Wässerung halbierten bis dritteln sich die Werte. Die Veränderungen der Haftzugsfestigkeit erwies sich als unabhängig von der Festigung.

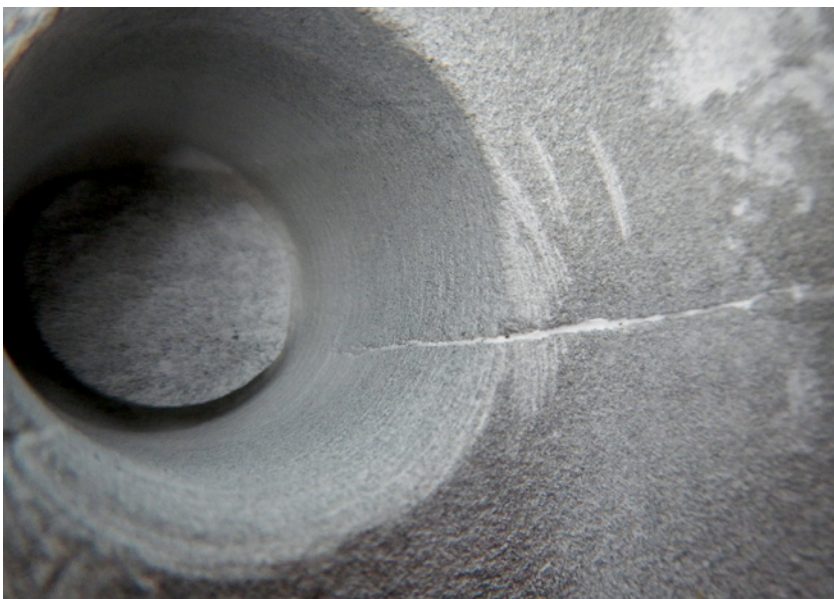
Die Schäden an den Ecksäulen und wahrscheinlich auch anderer, vergleichbar geschädigter Stücke wurden von H. Ettl weniger auf das Quellverhalten als vielmehr auf die sehr geringe Nassfestigkeit des Molassesandsteinmaterials zurückgeführt. Von den wieder aufgegangenen Rissen waren auch hauptsächlich die schlankeren, schnell und stark durchnässten Werkstücke betroffen [Ettl 2016].

Die Festigung sollte ebenfalls nochmals untersucht werden, da befürchtet wurde, dass eine erneute Festigung zu einer Überfestigung führen könnte. Eine Nachfestigung war auf jeden Fall in den Bereichen erforderlich, in denen mit Kieselsol gebundene Materialien appliziert werden sollten, was bei Schlämmen durchaus zu einer weitgehend flächigen Festigung führt.

Die Wirksamkeit der Festigung von 1998 – 2002 erschien nach 15 Jahren zweifelhaft. Der Festigungsverbrauch bei der konservierenden Sicherung war sehr hoch gewesen, die Oberfläche wies aber 2013 wieder großflächiges Absanden insbesondere an den Bereichen des Rorschacher Sandsteins auf.

Bild 6

Bohrprobe Verfüllung



Im Juni 2016 sind durch die Fa. Bauer-Bornemann, die die Konservierungsarbeiten am nördlichen Langhaus und Seitenschiff ausführte, Festigungsmuster angelegt worden. Bemustert wurden die Festiger Remmers Funcosil 300E, 300, 100 sowie 1:1 verdünnter Festiger Type 100, sodass sich Gelabscheidungsraten von 20 % KSE Type E, 20 %, 10 % und 5 % ergaben. Gefestigt wurden Mauerquader aus Rorschacher Sandstein.

Die Nachuntersuchung erfolgte 2017 als Bohrwiderstandsmessungen durch das Labor Ettl und Schuh, München, H. Ettl. Die Festigungsmuster waren zu diesem Zeitpunkt fast ein Jahr alt, also vollständig ausreagiert.

Die Ergebnisse der Messungen fasst Dr. Ettl folgendermaßen zusammen:

„Die Werksteinoberflächen der unbehandelten Musterfelder besitzen eine durchwegs hohe Bohrfestigkeit, die auch durch die Behandlung mit verschiedenen Kieselsäureestern nicht erhöht wird (und auch nicht erhöht werden muss). Sie entspricht größtenteils der Bohrhärte eines bruchfrischen Gesteins. Der bei einzelnen Bohrungen festgestellte Festigkeitsabfall im oberflächennahen Bereich (≤ 1 mm) ist gering, die resultierende Bohrhärte ist immer noch hoch. Baupraktisch ist diese geringe Entfestigung ohne Belang. Eine flächige Festigung der Bauteile ist nicht erforderlich.“ [Ettl 2017]

Restaurierungsarbeiten 2017 – 2018

Auf die praktische Restaurierung übertragen hieß das, eine Nachfestigung von mit Kieselsol gebundenen Bereichen ist ohne weiteres möglich. Eine Überfestigung ist nicht zu befürchten und eine vollflächige Festigung der Rorschacher Sandsteins war zudem nicht erforderlich.

Das Hauptaugenmerk bei den Maßnahmen am Westgiebel lag auf den Rissen, die im Zuge der konservierenden Sicherung verfüllt worden waren, aber sich wieder geöffnet hatten. Das ab 1998 verwendete mit Kieselsol gebundene Verfüllmaterial weist keine nennenswerte Haftzugsfestigkeit

auf, sodass eine Anbindung beider Rissflanken nicht entstand. Das Verfüllmaterial liegt letztlich nur in den Rissen bzw. Schalenhohlräumen und sorgt für eine hygrische und thermische Anbindung der Bereiche beidseits des Risses. Da sich die Risse wieder geöffnet hatten, war dies nicht mehr gegeben und Feuchte konnte ungehindert schnell und tief in das Steininnere vordringen. Bei Schalen entstand allmählich wieder eine thermische und hygrische Trennung. Feuchte und Schadsalze wurden nicht mehr zur Steinoberfläche transportiert und dort ausgewaschen. Die isolierende Wirkung der Luft konnte wieder zu einem Aufwölben der Schalen bei Erwärmung der Steinoberfläche führen.

Ursprünglich war geplant, nach einer Vorfestigung der Riss- und Schalenflanken mit Kieselsäureester eine Verfüllung mit Kieselöl gebundenen Injektionsmaterialien vorzunehmen, also im System von 1997 – 2002 zu bleiben. Die Vorfestigung sollte, um eine gute, tiefreichende Festigung zu erzielen, durch Packer infusionsartig erfolgen. Ziel war es, gegebenenfalls entstehende Unterschiede der Materialeigenschaften – auch wenn diese nicht messbar waren – möglichst weit von der Oberfläche ins Steininnere zu verlegen, um sie dem Einfluss von Niederschlägen und Hitze möglichst weit zu entziehen.

Den Zuschlag für die Arbeiten erhielt die Firma Riccardo Itta aus Überlingen, die gewohnt war, mit Molassesandstein umzugehen. Die Firma Itta hat die Arbeiten sehr engagiert ausgeführt und bei auftretenden Schwierigkeiten immer wieder sehr kreativ nach Lösungen gesucht. [Itta 2018]

Recht bald brachte Riccardo Itta den Gedanken auf, nach der Rissfestigung mit Kieselsäureester eine Verfüllung durch Injektagen im Remmers Modulsystem – ebenfalls auf Basis von Kieselsäureester – nass in nass durchzuführen, um sich Reaktionszeiten zu ersparen und nicht mit Resthydrophobie in der Tiefe der Risse umgehen zu müssen. Die Fließfähigkeit des Modulsystems erwies sich jedoch als nicht ausreichend, um die durch die vorangegangene Verfüllung stark verengten Risse weiter zu verfüllen. Mechanisch konnten die Risse nur an der Oberfläche durch Auskratzen wieder ausgeweitet werden. Wahrscheinlich stockte das Material durch die eher groben und kantigen

Zuschlagstoffe zu schnell und die Zugabe von Glas-kügelchen konnte das in der zu verfüllenden Rissbreite nicht mehr kompensieren. Versuche mit Steinsilikatkleber verliefen erfolgreich und führten zu guten Verfüllgraden, was anhand von Bohrproben überprüft wurde (Bild 6). Die Fließfähigkeit dieses Materials wird durch das enthaltene Kalziumhydroxid stark verbessert. Zusätzlich weist der Steinsilikatkleber eine höhere Haftzugsfestigkeit auf (ca. 1,0 N/mm²), die aber noch unter jener des Molassesandsteins (ca. 1,2 – 1,7 N/mm²) liegt. Die Verfüllungen wurden von der Fa. Itta sehr akribisch durchgeführt (Bild 7).

Die Kittungen sollten ursprünglich ebenfalls Kieselöl gebunden erfolgen.

Die Firma Itta musste feststellen, dass auch nach mehreren Wochen Reaktionszeit die Resthydrophobie noch nicht verschwunden war. Die Oberfläche des Steinsilikatklebers ist zudem recht glatt und erschwert ein Anhaften anderer mineralischer Materialien. Die sehr feinen Kittungen wurden auf Vorschlag der ausführenden Firma schließlich mit einem acrylatvergüteten Schlämmörtel durchgeführt.

Im Zuge der Arbeiten stellten sich immer wieder leichte Farbveränderungen der Kittung nach der Applikation ein. Betroffen waren besondere Bereiche, von denen bekannt war, dass eine gewisse Salzbelastung vorlag.

Bild 7
Rissverfüllung an einem
Giebelmaßwerk

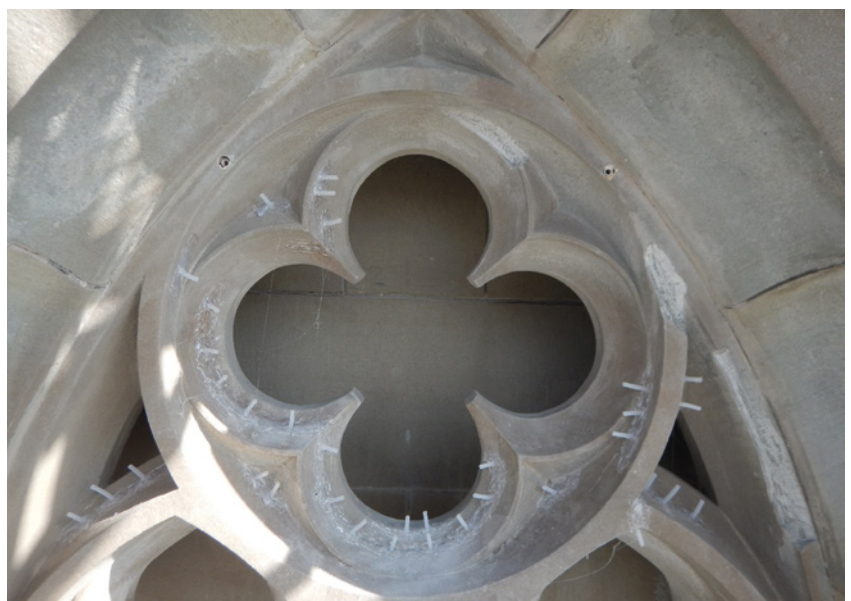




Bild 8 Das Konzept aus Vorfestigung der Riss- und Schalenflanken, Verfüllungen mit Steinsilikatkleber und Kittungen mit Acrylat vergütetem Schlamm-mörtel hatte auch den Vorteil, dass Nachfestigungen auf ein Minimum reduziert werden konnten.

Wie schon im vorangegangenen Bauabschnitt wurden die breiten Fugen der Restaurierung von 1885, soweit sie sich gelockert hatten, durch neue Fugen ersetzt, die das Erscheinungsbild von 1885 weitertradierten. Dies waren in den älteren Bereichen über das Runden der Steinkanten hinweg eingebaute, breite Fugen mit einem Fugenstrich. In den im späten 19. Jahrhundert und im Zuge dieser Maßnahme erneuerten Bereichen wurden sehr schmale Fugen eingebaut. Mörtelergänzungen rundeten die Konservierungsarbeiten ab (Bild 8).

Das Abschlagen der Schalen, die 1998 nicht zu halten waren, führte auch zu einem recht umfangreichen Steinaustausch, der nun durchgeführt wer-

den konnte. Erneuert werden mussten schwerpunktmäßig Stücke entlang der Giebelabdeckung, am Sockel, sowie exponierte Stücke an den Strebpfeilern. Die Arbeiten wurden von der Fa. Herbst aus Dinkelsbühl ausgeführt.

Die Erneuerung erfolgte mit Materialien, die der Exposition und dem umgebenden Bestand angepasst waren. Im Bereich mit Rorschacher Sandstein wurde in der Regel wieder Rorschacher Sandstein eingebaut. In stark bewitterten und durchfeuchteten Bereichen kam Bollinger Sandstein zur Anwendung. Die wenigen Stücke im mittelalterlichen, gelblichen Bestand wurden durch Teuffener Sandstein ersetzt.

Fazit

Die Konservierung der Konservierung von Flächen, die mit Hilfe der aktuellen kieseligen Materialien behandelt wurden, wirft nach augenblicklichem Kenntnisstand einige Fragen auf:

- Das Verhalten von Molassesandstein mit gealterter Festigung erscheint noch bei weitem nicht ausreichend erforscht zu sein. Für die Messergebnisse im Einzelnen gibt es noch keine befriedigenden Erklärungen. Sicherlich stellt der Molassesandstein ein besonders problematisches Gestein dar. Das in Salem am Münster verwendete Material erscheint zudem besonders problematisch.
- Die Restaurierung selbst erforderte zahlreiche Abweichungen vom ursprünglichen Konzept. Die ursprünglich vorgesehenen, mit Kieslsol gebundenen Materialien konnten aus jeweils unterschiedlichen Gründen nicht zur Anwendung kommen.
- Bei einer Nachinjektion wird eine deutlich bessere Fließfähigkeit als bei einer Erstinjektion erforderlich, da durch die Erstinjektion verengte Risse versorgt werden müssen.
- Die immer wieder zu beobachtende ‚Resthydrophobie‘, d. h. die sehr lange nicht abklingende Hydrophobie des Steinfestigers nach der Applikation, stellt nach wie vor ein Problem bei der Steinkonservierung dar, was zu Hindernissen im Arbeitsablauf führt.

Literatur

- Bauer-Bornemann 2002: U. Bauer-Bornemann, Steinrestauratorische Maßnahmen an den Fassaden – Bericht über die durchgeführten Arbeiten. In Eckstein et al. 2002, S. 135 – 142.
- Eckstein et al. 2002: G. Eckstein/A. Stiene, Das Salemer Münster, Befunddokumentation und Bestandssicherung an Fassaden und Dachwerk. Arbeitsheft 11, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Stuttgart 2002.
- Ettl 2002a: H. Ettl, Generelle Zustands- und Schadensaufnahme an den Fassaden. In: Ettl et al., S. 75 – 86.
- Ettl 2002b: H. Ettl, Untersuchungen zur Hinterfüllung und Anbindung von Schalen mit kieselgelgebundenen Mörteln. In Eckstein et al. 2002, S. 87 – 92.
- Ettl 2016: H. Ettl, Kloster- und Schlossanlage Salem, Sanierung 4. Bauabschnitt, 015 Münster Westfassade Quelldruckmessungen. Untersuchungsbericht einsehbar beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg und bei VB-BW, Amt Ravensburg.
- Ettl 2017: H. Ettl, Kloster- und Schlossanlage Salem, Sanierung 4. Bauabschnitt, 015 Münster Westfassade Untersuchung von Musterflächen. Untersuchungsbericht einsehbar beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg und bei VB-BW, Amt Ravensburg.
- Itta 2018: R. Itta, Maßnahmenbeschreibung über: Kloster und Schlossanlage Salem, Sanierung 4. BA, Münster Westfassade – Natursteinkonservierung. Dokumentation einsehbar beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg und bei VB-BW, Amt Ravensburg.
- Grassegger 2002: G. Grassegger, Molassesandsteine – Varietäten, Eigenschaften und Ursachen der

Verwitterung. In: Eckstein et al. 2002, S. 47 – 64.

Dieser Text enthält eine umfangreiche Liste weiterer Publikationen, die im Rahmen der Forschung am Münster Salem entstanden.

- Kocher 2005: M. Kocher, Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen, Dissertation LMU München, 2015.
- Wendler 1993: E. Wendler/LSattler/R. Snethlage/D. Klemm, Untersuchung zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit früherer Konservierungsmaßnahmen am Münster Salem. In: Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten, 1. Statuskolloquium des Deutsch-Französischen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmälern, Karlsruhe 1993, S. 179 – 184.
- Wölbert/Kieferle 2002: O. Wölbert, A. Kieferle, Detaillierte Bestandserfassung und Maßnahmenplanung an den Fassaden. In Eckstein et al. 2002, S. 97 – 134.
- Zehnder 1993: H. Ettl/K. Zehnder, Klosterkirche Salem: Generelle Zustands- und Schadensaufnahme an den Außenfassaden. In: Gemeinsames Erbe Gemeinsam Erhalten, 1. Statuskolloquium des Deutsch-Französischen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmälern, Karlsruhe 1993, 75-79; und zugehöriger unveröffentlichter Untersuchungsbericht von 1992.

Abbildungen

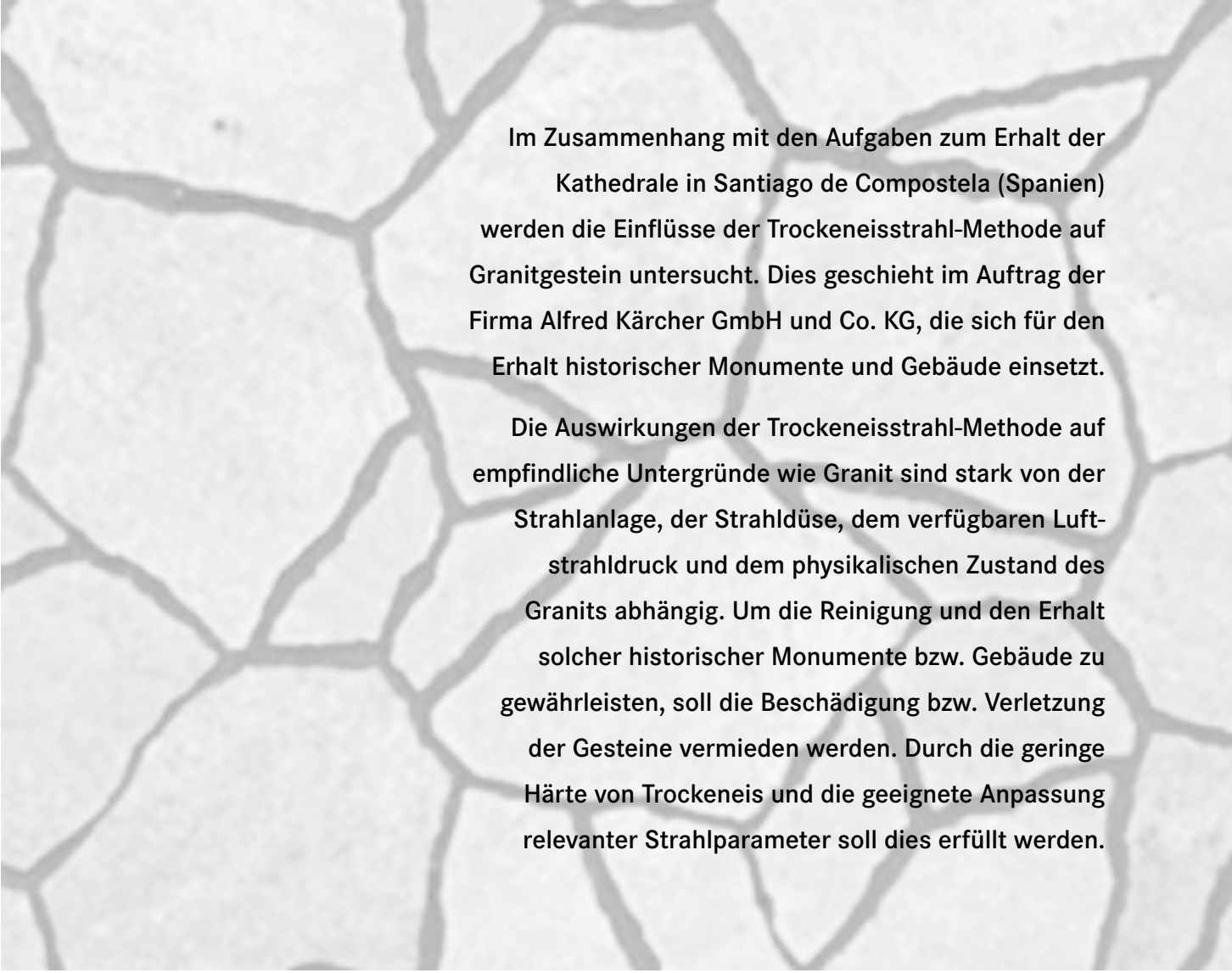
Bilder 1, 6, 7, 8: Fa. Itta

Bild 2: Wikimedia

Bilder 3, 4, 5: AeDis AG

Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung von Trockeneisstrahlen in der Fassadenreinigung auf empfindliche Untergründe

von Felipe Valderrama



Im Zusammenhang mit den Aufgaben zum Erhalt der Kathedrale in Santiago de Compostela (Spanien) werden die Einflüsse der Trockeneisstrahl-Methode auf Granitgestein untersucht. Dies geschieht im Auftrag der Firma Alfred Kärcher GmbH und Co. KG, die sich für den Erhalt historischer Monumente und Gebäude einsetzt.

Die Auswirkungen der Trockeneisstrahl-Methode auf empfindliche Untergründe wie Granit sind stark von der Strahlanlage, der Strahldüse, dem verfügbaren Luftstrahl Druck und dem physikalischen Zustand des Granits abhängig. Um die Reinigung und den Erhalt solcher historischer Monumente bzw. Gebäude zu gewährleisten, soll die Beschädigung bzw. Verletzung der Gesteine vermieden werden. Durch die geringe Härte von Trockeneis und die geeignete Anpassung relevanter Strahlparameter soll dies erfüllt werden.

Die Verwendung von Kohlenstoffdioxid bzw. Kohlendioxid (CO_2) als Strahlmittel stellt eine besondere Art des Strahlverfahrens dar. Die Besonderheit besteht darin, dass Kohlendioxid bei Umgebungsdruck und -temperatur entweder fest- oder gasförmig auftreten kann. Für die Temperatur des Kohlendioxids im festen Zustand von -78°C und den atmosphärischen bzw. Normaldruck (1,013 bar) findet Sublimation statt. CO_2 im festen Zustand geht also in die Gasphase über, ohne dabei flüssig zu werden. Daher wird das festförmige CO_2 auch Trockeneis genannt. Alle charakteristischen Größen sind in [8] zu finden.

Die Sublimation, zusammen mit der niedrigen Temperatur, ist eine der wichtigsten Vorteile der Anwendung von Trockeneis als Strahlmittel und wird daher vielfach in verschiedenartigen Bereichen wie Reinigung, Wartung und Instandhaltung zum Einsatz gebracht. Im Gegensatz zu anderen Strahlmitteln ermöglicht das Trockeneis die Reinigung von Oberflächen, ohne dass Strahlmittelreste hinterlassen werden. Es muss nach dem Strahlen lediglich der entfernte Schmutz entsorgt werden. Durch die niedrige Härte von Trockeneis lassen sich außerdem mittels dieser Strahlmethode empfindliche Oberflächen bzw. Untergründe schadungsarm behandeln.

Für die Reinigung von Oberflächen mittels Trockeneisstrahlen sind drei Auswirkungen bekannt: die mechanische, die thermische und die sublimatorische Auswirkung. In früheren Forschungsarbeiten wurden diese experimentell untersucht und deren abtragende Wirkung bestimmt. Die Ergebnisse von Krieg im Jahr 2008 [8] und Redeker im Jahr 2003 [10] kommen zu dem Schluss, dass lediglich die mechanische und die thermische Auswirkung zum Abtrag von Verunreinigungen beitragen. Die mechanische Auswirkung ist durch die vorhandene Strahlanlage gegeben; das Strahlmittel (Trockeneis) wird mit Hilfe von Druckluft rasch gegen die Oberfläche bzw. Verunreinigungen beschleunigt. Die thermische Auswirkung beruht auf der niedrigen Temperatur von -78°C . Sie ermöglicht, dass die

auf den gestrahlten Oberflächen haftenden Verunreinigungen schnell abkühlen und verspröden, so dass sie an Haftfähigkeit verlieren.

In der Reinigung von Steinoberflächen ist das Trockeneisstrahlen noch nicht experimentell untersucht. Daher sind dessen mechanischen und thermischen Auswirkungen auf solche empfindliche Untergründe bislang nicht bekannt. Aus diesem Grund werden im Zusammenhang mit den Erhaltungsaufgaben der Kathedrale in Santiago de Compostela (Spanien) die Auswirkungen der Trockeneisstrahl-Methode auf das dort verwendete Granitgestein untersucht. Die beiden Auswirkungen – mechanisch und thermisch – werden experimentell anhand von allgemeingültigen Versuchs- und Messmethoden separat voneinander und ebenso gekoppelt betrachtet.

Mittels hochauflösender Messtechnik wird der Reinigungsmechanismus der auf den Granitoberflächen haftenden Flechten (und weitere Verunreinigungen) durch das Trockeneisstrahlen erfasst sowie die Schädigung der empfindlichen Granite bestimmt. Mit Hilfe von Lichtmikroskopie, Elektronenmikroskopie und Streifenprojektion wird die Auswertung der Experimente realisiert. Die Quantifizierung der Gesteinsschädigung erfolgt auf Makro- und Mesoskala mittels Rauigkeits- und Rissanalysen. Mittels der Anwendung von Hochgeschwindigkeitsvideographie werden die Reinigungsprozesse beschrieben.

Untersuchungen vor Ort in Santiago de Compostela im Jahr 2014 haben gezeigt, dass sich durch die Partikelstrahlreinigung mit Trockeneis die fest verwurzelten Flechten auf den Granitoberflächen am besten abtragen lassen und die Steinstrukturen am besten erhalten werden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sollen eine Erweiterung des Verständnisses der Auswirkungen auf solche empfindliche Untergründe des in der Denkmalpflege nicht allgemein bekannten Trockeneisstrahlens ermöglichen. Zusätzlich ist die Vorgehensweise auf andere Materialien übertragbar.

1 Das Trockeneisstrahlen

1.1 Strahlverfahren

Partikel bzw. Strahlmittel in Strahlsystemen zu beschleunigen und sie zur Kollision mit einer zu bearbeitenden Oberfläche (Werkstück) zu bringen ist ein Strahl-Fertigungsverfahren, welches in [2] definiert und ausführlich behandelt wird. Je nach Anwendung oder Strahlziel werden unterschiedliche Strahlsysteme und -mittel zum Einsatz gebracht.

Fertigungstechnisch werden in [12] 4 relevante Anwendungen klassifiziert:

- Entfernung von Fremdmaterial
- Abtragung von Werkstoffmaterial
- Veränderung der Oberflächenstruktur
- Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften

Entscheidend für jedes Strahlverfahren ist das Strahlmittel, welches das eigentliche Werkzeug dieser Technik darstellt. Das Strahlmittel wird von der Strahlanlage pneumatisch (mit Druckluft), hydraulisch (mit Wasser oder Öl) oder mechanisch (mit Schleuderrad) auf die gewünschte Geschwindigkeit beschleunigt [4].

Zahlreiche verschiedene Strahlmittelsorten finden heutzutage in der Industrie Anwendung und werden meist nach Einsatz (Einweg- oder Umlaufstrahlmittel), Form (fest, flüssig, gasförmig), Zusammensetzung (metallisch, mineralisch, organisch, andere) und Körnung (Kornform, Korngröße) unterschieden. Genauere Einteilungen der Strahlmittel sind in der Norm DIN8200 [2] und in Krieg [8] zu finden.

Es werden beispielsweise das Luftdruckstrahlen mit festem Strahlmittel wie Zinkdrahtkorn, Maiskorngrenulat, Natriumcarbonat-Pulver, Sand, Nusschalengrenulat, Duroplastgranulat, Trockeneis pellets etc. und das Hochdruckwasserstrahlen für die Behandlung von Oberflächen verwendet. Die festen Partikel oder die Flüssigkeit werden dann durch den Druck beim Durchströmen einer Düse beschleunigt und in Richtung Werkstück gerichtet, um verschiedenartige Industriearbeiten wie Entlackieren, Verzinken, Reinigen, Schneiden etc. zu erfüllen.

1.2 Kohlendioxid

Kohlendioxid mit der stöchiometrischen Formel CO_2 ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Sauerstoff, die in vier Aggregatzuständen vorkommen kann. Ein aus [9] entnommenes Diagramm stellt diese Zustände dar (Bild 1).

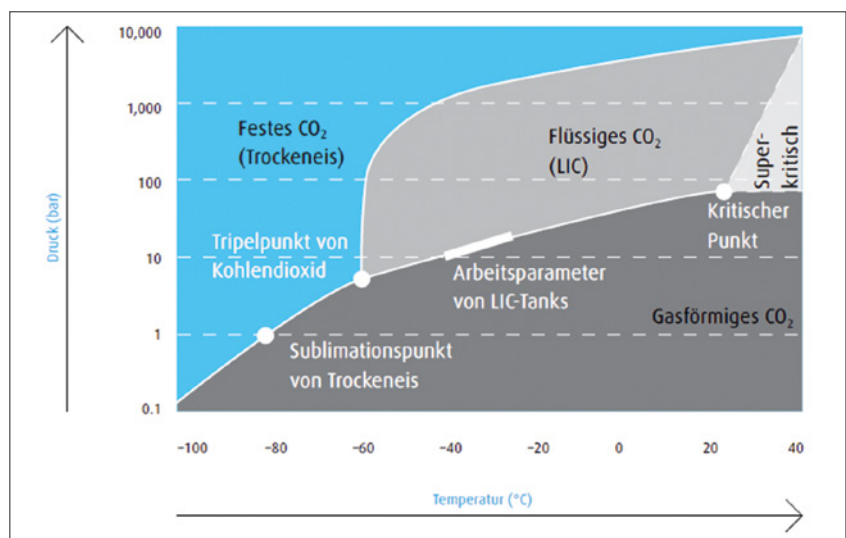
Im gasförmigen Zustand ist Kohlendioxid sauer, unbrennbar, farb-, geruch- und geschmacklos und in Wasser hoch löslich [8]. Es kann hierbei über einen breiten Temperaturbereich vorkommen und ist auf einen Druck von ca. 73,83 bar limitiert.

Flüssiges CO_2 kann erst oberhalb einer bestimmten Temperatur und bei einem bestimmten Druck auftreten, dem Tripelpunkt.

Oberhalb des kritischen Punktes bei 73,83 bar und 31°C liegt das Kohlendioxid im überkritischen Aggregatzustand vor, das bedeutet, dass die physikalischen Eigenschaften von CO_2 ständig Veränderungen erfahren und sich der gasförmige vom flüssigen Zustand nicht mehr unterscheiden lässt [8].

Je nach Temperatur und Druck wird CO_2 unterhalb des Tripelpunktes entweder fest- oder gasförmig auftreten. Für eine Temperatur von -78°C und atmosphärischen bzw. Normaldruck (1,013 bar) findet Sublimation statt, also CO_2 im festen Zustand geht in die Gasphase über, ohne dabei flüssig zu werden. Diese Sublimationserscheinung, zusam-

Bild 1
Aggregatzustände von Kohlendioxid (entnommen aus [9])



men mit der niedrigen Temperatur, ist eine der wichtigsten Vorteile der Anwendung von Trockeneis als Strahlmittel.

Kohlenstoffdioxid wird industriell aufgrund seiner Mehrphasenvielfältigkeit oftmals verwendet. So wird CO_2 gasförmig in der Lebensmittelindustrie für die Herstellung von Getränken, Hefeteig, Backpulver und für die Lagerung und Reifung von Obst und Gemüse angewendet.

Ebenso überkritisches CO_2 findet Anwendung z. B. für die Herstellung von Aromastoffen und als Lösungsmittel zum Reinigen und Entfetten.

In der technischen Industrie wird CO_2 in flüssiger Form in Druckglasflaschen gehandelt. In fester Form wird es insbesondere für die Bestrahlung von Oberflächen eingesetzt.

1.3 Strahlmittel Kohlendioxid

Beim Strahlen mit Kohlendioxid lassen sich zwei Arten von Strahlmethoden unterscheiden; die flüssige und die feste. Die erste Art wird Kohlendioxid-Schneestrahlen und die zweite Trockeneisstrahlen genannt.

Das Kohlendioxid-Schneestrahlen verwendet unter Druck stehendes flüssiges CO_2 als Ausgangsprodukt, welches bis zur Düse hin im flüssigen Zustand befördert wird. Erst dann entsteht durch Entspannung des Strahlmediums ein Gemisch aus CO_2 -Schnee und -Gas, das einem Druckluftstrahl zugeführt wird [3]. Vorteile dieser Strahlmethode sind [8]:

- Einfache Lagerung des flüssigen CO_2
- Kontinuierliche Strahlmittelversorgung (hohe Automatisierbarkeit)
- Keine sich bewegenden Anlagenteile werden benötigt (hohe Verfügbarkeit)

Das Trockeneisstrahlen verwendet als Strahlmittel millimetergroße, aus festem CO_2 hergestellte Partikel. Diese können aus zerkleinerten Trockeneisblöcken bzw. -platten oder durch sogenannte Pelletizer als extrudierte Pellets gewonnen werden.

Trockeneis lässt sich nach Redeker [10] und Uhlmann [11] grob folgendermaßen produzieren: Das flüssige Kohlendioxid wird durch eine isenthalpe

Druckverringerung (Drosselung) auf niedrigere Temperaturen gebracht (Joule-Thomson-Effekt), so dass CO_2 -Schnee und -Gas entsteht. Der CO_2 -Schnee-Anteil kann dann durch Pressen verdichtet und in Form von Blöcken, Platten oder Pellets zur Verfügung gestellt werden.

In Deutschland dominiert die Herstellung und die Anwendung von Trockeneispellets, welche üblicherweise mit einem Durchmesser von 3 mm und einer variablen Länge zwischen 3 und 10 mm zu finden sind.

Nachdem eine Trockeneismenge hergestellt wurde, findet unter atmosphärischen Bedingungen ständig Sublimation statt, das bedeutet, dass das zur Verfügung stehende Trockeneis mit der Zeit abnimmt. Diese Abnahme wird nach Krieg [8] bis ca. 10 % je 24 Stunden abgeschätzt. Außerdem wird durch den Kontakt mit der umgebenden Luft das Trockeneis kontaminiert (Wasser friert aus und lagert sich zwischen die Pellets) und somit dessen Qualität gesenkt [10]. Es wird infolgedessen möglichst zeitnah nach der Herstellung die Anwendung der Partikel empfohlen.

Die Größe der Trockeneispartikel, welche beim Strahlen die zu bearbeitende Oberfläche treffen, ist von der vorherigen Sublimation und von der spezifischen Strahlanlage abhängig. Je nach Strahlschlauch und -düse ist die Partikelgröße variabel und daher beim Auftreffen unbekannt. Bei einer flachen und schmalen Düsenöffnung werden z. B. die Pellets im Vergleich zu einer runden, breiteren Düsenöffnung stärker verkleinert. Krieg [8] erwähnt in seiner Literaturuntersuchung, dass durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen Partikelgrößenverteilungen im Bereich von 0,1 bis 0,3 mm vor dem Zusammenstoßen mit dem Werkstück beobachtet worden sind.

Dahingehend, dass die Härte des Strahlmittels ein bedeutender Einflussfaktor auf den Abtrag – Reinigung, Entschichtung, Schädigung des Werkstücks – beim Trockeneisstrahlen ist, stimmen Krieg [8] und Redeker [10] überein. Im Falle von Trockeneis kann kein Wert in einer absoluten Härte – wie z. B. Härteprüfung nach Vickers – gefunden werden. In der von Mohs aufgestellten Härteskala, welche eine relative Skala darstellt, werden dennoch Werte dafür angegeben; diese betragen zwischen 1,5 und

3 Mohs und können mit Halit und Gips (2 Mohs) oder Calcit (3 Mohs) verglichen werden [8].

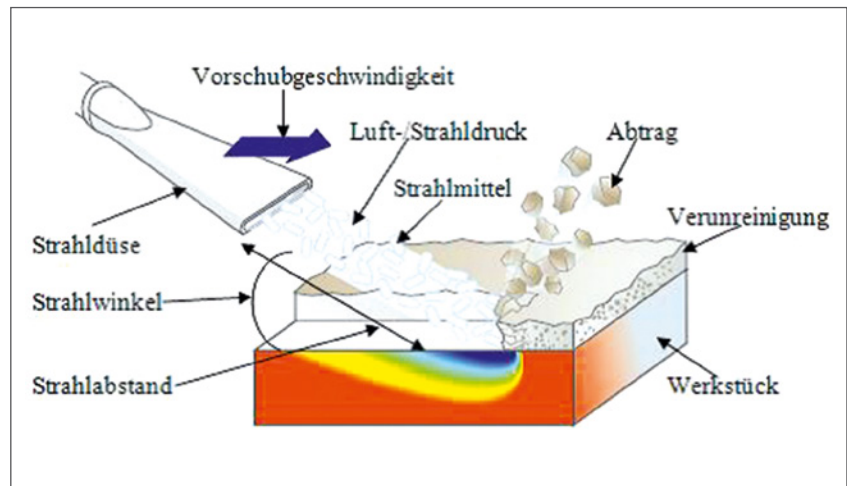
1.4 Vorgang und Parameter des Trockeneisstrahlens

Der Ablauf während ein Werkstück mit Trockeneis gestrahlt wird ist in Bild 2 dargestellt.

Die erzielten Ergebnisse des Strahlens wie Abtragleistung, Partikelgeschwindigkeit, Strahlstoßkraft, Werkstücktemperatur und Strahlbilddurchmesser werden von den Eigenschaften des Strahlsystems, des Strahlmittels und von den eingestellten Parametern direkt beeinflusst.

Diese Eigenschaften und Parameter werden aufgelistet und kurz beschrieben:

- Trockeneismassenstrom: stellt den Strahlmitteldurchsatz per Zeiteinheit dar und beeinflusst die Anzahl der Trockeneispartikel, welche auf die Oberfläche des Werkstücks treffen. Redeker [10] ermittelt einen hohen Einfluss des Trockeneismassenstroms auf die Senkung der Werkstücktemperatur beim Strahlen.
- Luftvolumenstrom und Luftstrahl Druck: sind beide von der Anlage und vom Strahlziel abhängig. Eine Zunahme des Strahldruckes bewirkt eine unmittelbare Erhöhung der Partikelgeschwindigkeit und der Strahlstoßkraft [5, 10]. Haberland [5] beobachtet bei steigendem Druck eine Abnahme der Werkstücktemperatur.
- Strahlabstand: kann je nach Anwendung vom Bediener der Trockeneisstrahlanlage beliebig variiert werden. Abhängig von der Strahldüsengeometrie (Düsendurchmesser und -divergenz) wird für jeden unterschiedlichen Strahlabstand eine anderer Strahlbilddurchmesser auf dem Werkstück erzielt. Je größer der Abstand, desto größer der Strahlbilddurchmesser.
- Strahlwinkel, Strahldauer und Strahl-Vorschubgeschwindigkeit: alle drei können vom Bediener der Trockeneisstrahlanlage beliebig variiert und durch einen angepassten Versuchsaufbau konstant gehalten werden. In der Literaturuntersuchung von Krieg [8] wird bei einem



Strahlwinkel von 90° bezüglich der Flächennormalen die höchste Abtragleistung erreicht. Die Strahldauer und die Vorschubgeschwindigkeit sind umgekehrt proportional zueinander; je größer die Geschwindigkeit, desto niedriger ist die Strahldauer. Für eine hohe Strahldauer (niedrige Vorschubgeschwindigkeit) werden große Abtragleistungen und Werkstück-Temperaturabsenkungen erwartet.

- Partikelhärte und -durchmesser: sind von der Trockeneisstrahlanlage abhängig und werden von der Strahldüse stark beeinflusst.

Die verwendeten Parameter sind der vollständigen Masterarbeit (s. Valderrama [13]) zu entnehmen.

Bild 2
Ablauf beim Trockeneisstrahlen
(entnommen aus [7])

1.5 Auswirkungen des Trockeneisstrahlens

Verschiedene Autoren wie Haberland [5], Krieg [8] und Redeker [10], Trockeneisstrahlanlagen-Hersteller wie Alfred Kärcher GmbH und Co. KG [7] und Cryonomic dry ice cleaning solutions [9] sowie die Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. mit ihrem Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) [4] sind sich einig, dass die Abtragleistung des Trockeneisstrahlens auf drei wichtigen Auswirkungen beruht: der mechanischen, der thermischen und der Sublimationsauswirkung. Krieg [8], Lindegas [9] und Redeker [10] erwähnen zusätzlich, dass die Sublimationsauswirkung eher eine sekundäre Rolle spielt.

1.5.1 Mechanische Auswirkung

Der beschleunigte Freistrahstrom (kinetische Energie) – bestehend aus Trockeneispartikel und Druckluft [8] – trifft die Werkstückoberfläche und überträgt auf sie einen Impuls, der als ein Maß für die mechanische Auswirkung angegeben wird [4]. Diese Energieumwandlung wirkt abschleifend, da die Trockeneispartikel in die Verunreinigungen eindringen (abrasiver Verhalten).

In Abhängigkeit des behandelten Werkstoffes und durch die Einstellung der Strahlparameter können die zu bearbeitenden Oberflächen beim Trockeneisstrahlen diverse mechanische Veränderungen erfahren.

1.5.2 Thermische Auswirkung

Die unter irdischen Druckverhältnissen minimale Trockeneistemperatur von $-78,5\text{ °C}$ (s. Sublimationspunkt in Bild 1) ist für diese Auswirkung ausschlaggebend. Sie ermöglicht, dass beim Strahlen die Werkstücktemperatur eine rasche Absenkung erfährt.

Ein inhomogenes Temperaturfeld auf der Werkstückoberfläche bildet sich infolge dieses Wärmeaustausches aus und beeinflusst das Ausdehnverhalten des gestrahlten Werkstoffs durch die Entstehung von Normal- und Schubspannungen [8, 10]. Diese Spannungen bewirken besonders bei beschichteten Oberflächen und ebenso in Oberflächen mit stark geklebten Verunreinigungen eine Rissbildung der äußeren Schichten bzw. Materialien, d.h. sie verhärten und verspröden, was eine Verminderung deren Elastizität und Haftfähigkeit mit sich bringt [9].

1.5.3 Sublimationsauswirkung

Die Temperaturerhöhung der Trockeneispartikel beim Ausstoßen aus der Strahldüse durch die wärmere Umgebung und die hohe Aufprallenergie beim Treffen der Oberfläche bewirken, dass das feste Kohlendioxid nahezu plötzlich sublimiert. Dieser Phasenübergang ermöglicht eine Dichteabnahme und somit auch eine ca. 550-fache Volumenvergrößerung des CO_2 [8, 9]. Diese Mikroexplosion der Sublimation erzeugt einen Druckstoß, der eine mechanische Belastung auf die Oberflächenverunreinigungen ausübt.

1.6 Geschichte des Einsatzes des Trockeneisstrahlens

Der industrielle Einsatz der Trockeneisstrahlmethode begann Anfang der 70er Jahren in den USA mit der Erteilung verschiedener Patente. Seitdem beschäftigen sich zahlreiche Unternehmen mit der Weiterentwicklung dieser Technologie z.B. in der Herstellung von Trockeneis-Vorrichtungen, -Düsen, -Pellets und -Anlagen [8].

Etwa 20 Jahre später, in den 90er Jahren, erreichte diese Strahlmethode Europa und wurde prinzipiell in der Fertigung und in der Instandhaltung von Maschinen eingesetzt. Seither hat sie in der industriellen Anwendung eine bedeutende Relevanz gewonnen [8, 10].

In Deutschland wird das Trockeneisstrahlen in verschiedenen Gebieten angewendet, vor allem in der Reinigung verschiedenartiger Anlagen der Metall-, Stahl-, Maschinenbau-, Elektro-, Holz- und Automobilindustrie und in Druckereien und Gießereien [7]. Eine komplette Tabelle mit spezifischen Anwendungen des Trockeneisstrahlens ist in [10] zu finden.

Dank seiner Vielfalt an Vorteilen ersetzt das Trockeneisstrahlen mittlerweile andere Reinigungs- und Abtragstrahlmethoden. Die relevantesten Vorteile werden aufgelistet und kurz erläutert:

- Trockeneis-Sublimation: ermöglicht im Gegensatz zu anderen Strahlmitteln das Reinigen von Oberflächen, ohne dass Trockeneisreste hinterlassen werden. Es muss nach dem Strahlen lediglich die entfernte Verunreinigung entsorgt werden.
- Geringe Partikelhärte: Die mit Gips vergleichbare Mohs-Härte (ca. 2 Mohs) der Trockeneispartikel ermöglicht die Anwendung der Strahlmethode auf empfindlicher Oberfläche wie Kunststoff und Holz, ohne diese zu beschädigen.
- Variabler Abtrag: Je nach individueller Anforderung der Reinigungsaufgaben lässt sich anhand der Einstellung des Strahldruckes die Aggressivität des Strahlverfahrens anpassen [1].
- Keine Anlagen-Demontierung notwendig: Im Fall mancher Strahlmittel ist für die Reinigungsarbeit die Demontage der Maschinen notwendig. Demgegenüber steht das Trocken-

eisstrahlen, welches durch die Sublimation keine Demontierung benötigt und an heißen Maschinen bzw. Formen durchgeführt werden kann. Somit lassen sich die Stillstandzeiten des Betriebs auf ein Minimum reduzieren und dadurch Kosten sparen [23].

- Geringe elektrische Leitfähigkeit von Trockeneis: ermöglicht z. B. Spezialanwendungen wie die Reinigung von elektrischen bzw. spannungsführender Anlagen [8].
- Umweltfreundlichkeit: In der Industrie stammt Kohlendioxid aus Abfall- und Nebenprodukten von Verbrennungs- und chemischen Prozessen wie z. B. bei der Herstellung von Ammoniak, Alkoholen und Düngemitteln [9] und nicht aus fossilen Brennstoffen. Es ist ein gereinigtes Produkt aus chemischen Reaktionen und hat keinen Einfluss auf die CO₂-Bilanz [4].

Die durch die Partikelhärte bedingt niedrige Abrasivität des Trockeneisstrahlens kann allerdings auch als Begrenzung des Verfahrens angesehen werden. Manche besonders widerstandsfähige Verunreinigungen bzw. Schichten lassen sich daher nur schlecht oder gar nicht abtragen. In solchen Fällen müssen andere Strahlmethoden eingesetzt werden.

Die im Gegensatz zum CO₂-Schneestrahlen nicht kontinuierliche Strahlmittelversorgung kann ebenfalls als Nachteil der Methode betrachtet werden.

Die Anwendung des Trockeneisstrahlens erfordert aufgrund der physiologischen Auswirkungen und Gefahren umfangreiche Schutzmaßnahmen. Eine hohe CO₂-Konzentration in der Luft führt zu einer Verminderung oder sogar Aufhebung des reflektischen Atemreizes [8]; Atemschutz ist daher von Notwendigkeit. Durch die niedrige Temperatur von Trockeneis im festen Zustand können auf der Haut Kaltverbrennungen verursacht werden. Es sind deswegen Schutzbrille, Handschuhe und geschlossene Kleidung zu tragen. Gehörschutz ist in allen Fällen aufgrund der durch den hohen Strahlendruck verursachten Lärmbelastung zwingend.

2 Untersuchung zur Wirkung des Trockeneisstrahlens

Zwei von den beschriebenen Auswirkungen des Trockeneisstrahlens – mechanisch und thermisch – werden hierbei anhand verschiedener Experimente zum einen soweit möglich separat und unabhängig voneinander und zum anderen gekoppelt untersucht. Alle drei daraus resultierenden Szenarien sollen folgende zwei Hauptziele verfolgen:

A: Bestimmung des Beitrags zur Schädigung des Trockeneisstrahlens auf empfindliche Untergründe

B: Beschreibung des Beitrags zur Reinigung des Trockeneisstrahlens auf empfindliche Untergründe

Die Durchführung aller Versuche wurde spezifisch und exklusiv für ausgewählte Strahlgeräte der Firma *Alfred Kärcher GmbH und Co. KG* realisiert. Die Darstellung und die detaillierte Beschreibung der angewendeten Versuchs- und Messmethoden (inklusive Strahlgeräte, Versuchsvorrichtungen Parametereinstellungen, etc.), für alle elf im Folgenden kurz beschriebenen Teilziele sowie alle Ergebnisse sind der vollständigen Masterarbeit zu entnehmen (s. Valderrama [13]).

2.1 Untersuchung der mechanischen Auswirkung

Um die mechanische Auswirkung des Trockeneisstrahlens getrennt von der thermischen Auswirkung auszuwerten, werden unterschiedliche Versuche ausgeführt, die diese unabhängige Betrachtung ermöglichen.

I. Untersuchungen der Strahlstoßkraft (F_s , N) beim Trockeneisstrahlen: Dieses Teilziel wird als Grundlage für alle anderen Teilziele der mechanischen Auswirkung dienen. Die Strahlstoßkraft F_s wird dabei für verschiedene vorhandene Strahldüsen experimentell bestimmt. Parallel wird die Strahlstoßkraft-Abhängigkeit von den Parametern Luftstrahlendruck, Strahlabstand und Trockeneismassenstrom analysiert.

II. Untersuchungen von Walnussschalengranulat: Dieses Granulat wird in den Forschungen von Krieg [20] als ein für das Trockeneis alternatives Strahlmittel zur unabhängigen Untersuchung der mechanischen Auswirkung angegeben. Dessen Validierung wird mittels den folgenden zwei verschiedenen Versuchen durchgeführt:

- **Messung der Strahlstoßkraft:** Für verschiedene Strahlparameter wird die Strahlstoßkraft beim Strahlen mit Walnussschalengranulat bestimmt. Durch den Vergleich mit den gemessenen Kräften beim Trockeneisstrahlen wird überprüft, ob Walnussschalen als Alternative geeignet sind.
- **Messung der Strahlintensität:** Zur Bestätigung der Strahlstoßkraft werden hier Almen-tests (Messungen der Strahlintensität nach J. O. Almen) realisiert. Almenplättchen werden sowohl mit Trockeneis als auch mit Walnussschalengranulat gestrahlt. Die daraus resultierende Krümmung der Plättchen, die generell Intensität genannt wird, kann für beide Strahlmittel verglichen werden.

III. Mechanische Untersuchungen des Padang-Yellow-Granits: Nachdem das Walnussschalengranulat als ein alternatives Strahlmittel zum Trockeneis überprüft wird, werden mehrere neue, frisch gesägte und polierte Proben des oft verwendeten und einfach auf dem Markt erhältlichen Padang-Yellow-Granits, der in seiner Zusammensetzung und Struktur dem in der Kathedrale von Santiago de Compostela ähnlich ist, für verschiedene Strahlparameter mit Walnussschalen gestrahlt. Diese gestrahlten Proben werden anschließend auf Risse und Aufrauung untersucht [13]. Mit den quantitativen Rissdichten-, Risstiefen- und Oberflächenaufrauungs-Analysen wird zum Schluss für den Fall der mechanischen Auswirkung der Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens bestimmt (Tabelle 1).

IV. Mechanische Untersuchungen des spanischen Originalgranits: Auch hier werden mehrere originale Steinproben der Kathedrale von Santiago de Compostela mit Walnussschalengranulat gestrahlt und für die Ergebnisse eine Riss- (Rissdichte und Risstiefe) und eine Abtragsanalyse mit anschließender Bestimmung des Beitrags zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für den Fall

der mechanischen Auswirkung durchgeführt (Tab. 2). Die Steinproben stellen zwei im Vorzustand verwitterte Granitsorten A und B dar. Die Sorte A ist ein Abbruch der Terrasse des Nordturmes (51 m hoch) und die Sorte B ein degradiertes Steinteil der höchsten Balustrade des Nordturmes (60 m hoch). Alle weiteren Details sind aus [13] zu entnehmen.

V. Mechanische Untersuchungen von Gesteinen mit Flechten auf der Oberfläche: Diese Gesteine werden ebenso mit Walnussschalengranulat gestrahlt. Der Abtrag der auf der Steinoberfläche gewachsenen Flechten wird anhand von Hochgeschwindigkeitsvideographie beobachtet und beschrieben.

2.2 Untersuchung der thermischen Auswirkung

Für die thermische Untersuchung des Trockeneisstrahlens werden ebenfalls die benutzten Gesteinstypen verwendet. Anders als bei der mechanischen Untersuchung wird hierbei Trockeneis angewendet [13].

VI. Thermische Untersuchungen des Padang-Yellow-Granits: Trockeneispartikel werden auf mehrere neue, frisch gesägte und polierte Proben dieser Steinsorte nicht gestrahlt sondern gelegt, um den beschleunigten Freistrahstrom – also die mechanische Auswirkung – auszuklammern. Dünnschliffe dieser Proben werden anschließend unter dem Mikroskop auf mögliche Risse aufgrund der Temperaturabsenkung untersucht. Mit den quantitativen Rissdichten und Risstiefen-Analysen wird dann für den Fall der thermischen Auswirkung der Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens bestimmt.

VII. Thermische Untersuchungen des originalen spanischen Granits: Dieselben Untersuchungen werden für die spanischen Granitproben der Sorten A und B (s. o.) durchgeführt.

VIII. Thermische Untersuchungen von Gesteinen mit Flechten auf der Oberfläche: Zweck hierbei ist es, das Verhalten der vorhandenen Verunreinigungen bzw. Flechten unter dem Einfluss der niedrigen Temperaturen von Trockeneis zu untersuchen. Dies wird mithilfe von Hochgeschwin-

digkeitsaufnahmen beobachtet und anschließend beschrieben. Ebenso wie bei VI und VII werden in diesem Fall die Trockeneispartikel auf die Oberfläche der Steinproben nicht gestrahlt sondern fallengelassen [13].

2.3 Ziele zur Untersuchung der thermomechanischen Auswirkung

Die Kopplung der mechanischen und der thermischen Auswirkung erfolgt logischerweise durch Anwendung der Trockeneisstrahlmethode. Folgende drei Ziele werden ähnlich wie bei III bis VIII angestrebt.

IX. Thermomechanische Untersuchungen des Padang-Yellow-Granits: Mehrere neue, frisch gesägte und polierte Proben des Padang-Yellow-Granits werden hier für verschiedene Strahlparameter gestrahlt. Diese Proben werden anschließend auf Risse und Aufrauung untersucht. Mit den quantitativen Rissdichten-, Risstiefen- und Oberflächenaufrauung-Analysen wird dann für den Fall der thermomechanischen Auswirkung der *gesamte* Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens bestimmt (Tabelle 3). Parallel wird mithilfe von Thermoelementen, welche auf der Rückseite von zwei Steinproben befestigt werden, die Temperaturentwicklung dieser Proben während des Strahlvorgangs analysiert [13].

X. Thermomechanische Untersuchungen des originalen spanischen Granits: Auch hier werden originale Steinproben der Sorten A und B (s. o.) der Kathedrale von Santiago de Compostela mit Trockeneis gestrahlt und für die Ergebnisse eine Riss- (Rissdichte und Risstiefe) und eine Abtragsanalyse mit anschließender Bestimmung des Beitrags zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für den Fall der thermomechanischen Auswirkung durchgeführt (Tabelle 4). Parallel wird mithilfe von Thermoelementen, welche auf der Rückseite von zwei Steinproben befestigt werden, die Temperaturentwicklung dieser Proben während des Strahlvorgangs analysiert.

XI. Thermomechanische Untersuchungen von Gesteinen mit Flechten auf der Oberfläche: Proben dieser Gesteine werden genauso mit Trocken-

eis gestrahlt. Mithilfe von Hochgeschwindigkeitsvideographie wird dann der Abtrag der auf der Steinoberfläche gewachsenen Flechten beobachtet und analysiert.

3 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

3.1 Zusammenfassung der Untersuchungen zur mechanischen Auswirkung

Die separate Untersuchung der mechanischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens (ohne thermische Auswirkung) wurde mittels der Anwendung von Walnussschalengranulat als Vergleichsstrahlmittel durchgeführt. Die beiden Voruntersuchungen ergaben, dass Trockeneis und Walnussschalengranulat für spezifische Einstellungen vergleichbare Strahlstoßkräfte und Strahlintensitäten liefern. Dies bestätigte die Benutzung des Granulats für die weiteren mechanischen Untersuchungen.

Die Untersuchungen der Padang-Yellow- und spanischen Granite hatten als Zweck die quantitative Bestimmung des Beitrags zur Schädigung der mechanischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf solche empfindliche Untergründe mittels Riss- (für beide Granite), Aufrauungs- (für den Padang-Yellow-Granit) und Abtrags-Analysen (für die spanischen Granite).

Zusammengefasste Ergebnisse [13]: Der Granit Padang-Yellow erfährt durch das Strahlen mit Walnussschalengranulat (Luftstrahl Druck pLS = 12 bar) eine Veränderung von dessen im nicht gestrahlten Zustand vorhandener Risstiefe, da in Oberflächennähe neue, kurze Risse entstehen. Die mittlere Risstiefe, welche im nicht gestrahlten Zustand 9 mm beträgt, nimmt sukzessiv mit der Strahldauer ab und beträgt nach 120 s 6,5 mm (Verminderung um 28 %). Die maximale und die häufigste Risstiefe werden durch die Strahlvorgänge nach 120 s Strahldauer nicht beeinflusst.

Die Rissdichte bzw. die Menge an Rissen pro Linienschnittlänge der Padang-Yellow-Strahlproben in einer Tiefe von 0 bis 20 mm wird ebenso wie die mittlere Risstiefe verändert. Sie steigt nach 120 s Strahl-

dauer von 0,11 Risse/mm auf 0,21 Risse/mm und erfährt somit einen bedeutenden Anstieg von 90%.

Die polierten Padang-Yellow-Strahlproben werden durch das Strahlen mit Walnussschalengranulat aufgeraut. Der Mittelwert der maximalen Abtragstiefe für eine Strahldauer zwischen 7,5 s und 30 s beträgt ca. 1 mm. Für 30 s Strahldauer wird ein abgetragenes Granitvolumen von 10,5 mm³ gemessen.

Tabelle 1 fasst die Schädigung bzw. die Änderung der diskutierten Größen für den Granit Padang-Yellow zusammen.

Die beiden untersuchten spanischen Granitsorten A und B (s. o.) werden aufgrund der höheren Ver-

witterung der Sorte B durch das Strahlen mit Walnussschalengranulat unterschiedlich beeinflusst (Tabelle 2)

Der maximal gemessene Abtrag der Granitsorte A nach einer Strahldauer von 60 s beträgt 3,3 mm. Für die Granitsorte B übersteigt dieser Abtrag die Dicke der Strahlprobe und beträgt somit mindestens 20 mm.

Die maximale Risstiefe ist aufgrund der hohen Verwitterung beider Granite nicht bestimmbar, da sie die Dicke der Strahlproben (20 mm) übersteigt. Die mittleren und häufigsten Risstiefen dringen infolge des Abtrages für beide Granite tiefer in die Proben ein. Für den Granit A wächst nach einer Strahl-

Tabelle 1: Rein mechanischer Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für den bruchfrischen und polierten Granit Padang-Yellow

Neuer, frisch gesägter und polierter Padang-Yellow-Granit				
Größe (s. [13])	nicht gestrahlt	gestrahlt	Änderung	Strahldauer
Mittl. Risstiefe [mm]	9,5	6,5	-3,0	120 [s]
Max. Risstiefe [mm]	16,0	16,0	0	120 [s]
Häuf. Risstiefe [mm]	0,5	0,5	0	120 [s]
Rissdichte [Risse/mm]	0,11	0,21	+0,10	120 [s]
Max. Abtragstiefe [mm]	0	0,9	+0,9	30 [s]
Abtragsvolumen [mm ³]	0	10,5	+10,5	30 [s]

Tabelle 2: Rein mechanischer Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für die verwitterten Granitproben (A und B) der Kathedrale in Santiago de Compostela

Verwitterter spanischer Granit von der Kathedrale in Santiago de Compostela				
Größe [13]	nicht gestrahlt	gestrahlt	Änderung	Strahldauer
Mittl. Risstiefe (A) [mm]	10,5	13,5	+3,0	60 [s]
Mittl. Risstiefe (B) [mm]	10,0	14,0	+4,0	30 [s]
Max. Risstiefe (A) [mm]	-	-	-	60 [s]
Max. Risstiefe (B) [mm]	-	-	-	30 [s]
Häuf. Risstiefe (A) [mm]	0,5	4,0	+3,5	60 [s]
Häuf. Risstiefe (B) [mm]	0,5	9,0	+8,5	30 [s]
Rissdichte (A) [Risse/mm]	0,53	0,77	+0,24	60 [s]
Rissdichte (B) [Risse/mm]	0,69	1,22	+0,53	30 [s]
Max. Abtragstiefe (A) [mm]	0	3,3	+3,3	60 [s]
Max. Abtragstiefe (B) [mm]	0	20,0	+20,0	60 [s]

dauer von 60 s die mittlere Risstiefe von 10,5 mm auf 13,5 mm und die häufigste Risstiefe von 0,5 mm auf 4 mm. Für den Granit B wächst nach einer Strahldauer von lediglich 30 s die mittlere Risstiefe von 10 mm auf 14 mm und die häufigste Risstiefe von 0,5 mm auf 9 mm.

Die Rissdichte der Granitsorten A wächst von 0,53 Risse/mm auf 0,77 Risse/mm nach einer Strahldauer von 60 s und erfährt somit einen Anstieg von 53%. In der Hälfte der Zeit (Strahldauer von 30 s) wird die Rissdichte der Granitsorte B um 77% größer und wächst von 0,69 Risse/mm auf 1,22 Risse/mm.

Tabelle 2 fasst die Schädigung bzw. die Änderung der diskutierten Größen für die spanischen Granite zusammen.

Die Untersuchungen der Gesteine mit Flechten mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie hatten zum Zweck die qualitative Beschreibung des Beitrags der mechanischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens zur Reinigung solcher empfindlicher Untergründe.

Durch das Strahlen mit Walnussschalengranulat werden zwei Arten von Flechten (moosartig und fest verwurzelte) nicht vollständig abgetragen. Daher wird der mechanische Beitrag zur Reinigung des Trockeneisstrahlens als niedrig eingestuft.

Die separate Simulation der mechanischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf die spanischen Granitgesteine der Sorten A und B wurde von Huqi [6] durchgeführt. Nach Bestimmung der Materialparameter der beiden vorgeschädigten Granitsorten, simulierte Huqi [6] die Schädigung, die das Trockeneisstrahlen auf solche Granite verursacht. Drei zylindrische Trockeneispellets mit einer Länge und einem Durchmesser von 3 mm wurden von Huqi hintereinander mit einer Geschwindigkeit von 270 m/s auf die Granitoberfläche gestrahlt.

Diese Simulationen ergaben, dass die Abtragstiefe für die spanische Granitsorte A ca. 2 mm betrug, nachdem die drei Pellets die gleiche Stelle trafen. Für die Granitsorte B lag diese Abtragstiefe bei 3 mm.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen sind die simulativen Ergebnis-

se plausibel. Nach einer Strahldauer von 10 s wurden für die Granitsorten A und B Abtragstiefen von 1,7 mm bzw. 2,9 mm gemessen. Die verwendete Partikelgeschwindigkeit von 270 m/s ist nach Krieg [8] möglich. Die vollständigen Simulationsbeschreibungen und -Ergebnisse sind der Arbeit von Huqi [6] zu entnehmen.

3.2 Zusammenfassung der Untersuchungen zur thermischen Auswirkung

Die separate Untersuchung der thermischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens (ohne mechanische Auswirkung) wurde durch die Ausklammerung einer Strahlanlage durchgeführt. Anstatt Trockeneis gegen die Strahlproben zu strahlen, wurden Trockeneispellets auf diese Proben platziert oder fallengelassen [13].

Die Untersuchungen der neuen, frisch gesägten und polierten Padang-Yellow- und verwitterten spanischen Granite von der Kathedrale in Santiago de Compostela hatten zum Zweck die quantitative Bestimmung des Beitrags zur Schädigung der thermischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf solche empfindliche Untergründe mittels Rissanalysen.

Zusammengefasste Ergebnisse [13]: Nachdem Trockeneispellets auf die polierten Proben des Granits Padang-Yellow gelegt werden, wird bis zu einer Trockeneis-Verweilzeit von 120 s keine signifikante Variation der drei gemessenen Risstiefen (maximale, mittlere und häufigste Risstiefe) festgestellt.

Die Trockeneistemperatur von $-78,5^{\circ}\text{C}$ beeinflusst ebenso nicht die Rissdichte des Granits Padang-Yellow. Eine nahezu konstante Anzahl an Rissen pro Linienschnittlänge wird für Proben, auf welche keine Trockeneispellets gelegt werden, und für Proben die maximal 120 s thermisch belastet werden, festgestellt.

Die Risstiefe und Rissdichte der untersuchten spanischen Granitproben werden wie bei der anderen Granitsorte nicht von der thermischen Belastung von Trockeneis beeinflusst.

Einen Beitrag zur Schädigung der reinen Temperatur von Trockeneis auf die untersuchten Granite ist

mittels der durchgeführten Experimente nicht gemessen bzw. nicht festgestellt und somit als vernachlässigbar einzustufen.

Die Untersuchungen der Gesteine mit Flechten mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie hatten zum Zweck die qualitative Beschreibung des Beitrags zur Reinigung der thermischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf solchen empfindlichen Untergründen.

Das Fallenlassen von Trockeneispellets auf Oberflächen mit Flechten entfernt diese aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit nicht. Die stark niedrige Temperatur von Trockeneis kühlt jedoch die Flechten rasant ab, was deren Haftung lockert und deren Entfernung erleichtert.

Die separate Simulation der thermischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf die spanische Granitsorte B wurde ebenfalls von Huqi [6] durchgeführt. Mit den bekannten Materialparametern dieses vorgeschädigten Granits simulierte Huqi [6], ob die Trockeneistemperatur von $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ Schädigungen des empfindlichen Gesteins verursacht. Die thermische Belastung von drei Trockeneispellets die gleichzeitig die Granitoberfläche einschlagen, wurde dabei bis zu einer Strahldauer von 20 s simuliert.

Diese Simulation ergab, dass die aus der thermischen Belastung resultierenden Spannungen und Dehnungen gegenüber den kritischen Spannungen und Dehnungen klein waren. Aus diesem Grund waren sie nicht ausreichend, um Schädigungen auf den Granit zu verursachen.

Die Temperaturverteilung des Granits während des Thermoschocks wurde ebenso simuliert. Die Granitoberfläche erreichte dabei bereits nach wenigen Sekunden die Trockeneistemperatur. Bis zu einer Tiefe von 5 mm wurden nach einer Strahldauer von 20 s Temperaturen von ca. $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind ähnlich wie die Ergebnisse der Simulationen. In beiden Fällen ist der Beitrag zur Schädigung der thermischen Auswirkung des Trockeneisstrahlens auf den spanischen Granit vernachlässigbar und eine schnelle Abkühlung der Granitoberflächen ist feststellbar [6] und [13].

3.3 Zusammenfassung der Untersuchungen zur thermomechanischen Auswirkung

Die Untersuchung der Kopplung der thermischen und mechanischen Auswirkungen des Trockeneisstrahlens wurde mittels der Anwendung von Trockeneispellets als Strahlmittel durchgeführt. Anders als in den Untersuchungen zur mechanischen Auswirkung wurden hier die thermischen Eigenschaften von Trockeneis mit der von der Strahlanlage erzeugten kinetischen Energie [8] und [13] des Strahlmittels verknüpft.

Die Untersuchungen der neuen, frisch gesägten und polierten Padang-Yellow- und der verwitterten spanischen Granite von der Kathedrale in Santiago de Compostela (s. o.) hatten zum Zweck die quantitative Bestimmung des gesamten Beitrags zur Schädigung des Trockeneisstrahlens auf solche empfindliche Untergründe mittels Riss- (für beide Granite), Aufrauungs- (für den Padang-Yellow-Granit) und Abtragsanalysen (für die spanischen Granite). Außerdem wurden für beide Granitsorten mit Hilfe von Thermoelementen Temperaturmessungen durchgeführt, um die Temperaturentwicklung der Strahlproben während der Strahlvorgänge als Funktion der Strahldauer zu verfolgen [13].

Zusammengefasste Ergebnisse [13]: Der neue, frisch gesägte und polierte Granit Padang-Yellow erfährt durch das Trockeneisstrahlen sowie durch das Strahlen mit Walnusschalengranulat eine Veränderung von dessen im nicht gestrahlten Zustand vorhandenen Risstiefe, da in der Oberflächennähe neue kurze Risse entstehen. Für einen Luftstrahlendruck von $p_{\text{LS}} = 8\text{ bar}$ nimmt die mittlere Risstiefe, welche im nicht gestrahlten Zustand 8 mm beträgt, sukzessiv mit der Strahldauer ab und beträgt nach 120 s 6 mm (Verminderung um 25 %, da mehr Risse nahe an der Oberfläche). Für einen Luftstrahlendruck von $p_{\text{LS}} = 13\text{ bar}$ wird ebenfalls eine Abnahme der mittleren Risstiefe gemessen, welche sich nach gleicher Strahldauer um 39 % von 9 mm auf 5,5 mm vermindert. Die maximale und die häufigste Risstiefe werden für beide Strahldrücke nach 120 s Strahldauer nicht beeinflusst (Tabelle 3).

Die Rissdichte bzw. die Menge an Rissen pro Linienschnittlänge der Padang-Yellow-Strahlproben in einer Tiefe von 0 bis 20 mm wird ebenso wie die mittlere Risstiefe verändert. Für einen Luftstrahl- druck von $p_{LS} = 8$ bar steigt sie nach 120 s Strahl- dauer von 0,12 Risse/mm auf 0,19 Risse/mm und erfährt somit einen Anstieg von 58 %. Für einen Luftstrahl- druck von $p_{LS} = 13$ bar erfährt die Riss- dichte eine starke Steigerung von 0,13 Risse/mm auf 0,26 Risse/mm (Anstieg um 100 %).

Die neuen, frisch gesägten und polierten Padang- Yellow-Strahlproben werden durch das Trockeneis- strahlen mit Luftstrahl- drücken von ≥ 8 bar aufge- raut. Beim Strahlen mit einem Strahl- druck von $p_{LS} = 13$ bar betragen die maximale Abtragstiefe und das Abtragsvolumen nach einer Strahldauer von 30 s 2,2 mm bzw. 113,7 mm³. Mit einem Strahl- druck von $p_{LS} = 8$ bar werden diese Werte nach gleicher Strahldauer niedriger und betragen somit 1,3 mm bzw. 13,8 mm³. Für einen Strahl- druck von $p_{LS} = 6$ bar wird nach derselben Strahldauer durch visuelle Beobachtung keine Aufrauung der Strahl- proben festgestellt [13].

Tabelle 3 fasst die Schädigung bzw. die Änderung der diskutierten Größen für den Granit Padang- Yellow beim Trockeneisstrahlen mit einem Luft- strahl- druck von $p_{LS} = 8$ bar zusammen.

Die Temperaturmessungen der beiden untersuch- ten Padang-Yellow-Proben [13] zeigen, dass sich für die horizontale Positionierung der drei Thermo-

elemente im Abstand von 12 mm in einer Tiefe von 5 mm die Probe rasch und nahezu gleichmäßig ab- kühlt; innerhalb von 16 s erreichen zwei der drei Thermo- elemente die Trockeneistemperatur, also $-78,5$ °C. Für die horizontale Positionierung der Thermo- elemente in einer Tiefe von 20 mm erfährt die Probe ebenso eine gleichmäßige jedoch lang- samere Abkühlung; nach 156 s Strahldauer errei- chen die Thermo- elemente im Schnitt eine Tempe- ratur von lediglich -14 °C. Anhand der Ergebnisse der beiden untersuchten Proben lässt sich die vertikale Abkühlung des Granits Padang-Yellow ab- leiten. Daraus ergeben sich hohe Temperatur- gradienten zwischen gleich platzierten Thermo- elementen; z. B. für das Thermo- element in der Mitte der Strahlprobe beträgt diese Differenz nach einer Strahldauer von 10 s bis ca. 40 s ca. 80 K.

Die beiden untersuchten spanischen Granitsorten A und B (s. o.) werden aufgrund der höheren Ver- witterung der Sorte B durch das Trockeneisstrahlen unterschiedlich beeinflusst (Tabelle 4).

Für einen Luftstrahl- druck von $p_{LS} = 8$ bar beträgt der maximal gemessene Abtrag der Granitsorte A nach einer Strahldauer von 60 s 3,1 mm. Für die Granitsorte B übersteigt dieser Abtrag die Dicke der Strahlprobe und beträgt somit mindestens 20 mm.

Für einen Luftstrahl- druck von $p_{LS} = 13$ bar erreicht der Abtrag im Fall der Granitsorte A nach einer Strahldauer von 60 s eine Tiefe von 3,8 mm. Für

Tabelle 3: Thermomechanischer Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für den neuen, frisch gesägten und polier- ten Granit Padang-Yellow

Neuer, frisch gesägter und polierter Padang-Yellow-Granit				
Größe [13]	nicht gestrahlt	gestrahlt	Änderung	Strahldauer
Mittl. Risstiefe [mm]	8,0	6,0	-2,0	120 [s]
Max. Risstiefe [mm]	16,5	16,5	0	120 [s]
Häuf. Risstiefe [mm]	0,5	0,5	0	120 [s]
Rissdichte [Risse/mm]	0,12	0,19	+0,07	120 [s]
Max. Abtragstiefe [mm]	0	0,9	+0,9	30 [s]
Abtragsvolumen [mm ³]	0	13,8	+13,8	30 [s]

diese Granitsorte wird durch visuelle Beobachtung ab einem Strahldruck von 5 bar abwärts nach derselben Strahldauer ein vernachlässigbarer Abtrag festgestellt.

Die maximale Risstiefe ist aufgrund der hohen Verwitterung beider Granite nicht bestimmbar, da sie die Dicke der Strahlproben (20 mm) übersteigt. Die mittlere und häufigste Risstiefen dringen infolge des Abtrages für beide Granite tiefer in die Proben ein. Beim Trockeneisstrahlen mit einem Luftstrahldruck von $p_{LS} = 8$ bar wächst für den Granit A nach einer Strahldauer von 60 s die mittlere Risstiefe von 9,5 mm auf 11,5 mm und die häufigste Risstiefe von 0,5 mm auf 4 mm. Für den Granit B wächst nach einer Strahldauer von lediglich 30 s die mittlere Risstiefe von 10 mm auf 14 mm und die häufigste Risstiefe von 0,5 mm auf 8,5 mm.

Für einen Luftstrahldruck von $p_{LS} = 13$ bar wird im Fall des Granits A ebenso eine Zunahme der mittleren Risstiefe gemessen, welche nach gleicher Strahldauer (60 s) um 20 % von 10 mm auf 12 mm steigt. Die häufigste Risstiefe erfährt entsprechend einen Zuwachs von 0,5 mm auf 4,5 mm. Beim Trockeneisstrahlen mit einem Luftstrahldruck von $p_{LS} = 8$ bar wächst die Rissdichte der Granitsorten A von 0,5 Risse/mm auf 0,75 Risse/mm nach einer Strahldauer von 60 s und erfährt somit einen Anstieg von 50 %. In der Hälfte der Zeit (Strahldauer

von 30 s) wird die Rissdichte der Granitsorte B um 64 % größer und wächst von 0,72 Risse/mm auf 1,18 Risse/mm.

Beim Trockeneisstrahlen mit einem Luftstrahldruck von $p_{LS} = 13$ bar wächst die Rissdichte der Granitsorten A ebenfalls. Sie steigt nach einer Strahldauer von 60 s von 0,49 Risse/mm auf 0,82 Risse/mm und erfährt somit einen Anstieg um 67 %.

Tabelle 4 fasst die Schädigung bzw. die Änderung der diskutierten Größen für die spanischen Granite beim Trockeneisstrahlen mit einem Luftstrahldruck von $p_{LS} = 8$ bar zusammen.

Die Temperaturmessungen der beiden untersuchten spanischen Granitproben [13] ergeben, dass sich für die horizontale Positionierung der drei Thermoelemente im Abstand von 12 mm in einer Tiefe von 5 mm die Probe beschleunigt und ungleichmäßig abkühlt; innerhalb von 22 s erreicht das in der Mitte der Probe platzierte Thermoelement die Trockeneistemperatur, also $-78,5^{\circ}\text{C}$. Die anderen beiden Thermoelemente erreichen nach 24 s die höhere Temperatur von -67°C und bleiben an der Stelle konstant. Für die horizontale Positionierung der Thermoelemente auf einer Tiefe von 20 mm erfährt die Probe eine langsamere Abkühlung; nach 97 s Strahldauer erreichen die Thermoelemente im Schnitt eine Temperatur von

Tabelle 4: Thermomechanischer Beitrag zur Schädigung des Trockeneisstrahlens für die verwitterten Granitproben (A und B) der Kathedrale in Santiago de Compostela.

Verwitterter spanischer Granit von der Kathedrale in Santiago de Compostela				
Größe [13]	nicht gestrahlt	gestrahlt	Änderung	Strahldauer
Mittl. Risstiefe (A) [mm]	9,5	11,5	+2,0	60 [s]
Mittl. Risstiefe (B) [mm]	10,0	14,0	+4,0	30 [s]
Max. Risstiefe (A) [mm]	-	-	-	60 [s]
Max. Risstiefe (B) [mm]	-	-	-	30 [s]
Häuf. Risstiefe (A) [mm]	0,5	4,0	+3,5	60 [s]
Häuf. Risstiefe (B) [mm]	0,5	8,5	+8,0	30 [s]
Rissdichte (A) [Risse/mm]	0,5	0,75	+0,25	60 [s]
Rissdichte (B) [Risse/mm]	0,72	1,18	+0,46	30 [s]
Max. Abtragstiefe (A) [mm]	0	3,1	+3,1	60 [s]
Max. Abtragstiefe (B) [mm]	0	20,0	+20,0	60 [s]

lediglich $-49,5^{\circ}\text{C}$. Anhand der Ergebnisse der beiden untersuchten Proben lässt sich die vertikale Abkühlung des Granits Padang-Yellow ableiten. Daraus ergeben sich hohe Temperaturgradienten zwischen gleich platzierten Thermoelementen; z. B. für das Thermoelement in der Mitte der Strahlprobe beträgt diese Differenz nach einer Strahldauer von 10 s bis ca. 28 s ca. 40 K.

Die Untersuchungen der Gesteine mit Flechten mittels Hochgeschwindigkeitsvideographie hatten zum Zweck die qualitative Beschreibung des gesamten Beitrags des Trockeneisstrahlens zur Reinigung solcher empfindlicher Untergründe [13].

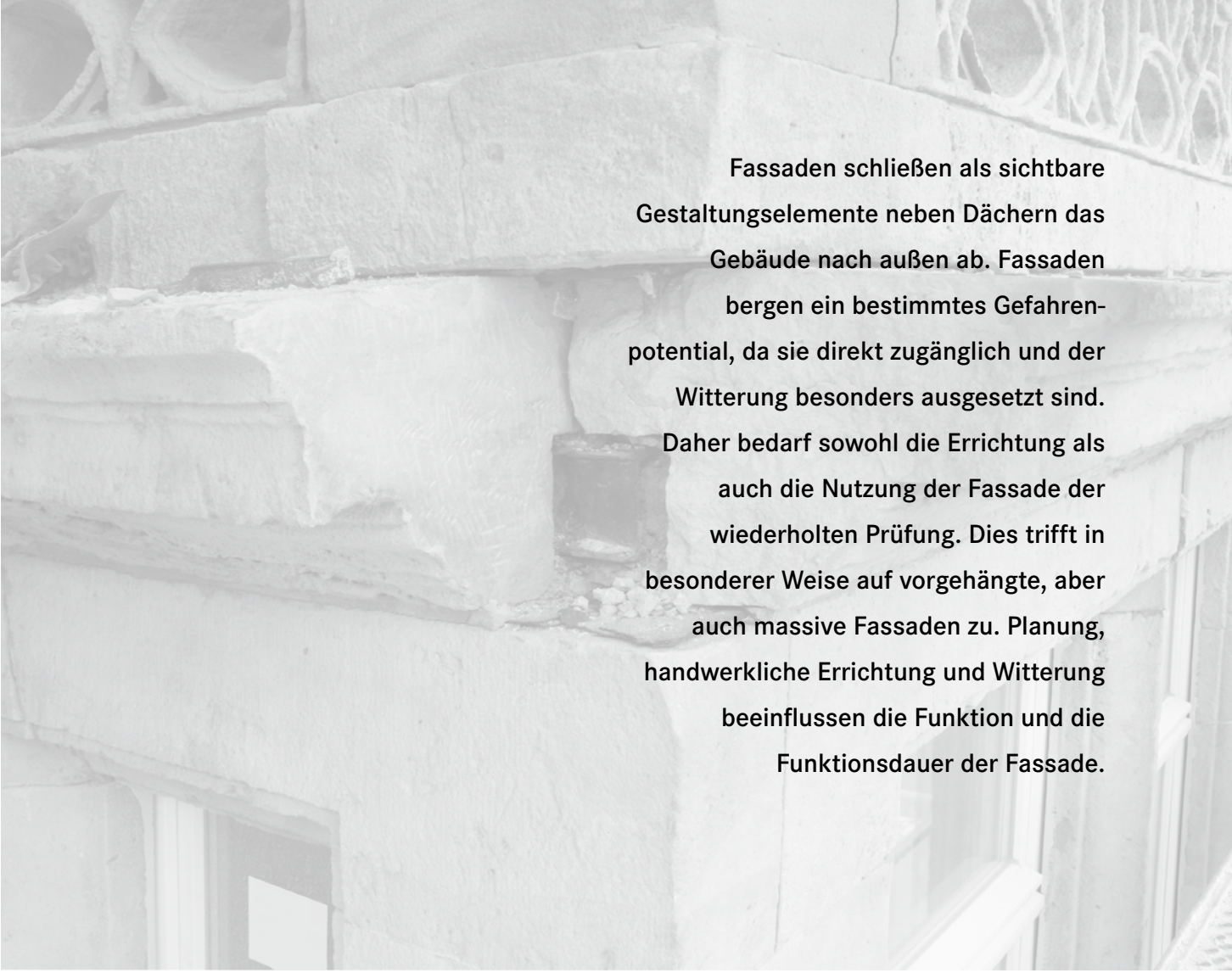
Durch das Trockeneisstrahlen werden die zwei beobachteten Arten von Flechten (moosartige und fest verwurzelte) vollständig abgetragen. Das Zusammenwirken der beiden Effekte des Trockeneisstrahlens (thermisch und mechanisch) wird anhand dieser Ergebnisse verdeutlicht. Die Abkühlung durch das Trockeneis als Vorabtragsphase lockert die Haftung der Flechten an den Steinoberflächen, so dass eine ausreichende Strahlenergie diese Flechten endgültig abträgt. Somit wird der thermomechanische Beitrag zur Reinigung des Trockeneisstrahlens als ausreichend eingestuft [13].

Literatur

- [1] Brüggemann, P.: Abtragen mit dem Trockeneisstrahl: theoretische Grundlagen, Erweiterung des Einsatzbereiches und Anwendungen / Hannover, Universität. http://www.strahlverfahren.de/content/dam/strahlverfahren/de/documents/Brueggemann_IWUniHannover-AbtragenmdTESTcm885-58964.pdf – Forschungsbericht. – Zugriff: 20.11.2014
- [2] Norm DIN 8200 Oktober 1982. Strahlverfahrenstechnik; Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren
- [3] Fraunhofer, IPK: Strahlen mit festem Kohlendioxid-Trockeneisstrahlen, CO_2 -Schneestralen / Fraunhofer Institut. http://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK_FHG/publikationen/themenblaetter/ps_ft_festes_kohlendioxid.pdf. – Forschungsbericht. – Zugriff: 27.10.2014
- [4] Fraunhofer, IPK: Trockene und Rückstandsfreie Bearbeitungstechnologien / Fraunhofer Institut. http://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK_FHG/geschaeftsfelder/ps/fer/CO2-CoC-Broschuere_Web.pdf. – Forschungsbericht. – Zugriff: 28.10.2014
- [5] Haberland, J.: Reinigen und Entschichten mit Trockeneis: Grundlegende Untersuchung des CO_2 -Strahlwerkzeuges und der Verfahrensweise, Bremen, Universität, Diss., 1999
- [6] Huqi, E.: A computational approach to dry ice cleaning of weathered granite – dynamic fracture analysis by means of a thermo-mechanical non-local microcrack modelling, Stuttgart, University, International master of science program (COMMAS), Master thesis, 2015
- [7] Kärcher, GmbH: Eiskalt gegen Schmutz – Das einzigartige Ice Blaster-System / Alfred Kärcher GmbH und Co. KG. <https://www.kaercher.com/de/professional/trockeneisreinigung.html> – Forschungsbericht. – Zugriff: Oktober 2014
- [8] Krieg, M. C.: Analyse der Effekte beim Trockeneisstrahlen, Berlin, Technische Universität, Fakultät 5: Verkehrs- und Maschinensysteme, Diss., Uhlmann, E., 2008, S. 1 – 119
- [9] Linde: Die coolste Reinigungsmethode aller Zeiten / Linde Gas – The Linde Group. http://www.pangas.ch/internet.lg.lg.ch/de/images/Die_coolste_Reinigungsmethode_aller_Zeiten_CRYOCLEAN553_115509.pdf. – Forschungsbericht. – Zugriff: 22.10.2014
- [10] Redeker, C. F.: Abtragen mit dem Trockeneisstrahl, Hannover, Universität, Fachbereich Maschinenbau, Diss., Bach, Fr.-W., 2003, S. 1 – 108
- [11] Uhlmann, E.; El Mernissi, A.; Krieg, M.: Schleuderstrahlen mit Trockeneis. In: JOT Journal für Oberflächentechnik (2006), Nr. 2, S. 60 – 62
- [12] VDMA-Einheitsblatt, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.: VDMA 24379: Strahltechnik – Anwendungen, Verfahren und Anlagen, 2011-03, S. 3
- [13] Valderrama F.: Experimentelle Untersuchungen zur Auswirkung von Trockeneisstrahlen in der Fassadenreinigung auf empfindliche Untergründe, Stuttgart, Universität, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Masterarbeit, 2015

Absturz vorprogrammiert – Gefährdung, Prüfung und Instandsetzung von Fassaden

von Tobias Neubert und Christoph Reuther



Fassaden schließen als sichtbare Gestaltungselemente neben Dächern das Gebäude nach außen ab. Fassaden bergen ein bestimmtes Gefahrenpotential, da sie direkt zugänglich und der Witterung besonders ausgesetzt sind. Daher bedarf sowohl die Errichtung als auch die Nutzung der Fassade der wiederholten Prüfung. Dies trifft in besonderer Weise auf vorgehängte, aber auch massive Fassaden zu. Planung, handwerkliche Errichtung und Witterung beeinflussen die Funktion und die Funktionsdauer der Fassade.

Das gewählte Thema ist recht aggressiv formuliert. Jedoch ist dieses Thema durchaus aktuell und brisant. 2007 flogen im Berliner Hauptbahnhof sprichwörtlich Stahlträger durch die Luft, als der Sturm Kyrill [1] über Deutschland zog. Es sind auch zunehmend Natursteinfassaden, an denen es zu Abstürzen bzw. Beinaheabstürzen von Naturstein kommt. Eine zunehmende Menge an Gebäuden wird erhalten und Alterungsprozesse an den der Atmosphäre ausgesetzten Gebäudeteilen sorgen für eine wachsende Anzahl an Gesamtschädigungen. Der Verwitterungsprozess ist dabei unabhängig von der Art der Gebäudehülle; er betrifft sowohl massive wie auch vorgehängte Fassaden. Verwitterung bedeutet in allen Fällen eine Änderung der Mineralogie des Natursteines, sei es durch Lösungsprozesse, Oxidation oder biogenen Einfluss. Die Ausprägung der Folgen von Schäden unterscheidet sich jedoch erheblich aufgrund des konstruktiven Aufbaus verschiedener Fassadenformen.

1 Geschichtliche Einordnung

Massive Fassaden werden seit Jahrtausenden errichtet. Schon die Babylonier oder Ägypter bzw. andere Völker des Gebietes des fruchtbaren Halbmondes kannten diese Bauweise, ebenso die Hochkultur der Römer und Griechen. Natürlich kannten diese Völker des Altertums teils auch verblendete Fassaden, jedoch war ihnen eine vom Tragwerk weitgehend losgelöste Fassade unbekannt. Vorgehängte Fassaden bzw. deren Vorläufer finden sich erst ab Mitte des 19. Jahrhunderts. Anfänglich wurde versucht, möglichst große Glasfassaden zu errichten. Ein eindrucksvolles Beispiel für die bauliche Umsetzung ist der Kristallpalast in London, der 1851 errichtet wurde. Anfänglich wurden konstruktiv vor allem Stahlskelette verwendet. Mit der Aufnahme der Massenproduktion von Klinkerphasen löste Stahlbeton die Skelettkonstruktionen ab. Erste vorgehängte Fassaden wurden in den späten 1920er Jahren errichtet. Besonders hervorzuheben sind Gebäude wie der Mitternachtsbau in Stuttgart oder auch der Deutschen Pavillon in Barcelona, die Natursteinfassaden aus dünnen,

vorgelagerten Platten aufweisen. Der Poelzigbau in Frankfurt (ehemals I. G.-Farben Haus) fällt ebenfalls in diese Zeit. An diesem Gebäude wurden mehrere tausend Quadratmeter Kirchheimer Muschelkalk in Form dünner Platten verbaut. Entsprechend ist diese Zeit für die Weiterentwicklung der Grundlagen für die architektonische Gestaltung von Gebäuden grundlegend. Die genannten Gebäude haben jedoch im heutigen Sinne keine vorgehängten Fassaden, die nur mit Ankern an die Gebäudehülle angebracht sind. Sie folgen einem Konstruktionsprinzip, welches sich eher vom Massivbau ableiten lässt. Es gilt, dass

- alle Platten fest aufeinander stehen,
- die Fugen zwischen den Platten kraftschlüssig verfüllt sind,
- die Platten mit der Unterkonstruktion vollflächig mit Mörtel angebracht sind (Haftverbund),
- die Verankerung ausschließlich der Verkippsicherung dient.

Die Neuerung gegenüber antiken Gebäuden war demnach zunächst die kippichernden Anker und die Dimensionierung der Fläche. Eine entscheidende Entwicklung zeigte die Veröffentlichung des Deutschen Naturwerkstein-Verbands von 1961 [2], in der Verankerungsbeispiele dargestellt sind. Dies wurde durch die Landesgewerbeanstalt in Würzburg überprüft und als Grundlage für die Formulierung von Normen verwendet. Die Herstellung von Edelstahlankern durch die Firma Lutz/Wertheim trieb die Entwicklung vorgehängter Fassaden voran. W. Schaupp [3] formulierte für vorgehängte Fassaden notwendige Bedingungen wie folgt:

- Notwendigkeit der Hinterlüftung zum Abtransport von Feuchtigkeit bzw. der Herstellung einer Dämmung,
- Dehnfugen zwischen den Steinplatten (vor allem thermische und mechanische Deformation der Platten und des Gebäudes durch Änderung der inneren Energie und Windlasten),
- Mindeststärke von Hartgesteinsplatten von 3 cm (Ankerbruchlasten),
- Vier-Punkt-Verankerung mit korrosionsbeständigem Edelstahl Güteklasse (CrNiMo-Stähle, allgemein V4A).

Vorgehängte Fassaden sind eine junge Entwicklung vornehmlich der vergangenen 100 Jahre, während Massivfassaden deutlich älter sind. Im Folgenden sollen für beide Fassadenarten Schadensbilder, die durch Verwitterung aber auch durch konstruktive und bauliche Gegebenheiten entstanden sind, betrachtet werden. Daraus lassen sich bestimmte Regelungen ableiten, deren Beachtung zu einer Minimierung von Gefahren führen können.

2 Rechtliche Grundlagen

Für die Errichtung von Massivfassaden aus Naturstein gibt es keine direkte Norm. Sie wird allgemein in Mauerwerksnormen geregelt. Als weitere Grundlage kann die DIN 18332 [4] angesehen werden. Darin werden allgemeine Angaben zu Natursteinarbeiten als technische Grundlagen angeführt. Sie wird durch verschiedene Regelwerke ergänzt z. B. DIN EN 12059 [4]. Deutlich umfangreicher ist hingegen die Regelung zu vorgehängten Fassaden. Besonders hervorzuheben sind die DIN EN 18516-1 und 18516-3 [4], die die Anforderungen an verwendete Natursteine und bauliche Umsetzungen regeln.

Neben einschlägigen DIN-Normen gibt es noch Merkblätter und Regelwerke, die die anerkannten Regeln der Technik erweitern. Hier ist besonders die Musterbauordnung hervorzuheben. Absatz 1 des § 3 führt aus: „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.“ [5] Aufgrund dessen hat die Bauministerkonferenz 2006 Hinweise für die Prüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen veröffentlicht. Daraus geht hervor, dass eine Sichtkontrolle aller 4 – 5 Jahre und eine eingehende Prüfung aller 12 – 15 Jahre jedweder exponierter Bauteile erfolgen sollten [6]. Dies gilt für alle Gebäude, die bestimmte Kriterien erfüllen, unter anderem Gebäude mit exponierten Bauteilen. Darunter fallen sowohl Massivfassaden, die beispielsweise Simse, Erker, Balkone o. ä. auskragende Teile beinhalten, wie auch alle vorgehängten oder vorgemörtelten Fassaden, wobei die Werkplatte selbst als exponiert anzusehen ist.

3 Schadensbilder am Beispiel

3.1 Verwendung von rostendem Stahl – fehlender Korrosionsschutz

Die Verwendung von nicht korrosionsbeständigen Stählen findet sich bei beiden Fassadenarten. Die Stähle wurden einerseits während des Baus von Gebäudefassaden, andererseits bei Restaurierungsarbeiten verwendet. Meist wurde auf diese Stähle kein Korrosionsschutz aufgetragen. Unter Korrosionsschutz wird im Folgenden immer eine Passivierung der Metalloberfläche oder die Aufbringung einer Opferanode verstanden, der z. B. durch eine Farbgebung oder Verzinkung erfolgt. Korrosion führt im Hauptsächlichen zu zwei Problemen: Einerseits erfolgt durch eine Oxidation des Metalls eine Volumenzunahme um ca. 60 %. Dies führt bei eingespannten Metallstücken zu einer Spannungszunahme und zumeist zu einer Sprengung des umliegenden Gesteins. Weiterhin folgt aus dem Substanzverlust eine Minimierung des Querschnitts des Stahls und im äußersten Fall kann es zu einem kompletten Versagen des verbindenden oder tragenden Teils kommen.

Die Schadensbilder sind zumeist ähnlich. Vor allem im ersten Fall führt die Volumenzunahme zur Rissbildung oder auch zum Abriss (Bilder 1 und 2). Eine Gefährdung von Personen kann folgen, wie dies am Beispiel des Alten Rathauses in Chemnitz der Fall ist. Durch die exponierte Lage des beschädigten Bauteils und den durchgängigen Riss hätte es bei entsprechenden Windlasten oder einfach in Abhängigkeit von der vergangenen Zeit zu einem Absturz kommen können. Das Volutenstück konnte per Hand ohne weitere mechanische Krafteinwirkung abgenommen werden.

Sehr deutlich wird die Wichtigkeit der Verwendung von rostfreien Edelstählen oder eines Korrosionsschutzes (abhängig von der Einbausituation) am Beispiel der Grundschule Rabenstein in Chemnitz. In diesem Fall wurde auf einem Erker eine Balkonkonstruktion errichtet, wobei die Decke des unter dem Balkon befindlichen Raumes mit Stahlträgern ausgesteift wurde. Diese Stahlträger waren „schwarz“ verbaut worden und sind über die Folgejahre durch Wassereintrag verrostet (Bild 2). Neben einem fehlenden Schutz der Stahlbauteile



Bild 1 a+b

Chemnitz, Altes Rathaus,
Marktseite, gerissene Volute,
Absprengung durch Spannungs-
aufbau durch einen oxidieren-
den Anker,
a) Bestandszustand zum Zeit-
punkt der Schadenskartierung,
b) Zustand nach Abnahme des
beschädigten Bereichs



Bild 2

Chemnitz, Grundschule
Rabenstein, Erker mit Balkon-
aufbau, stark oxidiert und
aufgeblätterter Stahlträger

war ebenso die Abdichtung des Balkons defekt, was den Oxidationsvorgang deutlich beschleunigte. Entsprechende Schäden am Naturstein äußerten sich auch in diesem Fall durch Risse, aber auch durch einen Versatz des vorgelagerten Simses, speziell der Simsecke.

Auch bei Fassaden, die vorgehängt oder wie im Falle des Poelzigbaus mit vorgemörtelten Platten ausgeführt waren finden sich Schäden aufgrund von Oxidationsreaktionen. Die Fassadenplatten wurden ursprünglich mit einer Vierpunkt-Verankerung an die dahinter befindliche Ausmauerung zwischen der Stahlskelettkonstruktion verbunden. Die verwendeten Anker sind aus nicht rostfestem Stahl hergestellt. Sie führten durch die Oxidation zu entsprechenden Schäden (Bild 3).

Der Schädigungsgrad ist jedoch nicht allein dadurch erklärbar und auf unsachgemäße Verankerung zurückzuführen.

3.2 Schäden durch unsachgemäß erbrachte Planungs- und Bauleistungen

Schäden sind ebenso durch Fehler in der Planungs- und Bauausführung möglich. Dabei ist das Wort „unsachgemäß“ näher zu erläutern. Das Wort kann auf zweierlei Weise verstanden werden, einmal relativ und einmal absolut. Relativ meint, dass eine ausgeführte Leistung zum Zeitpunkt der Erbringung durchaus den entsprechenden anerkannten Regeln der Technik entspricht. Sie scheint aber aus heutiger Sicht unsachgemäß. Andererseits gibt es jedoch auch Ausführungen, die zum Zeitpunkt der Erbringung unsachgemäß waren. Eine Unterscheidung im Nachhinein ist schwierig, da der Stand der Technik nicht exakt zu rekonstruieren ist. Weiterhin muss ebenso die Verfügbarkeit von Materialien in Betracht gezogen werden. Beides würde umfangreiche geschichtliche Recherchen voraussetzen. Parameter wie persönliche Erfahrungen und Kenntnisse lassen sich dabei meist nicht rekonstruieren. Eine Fallunterscheidung ist damit nur selten gegeben und es lässt sich zunächst nur ein Baumangel aus der heutigen Betrachtung feststellen.

Ein gutes Beispiel stellt hier wieder der Poelzigbau dar. Viele Platten sind an den Stellen gerissen, an denen in der Vergangenheit Sanierungen durchgeführt wurde. Dabei sind offenbar gelockerte Platten mittig mit einem Dübel erneut verankert worden (Bild 4). Dabei kam es zu massiven Beschädigungen. Der Grund hierfür konnte nicht genau ermittelt werden, da während der Begehung eine Bauteilöffnung nicht vorgesehen war. Da aber das Schadensbild immer gleich ist, kann davon ausgegangen werden, dass entweder die Art der Verankerung oder aber die Ausführung der Verankerung unsachgemäß waren. Wie dies an der historischen Bestandsfassade korrekt ausgeführt wurde, ist die Verankerung im Normalfall an vier, mindestens jedoch an drei Punkten vorzunehmen und dabei auf Spannungsfreiheit zu achten, um der Platte mechanische oder thermische Deformationen zu ermöglichen (DIN EN 18516-3, 2013 [4]). Im Fall des Poelzigbaus wurden die empfohlenen Kontrollen der Bauministerkonferenz [6] beachtet. Dadurch konnte nun rechtzeitig auf die entsprechenden Schädigungen der Fassade reagiert und ein Maßnahmenkatalog zur Instandsetzung vorgelegt werden.



Ähnlich liegt der Fall an einer historischen Fassade in Köln. Es handelt sich um eine Fassade mit Kalksteinplatten. Der Bau wurde in den Jahren um 1960 erweitert und die Fassade dem historischen Original nachempfunden. An diesem Fassadenbereich kam es zum Teil zu massiven Schäden, vor allem an den Gebäudeecken, während die weitaus ältere Fassade des historischen Gebäudes entsprechend weniger massive Schäden aufweist. Der neue Fassadenbereich wurde auf eine massive Stahlbetonkonstruktion aufgebracht. Die Natursteinplatten wurden mit Beton hinterfüllt und die Anker zumindest im zugänglichen Bereich nur in diese Hinterfüllung eingelegt (Bild 5).

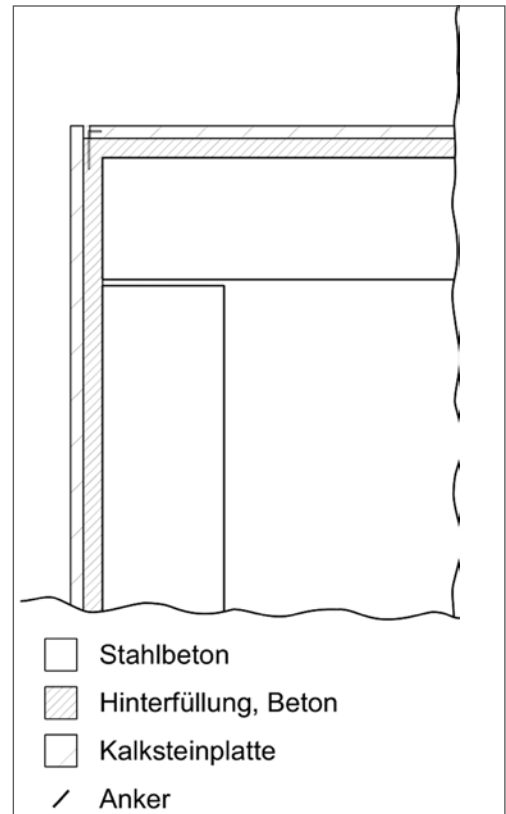
Bild 3

Frankfurt, Poelzigbau, Anker-
ausbruch an einer Travertin-
platte an der Fassade aufgrund
von Oxidation, Bildrechte

Bild 4

Frankfurt, Poelzigbau, nachver-
ankerte Platte durch einen etwa
plattenmittig angebrachten
Dübel unbekannter Bauart, Riss
etwa senkrecht durch die Platte
und die strukturschwächende
Nachverankerung

Bild 5 a+b
Köln, Fassade mit vorgehängten, hinterfüllten Fassadenplatten, Fugen dauerelastisch ausgebildet, links: gelöste Fassadenplatte, Hinterfüllung mit oxidiertem Stahlbewehrung und Anker, dahinter Stahlbetonwand, rechts: Prinzipskizze des Aufbaus



Die Hinterfüllung ist einerseits durch eindringendes Wasser und durch die Atmosphäre einer stärkeren Verwitterung unterworfen, andererseits durch den oxidierenden Stahl (fehlende Überdeckung) gesprengt. Die Ablösung der äußeren Hülle von der Stahlbetonwand führt zur potenziellen Gefahr, dass Fassadenbereiche, vor allem die dargestellte, exponierte Ecke sich löst und herabfällt. Dies konnte in diesem Fall mit einer Fassadenprüfung durch fachkundiges Personal und der anschließenden Instandsetzung verhindert werden. Die ursprüngliche Fassade wurde schon um 1930 mit rostfreiem Stahl in die dahinter befindliche Wand verankert. Diese Konstruktion ist, trotz vorhandener Schäden an den Kalksteinplatten bis heute stabil. Die Verwendung von rostendem Stahl und die fehlende Verbindung zur Stahlbetonwand haben im neuerrichteten Abschnitt zu dem beschriebenen Versagen geführt.

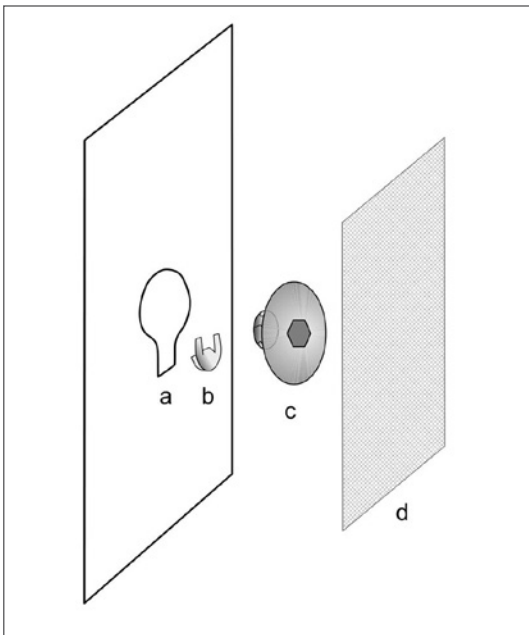
In beiden Fällen ist von konstruktiven oder baulichen Fehleinschätzungen zu sprechen, die zu Folgeschäden geführt haben.

Vorgehängte Fassaden sind aufgrund der Entkopplung zwischen Fassade und Naturstein (allgemein

Werkstein), der damit verbundenen mehrteiligen Konstruktion und der meist dünnen Platten anfälliger für fehlerhafte konstruktive und bauliche Ausführungen als dies bei Massivfassaden der Fall ist. Natürlich gibt es auch an massiven Fassaden entsprechend denkbare Fälle. Ein häufiger auftretendes Problem ist beispielsweise eine fehlerhaft angebrachte Verblechung auf Gesimsen, wobei nicht rostfreier Stahl zur Befestigung verwendet wurde. Dies kann leicht zur Absprengung von Teilbereichen führen. Solche Fälle sind aber in der Praxis deutlich seltener, da die Konstruktion im Regelfall einfacher ist.

3.3 Schäden durch Anwendung fehlerhafter Konstruktionen

Auch eine Konstruktion an sich kann jedoch fehlerhaft sein. Ähnlich gelagert wie vor, ist die Bezeichnung „fehlerhaft“ auch in diesen Fällen meist eine Betrachtung im Nachhinein. Konstruktion meint in diesem Kontext eine Bauteilgruppe zur Befestigung von Natursteinelementen, die zu meist auch mit einer technischen Bearbeitung des Natursteins einhergehen. Ein Beispiel für eine sol-



che Konstruktion findet sich an einem Haus in der Stadt Chemnitz (Bild 6).

Das Prinzip der verwendeten Aufhängung, Einzelplatten entnehmen zu können, hat entscheidende Nachteile: Die Konstruktion ist nicht dafür geeignet, Maßtoleranzen auszugleichen, die aber sowohl bei der Natursteinplatte als auch während der Montage auftreten. Dies kann sich entweder darin auswirken, dass die Abstände zwischen den Platten unterschiedlich groß sind oder aber im extremen Fall, dass die Aufhängung nicht auf der Lastaufnahme aufliegt (Bild 7 und Bild 8). Es wurden in der Fassade in den horizontalen Fugen Abstandshalter belassen. Dies führt zu einer nicht berechneten Belastung der Platten. Zusätzlich sitzt die Platte dadurch nicht auf dem Auflager auf. Dies kann schnell zum Absturz einer Platte führen, vor allem dann, wenn die Platte durch eine thermische oder mechanische Belastung leicht deformiert wird.

3.4 Schäden durch Verwitterung

Verwitterungsschäden treten bei allen Formen der Fassadengestaltung auf. Sie sind die Folge der Einwirkung der Atmosphäre auf den Mineralbestand. Je nach Stabilitätsfeld der einzelnen Minerale verändert sich der Mineralbestand mit der Zeit, was zum Zerfall des Natursteins führt. Dieser natürliche Prozess lässt sich kinetisch hemmen, aber im

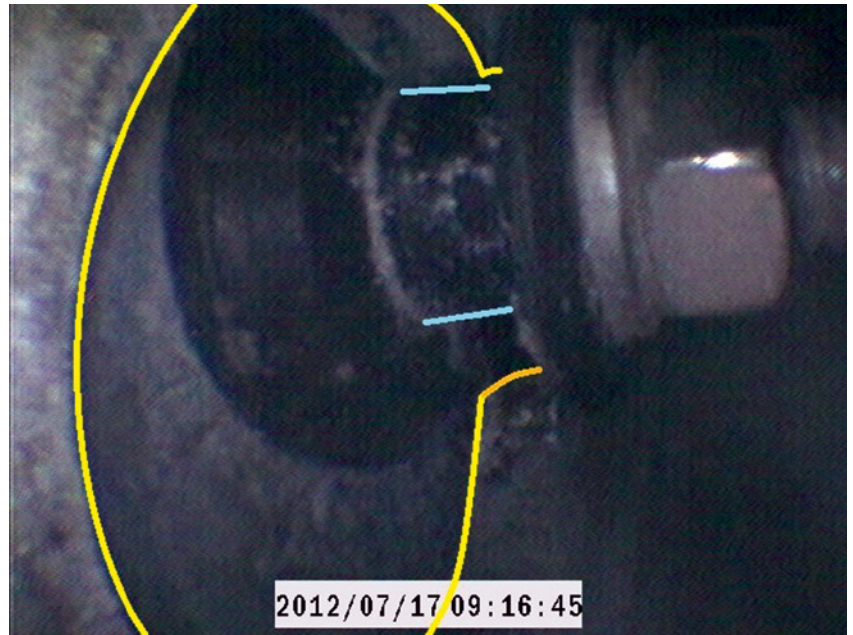


Bild 6
Chemnitz, Prinzipskizze einer verwendeten Verankerung von Natursteinplatten an eine Bestandsfassade, a Ankerschiene mit Einschnitt für das Einhängen der Natursteinplatte, b Auflager zur Lastaufnahme, c Aufhängung, eingebracht in die Natursteinplatte durch Hinterschnittanker, d Natursteinplatte

Bild 7
Chemnitz, Bestandsfassade, Darstellung der Aufhängung und der Ankerschiene mit Einschnitt, die Aufhängung sitzt im runden Einschub (gelbe Markierung) über dem Auflager, der grau markierte Bereich der Aufhängung müsste auf dem Auflager zur Lastaufnahme aufliegen

Bild 8
Chemnitz, Bestandsfassade, absichtlich belassene Abstandshalter zwischen den Kalksteinplatten zur Wahrung des einheitlichen Fugenbildes

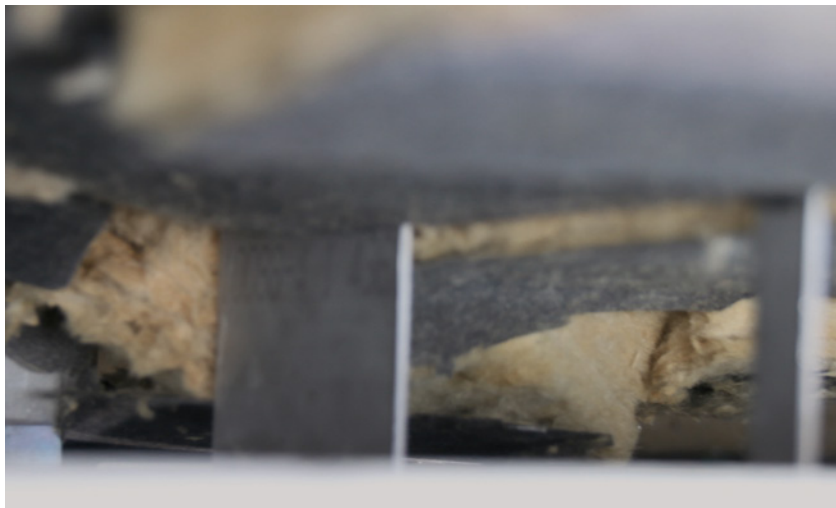


Bild 9
Freiberg, Fassade während der Errichtung, Ankerplatten wurden abgeschnitten und dabei die Schraublöcher zu Fassade geöffnet (siehe Markierung, Anker schief angebracht und gebogen)

Bild 10
Freiberg, Fassade während der Errichtung, Dämmung nicht korrekt eingebacht, Wärmebrücken möglich, nachträgliches Richten über die Fuge bedingt möglich.

Regelfall nicht vollständig stoppen. Er führt neben mechanischen und den beschriebenen Einflüssen zur Notwendigkeit, Fassaden instand zu setzen. Normalerweise geschieht die Verwitterung von der der Witterung ausgesetzten Fläche in das Natursteinvolumen, so dass es ab einem bestimmten Punkt zum strukturellen Versagen kommt. Hier zeigt sich der Vorteil von Massivfassaden deutlich. Aufgrund des günstigeren Volumen- zu Oberflächenverhältnisses und der bei massiven Fassaden größeren Aufstandsflächen sind diese rein strukturell deutlich länger haltbar als vorgehängte Fassaden. Massive Fassaden sind zumeist deutlich älter als vorgehängte Fassaden, wenngleich die optische Beschaffenheit ebenso nach wenigen Jahren deutliche Veränderung erfahren kann.

4 Vermeidung von Schäden während der Bauphase

Die bisherigen Beispiele belegen Schäden, die an Bestandsfassaden auftreten, entweder durch natürliche Einflüsse oder aber durch menschlichen Einfluss. Dabei ist auffällig, dass sich bestimmte Schäden (Folgeschäden) dadurch vermeiden lassen, wenn schon während der Bauphase die Einhaltung der anerkannten Regeln der Technik überwacht werden. Die Ausführung von Bauarbeiten ist eine schlecht fassbare Größe, da sie vom menschlichen Verhalten stark abhängt. Je nachdem, wer baut, kann sich das Ergebnis erheblich unterscheiden. Eine Bauüberwachung ist daher ein sinnvolles Instrument. An einem aktuellen Beispiel soll dies verdeutlicht werden: Der Autor begleitet derzeit als Sachverständiger ein Bauvorhaben in Freiberg. An einem Neubau aus Stahlbeton wird eine Sandsteinfassade in Form einer vorgehängten Fassade angebracht. Der Aufbau ist dabei heutzutage üblich. Die Fassadenplatten werden durch entsprechend dimensionierte, rostfreie Anker seitlich an vier Punkten gehalten. An die Fassade ist eine Perimeterdämmung angebracht, wobei ein Luftspalt zwischen Sandsteinplatten und Dämmung für die notwendige Hinterlüftung sorgt. Während der Arbeiten kam es zu Mängeln in der Verarbeitung, die entweder im Nachhinein nicht mehr sichtbar (Bild 9) oder aber nur bedingt korrigierbar sind (Bild 10). Diese Mängel können zu erheblichen Problemen führen. So wurden Abstandsklötzer vergessen zu entfernen. Bei thermischer oder mechanischer Beanspruchung verspannt sich die Platte zusätzlich, was zu einem Reißen führen kann. Dieser Mangel kann nachträglich noch behoben werden. Problematischer ist ein zu flach eingebundener Schwerlastdübel oder eine nicht korrekt angebrachte Ankerplatte (Bild 9). Beides kann nur unter massivem Aufwand (Abbau ganzer Fassadenbereiche) behoben werden, wenn es bemerkt wird. Weitere Beispiele sind Lücken in der Dämmung, rückseitig eingeschnittene Ankertaschen, vergessene Gerüstanker, lückenhafte Abdichtungen u. a. Um die entsprechenden Folgekosten für Fassaden zu minimieren, ist eine engmaschige Bauüberwachung unabdingbar, vor allem bei größeren Objekten.

5 Fazit

Anhand der Beispiele wird deutlich, dass alle Formen der Fassaden anfällig für Schädigungen sind. Es zeigt sich, dass vor allem große Bauvorhaben von Anfang an einer Begleitung von Fachpersonal und einer regelmäßigen Kontrolle bedürfen, um Gefahren zu minimieren. Mit regelmäßigen Prüfungen in den Folgejahren [5] kann eine rechtzeitige Instandsetzung geplant werden. In dieser gesetzlichen Pflicht stehen Eigentümer grundsätzlich und besonders bei Gebäuden mit öffentlichem Interesse. In vielen der beschriebenen Fälle wurden Schäden bei Arbeiten an der Fassade oder durch zufällige Beobachtungen entdeckt. Ein geplanter Handlungsspielraum war zumeist nicht gegeben und Maßnahmen verbunden mit hohen Kosten waren nicht einkalkuliert.

Neben der Kontrolle sind eine sinnvolle Planung und eine Bauüberwachung während der Ausführungen unerlässlich. So ist zum Beispiel die Frage nach dem Einsatz von massiven Fassadenbereichen und vorgehängten Bereichen je nach Lage und Bewitterung zu stellen. Daneben ist natürlich auch der Einsatz des entsprechenden (Naturstein-)Materials zu wählen in Abhängigkeit von der Bewitterung und der Lage innerhalb einer Fassade.

Verwitterungsschäden sind unvermeidlich und damit hat eine jede Fassade auch bei optimaler Pflege eine begrenzte Lebensdauer. Dabei ist festzustellen, dass aufgrund des deutlich höheren Volumens eine Massivfassade unter vergleichbaren äußeren Faktoren und verwendeten Materialien eine längere Lebensdauer hat, als dies bei vorgehängten Fassaden der Fall ist.

Danksagung

Unser Dank gilt Benjamin Raatz, der uns bei der Informationsbeschaffung geholfen und bei der Vergabe von Bildrechten mit entsprechendem Material unterstützt hat. Weiterhin danken wir allen Auftraggebern der genannten Beispiele, ohne die die angestellten Betrachtungen nicht unterlegbar gewesen wären.

Literatur

- [1] Spiegel Online (2007): aufrufbar unter <http://www.spiegel.de/wirtschaft/stahltraeger-absturz-berlin-pannen-bahnhof-kuenftig-ab-windstaerke-acht-geschlossen-a-461009.html>, SPIEGEL ONLINE GmbH & Co. KG
- [2] Deutscher Naturwerkstein-Verband e. V. (1961): Richtlinien für das Versetzen und Verlegen von Naturwerksteinen, dritte Auflage, S. 13 – 17
- [3] W. Schaupp (1962): Die Außenwand. Bekleidung, Wärmedämmung, Feuchtigkeitsschutz, Gallwey Verlag
- [4] DNV Deutscher Naturwerkstein-Verband e. V., BIV Bundesverband Deutscher Steinmetze (2017): DIN-Normensammlung Naturwerkstein, 1. Auflage, Beuth-Verlag GmbH
- [5] Wolters Kluwer Deutschland GmbH (2019): Musterbauordnung – MBO –, S. 4, erhältlich unter www.arbeitssicherheit.de
- [6] Bauministerkonferenz (2006), Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch die Eigentümer/Verfügungsberechtigten, S. 2, 7

Abbildungen

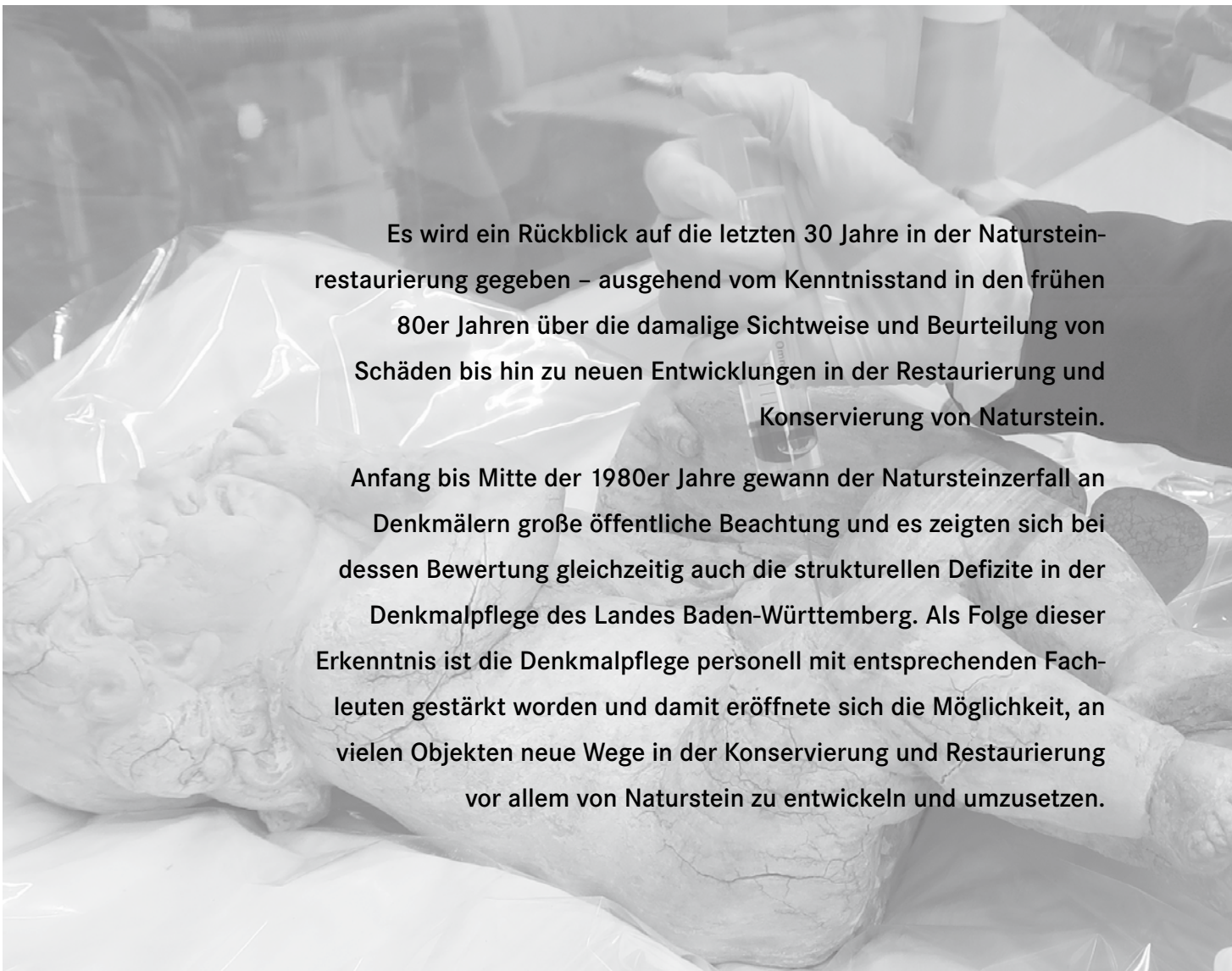
Bilder 3, 4: Dipl.-Ing. Benjamin Raatz (2015),
Fa. Kohlhoff & Raatz GmbH, Wiesbaden
Alle anderen Abbildungen von den Autoren

30 Jahre Steinrestaurierung, Technik gestern und heute

Frühere Erkenntnisse zu Steinschäden

Schwerpunkt: die damalige Immissionssituation

von Gabriele Grassegger und Otto Wölbert



Es wird ein Rückblick auf die letzten 30 Jahre in der Natursteinrestaurierung gegeben – ausgehend vom Kenntnisstand in den frühen 80er Jahren über die damalige Sichtweise und Beurteilung von Schäden bis hin zu neuen Entwicklungen in der Restaurierung und Konservierung von Naturstein.

Anfang bis Mitte der 1980er Jahre gewann der Natursteinzerfall an Denkmälern große öffentliche Beachtung und es zeigten sich bei dessen Bewertung gleichzeitig auch die strukturellen Defizite in der Denkmalpflege des Landes Baden-Württemberg. Als Folge dieser Erkenntnis ist die Denkmalpflege personell mit entsprechenden Fachleuten gestärkt worden und damit eröffnete sich die Möglichkeit, an vielen Objekten neue Wege in der Konservierung und Restaurierung vor allem von Naturstein zu entwickeln und umzusetzen.

1 Vorgeschichte

Beim Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg wurde erst 1985 die Stelle eines Steinrestaurators eingerichtet, zusätzlich auch eine auf fünf Jahre befristete Stelle für eine(n) Naturwissenschaftler(in). Andere Bundesländer hatten schon früher auf die akuten Steinschäden von Denkmälern reagiert. Bis dahin wurde gelegentlich von Baden-Württemberg Amtshilfe aus Bayern angefordert oder es wurden für vorbereitende Untersuchungen und Konzeptfindungen private Büros beauftragt. Das Land reagierte damit auf den zunehmenden Zerfall von Denkmälern aus Naturstein, wie ihn der damalige baden-württembergische Landeskonservator Eberhard Grunsky in seinem Artikel im Nachrichtenblatt der Denkmalpflege drastisch bebilderte und überzeugend beschrieb.

Eberhard Grunsky: Steinzerfall – Gefährdung und Zerstörung von Kulturdenkmalen 1984, Nachrichtenblatt Bd. 2:

Ein wichtiger Schritt zur engeren Verknüpfung der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung mit den Anforderungen der denkmalpflegerischen Praxis war 1978 die Einrichtung des Zollern-Instituts in Dortmund und eines Zentrallabors beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München. Beide Institute wurden durch eine großzügige Förderung der Stiftung Volkswagenwerk ermöglicht, damit von Dortmund und von München aus auch die Denkmalämter in anderen Ländern der Bundesrepublik in schwierigen Problemfällen beraten werden.

Er äußerte zum Ende seines Beitrags die Hoffnung, dass durch die Einstellung eines Steinrestaurators und durch dessen Beratung die Amtshilfe aus Bayern und Nordrhein-Westfalen effektiver und direkter sein könnte und optimaler deren Ergebnisse an den Objekten umgesetzt werden könnte.

Die „Werkstätte für Restaurierung“ wurde mit der Einstellung von Restaurator H. F. Reichwald 1978 gegründet. Ihre vornehmliche Aufgabe war die Beratung der Denkmalpfleger, Eigentümer, Architekten, Restauratoren und Handwerker in allen Restaurierungsfragen, in der Entwicklung von neuen Konservierungstechniken, in der Förderung der Qualität in der Restaurierung und der Ausbil-

dung der Restauratoren – auch in Verbindung mit der akademischen Ausbildung an der Akademie für Bildenden Künste in Stuttgart. Mittlerweile sind im Fachbereich Restaurierung des Landesdenkmalamts Spezialisten für folgende Fachbereiche angestellt: Gemälde und Skulpturen, Wandmalerei und Architekturoberflächen, Naturstein, Bauphysik, Metall und Glasmalerei. Alle Stellen sind jeweils einmal besetzt und die Kolleginnen und Kollegen sind landesweit in Baden-Württemberg tätig.

Das Land ging über die Hoffnungen von Grunsky hinaus und schuf zusätzlich eine Stelle für eine(n) Naturwissenschaftler(in), die im Bereich des Natursteins angesiedelt wurde. Zwar hatte Baden-Württemberg nicht wie München oder Bochum ein eigenes Zentrallabor, aber durch die enge Kooperation mit der damaligen Forschungs- und Materialprüfanstalt Stuttgart (FMPA) wurden optimale Bedingungen und Untersuchungsmöglichkeiten sichergestellt. Es erschien damals auch folgerichtig und logisch, dass nach Ablauf der fünf Jahre – also 1990 – die FMPA/Stuttgart (damals am WM Baden-Württemberg, später an der Universität Stuttgart angesiedelt) ein eigens Referat „Denkmalpflege“ schuf und die Kollegin von der Denkmalpflege übernahm.

Diese Besetzungen ermöglichten ebenfalls eine Intensivierung im Forschungsbereich. Hier seien nur die wichtigsten genannt: das BMFT-Projekt Steinzerfall-Steinkonservierung, das Deutsch-Französische Forschungsvorhaben Naturstein- und Glasrestaurierung und diverse DBU-Forschungsvorhaben.

2 Motivation für diese Ausführungen

Aus Berufserfahrung und Praxis auf vielen Ebenen und bei zahlreichen Bauwerken ab ca. 1990 sollen die Unterschiede in der Sicht auf die Natursteinverwitterung und die folgende Restaurierung und Sanierung, d. h. der damalige Kenntnisstand ca. um 1990, zusammengefasst werden. Damit sollen die am Bauwerk häufig vorliegenden früheren Maßnahmen verstanden und richtig eingeschätzt werden. Grassegger und Wölbert waren ab ca. 1985 im Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württem-

berg tätig, bauten aber natürlich auf dem damaligen Kenntnisstand auf. Solche Vorkenntnisse sind sehr wichtig, um den Konservierungszustand und die Einschätzung eines Bauwerks zu ermöglichen. In Anbetracht der derzeit laufenden NO_x- und Umweltdebatten, wurden die damaligen Schadstoff-Depositionsdaten aufgezeigt.

Es soll hier auf ein Spektrum an damaligen Maßnahmen und Überlegungen eingegangen werden. Stichworte sind: Festigungen, Schalenanbindungen, Hydrophobierungen, Steinaustausch, Sicht auf Feuchte, Steinschäden, Immissionen auf Steine, Entwicklung der Schadensbilder.

3 Gesteinsschäden und ihre Ursachen

3.1 Schadensbilder und ihre Definition aus der Sicht von ca. 1990

Absanden oder Abmehlen beschreibt eine Zerfallsform, die in der Regel nur aus dem Abfallen einzelner Körner (je nach Korngröße) oder sehr kleiner Kornverbände entsteht.

Schalenbildung ist eine Schadensform, bei der sich oberflächenparallel Schalen durch Risse lösen. Es treten auch Mehrfachschalen bis zu einer blätterteigartigen Konsistenz auf. Wenn die Schalen abgefallen sind, befindet sich darunter häufig eine wellige Oberfläche oder eine mürbe bis schuppige Zone.

Abbröckeln ist ein Zerfall in ungleichförmige Stücke, die sich durch Risse ablösen. Es steht meist in engem Zusammenhang mit anderen Schadensbildern wie Rissbildungen, Schalen oder dem Wiederaufleben von Klüften. Auch ist der Übergang zu Schuppenbildung manchmal fließend.

Schuppenbildung ist eine kleinformatige Zerfallsform kleiner als Schalenbildung aber mit dieser in einigen Punkten verwandt. Sie wird auch bröckeliger Zerfall genannt. Die kleinformatigen Schuppen bis ca. 5 mm fallen bei der geringsten Berührung ab. Sie sind oft sehr stark im Gefüge zersetzt und mürbe.

Rissbildungen treten selten isoliert von obigen Schadensbildern auf. Risse können im Prinzip in

jeder Orientierung entstehen. Bevorzugt sind sie aber senkrecht und parallel zur Oberfläche orientiert und mit Schalen, Schuppen, Abbröckeln oder anderem verbunden. Risse spielen bei den oben beschriebenen Schadensbildern – Schalen- und Schuppenbildung – als Trennflächen eine maßgebliche Rolle.

Aushöhlungen oder Alveolarbildungen sind geometrisch rundliche Auswitterungsformen, die einzeln oder im Verband und z. T. mit zelliger Struktur (Alveolaren) durch unterschiedlich harte Bereiche auftreten.

Verfärbungen sind im engeren Sinne später hervorgerufene Farbwechsel innerhalb eines Steines, die erst am Bauwerk aufgetreten sind. Sehr oft kommen Bleichungen in roten Marmoren oder „Rostflecke“ auf hellen Gesteinen vor und entsprechen Reduktionen oder Oxidationen (Rostflecken). Nicht unwesentlich ist sicher der Anteil an biologischen Prozessen (Überzüge grün bis schwarz). Bakterien und andere Mikroorganismen können Farbstoffe produzieren.

Ausblühungen sind Materialneubildungen (Kristallisationen), die gut sichtbar an der Oberfläche stattfinden. Es sind in der Regel weiße Verbindungen, die sehr unterschiedliche Kristallformen und Haftung auf der Oberfläche zeigen. Die Variationsbreite reicht von harten, festsitzenden, in die Poren hineinziehenden Überzügen bis zu locker aufsitzenden, z. T. weichen, nadeligen Kristallen. In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung können die Ausblühungen mehrere Jahreszeiten unverändert überstehen, sie können sich aber auch bei jedem Luftfeuchtewechsel verändern, in Lösung gehen, rekristallisieren etc.

Anlösungen (auch Mattierung oder Aufrauungen genannt) auf der Oberfläche sind eine generelle Bezeichnung für Veränderungen an der Oberfläche durch Lösungsprozesse.

Verschmutzungen entstehen durch die Auflagerung von Fremdmaterialien aus der Atmosphäre oder vom Bauwerk selbst, d.h. im letzteren Fall ein Absetzen von Lösungsprodukten aus anderen Baustoffen. Die Schichtdicke der Schmutzkrusten kann sehr variabel sein, hauchdünne Patina bis zu zentimeterdicken Schmutzkrusten.

Biogene Schadensbilder spielen vermutlich eine weitaus größere Rolle als bisher vermutet. Optisch gut erkennbar sind Algen, Moose, Flechten und höhere Pflanzen an Bauwerken. Mikrobieller Befall muss von Spezialisten beurteilt werden.

Tabelle 1

Versuch einer interdisziplinären Modellierung von komplexen, zeitlichen und multifaktoriellen Belastungen und Abfolgen von Zerstörungsprozessen.

1. Prozess: chemischer Angriff auf Minerale	
Beginn:	sofort wenn Immissionen oder korrodierendes chemisches Milieu auftritt
führt zu:	Gefügeschwächungen, Mineralabbau, ggf. Salzbildung
wo:	überall am Bauwerk, aber abhängig von der Angriffsintensität
Hauptauslösende Faktoren:	Immissionseintrag, Stabilität der Minerale (Silikate, Karbonate, Tone, so zusammengesetzte Gesteinsbruchstücke, Glimmer), die Feuchtekonzentrationen
2. Prozess: biologischer Angriff auf Minerale	
Beginn:	unter Umständen sofort, scheint aber mit einer Vorschädigung anzusteigen: Wasserfilme und Immissionen erforderlich; später u. U. zyklische Besiedlungen, d. h. Absterben/Neubesiedlung durch biologische Prozesse
führt zu:	Minerallösungen, Schleimbildungen und Oberflächenverdichtungen, physikalischen Veränderungen, auch Nitrat und Gipsbildungen und zahlreichen org. Bildungen im Stein
3. Prozess: physikalische Zerstörungsformen	
Beginn:	vermutlich erst nachdem chemische und/oder biologische Vorschädigungen vorliegen: Salze gebildet wurden, Wassergehalt sich erhöht hat, Gefüge geschwächt sind
führt zu:	Rissen, Schalen, Absprengungen, Gefügauflockerungen etc.
wo:	an besonders klimatisch exponierte Zonen, dauerfeuchte Zonen, Salzakkumulationszonen (Prozess beginnt vermutlich überwiegend lokal)
Hauptfaktoren:	Feuchte, Salze (hohe Immissionsraten), Wärme-, Temperaturspannungen, außer bei starken Frost-Tauwechseln oder sehr hohen Salzkonzentrationen, da finden Frost- oder Salzsprengungen statt.
4. Prozess: Schalenbildung oder andersartiger Oberflächenverlust	
	Erneute biologische Besiedlung
Beginn:	nach dem Abfall der 1. Schale, wegen fehlendem schwarzen Belag
führt zu:	Sekundärbesiedlung
wo:	Bauwerksbereiche mit besonders günstigen Wachstumsbedingungen für Bakterien/Algen
5. Zyklus: Beginn der Verläufe 1–4 von vorn.	
Die Prozessdauer wird wegen Vorschäden immer kürzer, es geht bis zum Zerfall.	

3.2 Gesteinszersetzung: Versuch der Modellierung des Zusammenspiels von chemischen, biologischen mineralogischen und physikalischen Prozessen

Modellierungsansätze von komplexen Einwirkungen sind (damals) nur im geringen Umfang erfolgt: Blaschke (1987), Blaschke & Juling (1992), Warscheid et al. (1989) und Grassegger & Mausfeld (1991); hier am Beispiel der Ergebnisse von Kaiserstühler Tuffen am Breisacher Münster (Tabelle 1).

Blaschke (1987) und Blaschke & Juling (1992) weisen auf den engen Zusammenhang zwischen feuchten Bereichen an Bauwerken und zyklischer Besiedlung sowie den sich an diesen Stellen schnell entwickelnden Schäden hin. Hierdurch kommt es auch bei Neubauten zu stark differenzierten Schadensverläufen, bei denen Biofilme eine große chemische und physikalische Rolle spielen.

Grassegger & Mausfeld (1991) versuchten eine qualitative Modellierung von Schadensverläufen in Form eines Flussdiagramms und Wenn-Dann-Entscheidungen als Diskussionsvorschlag für interdisziplinäre Forschungen.

Möller (1993) stellte sich die Frage, ob thermische und hygri-sche Dehnungen/Spannungen alleine ausreichen, um Risse und Schalenbildungen auszulösen. Er kam auf Grund von rechnerischen Spannungsmodellen und Belastungssimulationen an verwitterten und unverwitterten Sandsteinen zu dem Ergebnis, dass sie in der Regel nicht ausreichen. Eine Ausnahme bilden nur vorgeschädigte, tonmineralreiche Sandsteine. Bei letzteren kann es tatsächlich zu Rißbildungen durch „normale“ Klimabelastungen kommen.

Warscheid et al. (1989) weisen auf einen engen Zusammenhang zwischen der Mineralzusammensetzung, dem Gesteinsgefüge und der mikrobiellen Besiedlung hin, wobei silikatische Gesteine kaum angreifbar sind, hingegen wirken karbonat- und insbesondere glimmer- und tonmineralgebundene Sandsteine fördernd. Warscheid & Krumbein (1994) zeigen außerdem, dass häufig ein jahreszeitlich zyklischer Ablauf der Biokorrosion auftritt, da die feuchteabhängigen Organismen z.T. im Sommer

weniger aktiv sind. Außerdem wird auf die große Rolle der Biofilme als Feuchtereservoir und physikalische Trocknungssperre hingewiesen.

Ein wichtiges Nachschlagewerk für den bruchfrischen Ausgangszustand stellt stets Grimm (1990) dar.

3.3 Salzbildungen und ihre Randbedingungen

Bei Salzspaltungen, die häufig als DIN-Test mit Natriumsulfat (DIN 52111) zur Beurteilung der Salzbeständigkeit sowie der relativen Güte von Materialien simuliert werden, treten Absanden als Hauptschadensbild, Schalenbildung und untergeordnet Risse auf. Den Mechanismus stellen sich verschiedene Autoren (Winkler & Singer, 1972; Winkler, 1973; Arnold, 1981; Hoffmann, 1994, Hoffmann & Grassegger, 1995 u. a.) wie folgt vor: Durch Immissionen, Lösung von Mineralen oder aus anderen Quellen kommt es in Porenlösungen zur Salzanreicherungen. Beim Trocknen treten Übersättigungen und starkes Kristallwachstum auf, die Kristallisationsdrücke bis zu 400 N/mm² entfalten können (Winkler & Singer, 1972). Die Kristallisationen wirken als Sprengdruck auf Mineralbindungen oder schieben sich immer stärker in Kornzwischenräume, bis diese sich aufweiten. Eine große Rolle spielen dabei Hydratationsdrücke, d. h. Mineralphasen, die Wasser einlagern und dabei mit starker Volumenvergrößerung rekristallisieren. Bei einem sehr umfangreichen Salzsprengeexperiment von Hoffmann & Grassegger 1995, wurden nur für hydratisierende Thenardit-Mirabilit-Kristalle Sprengungen bei fünf Gesteinsgefügen (vier davon Bausandsteine aus Baden-Württemberg) gefunden, alle anderen Salze haben nur Poren verstopft; sie führen zu keinem Absanden!

In der Literatur werden weitere Prozesse als ausschlaggebend für die Salzspaltung diskutiert:

- Hydratationsdrücke (Winkler & Wilhelm, 1970 u. a.)
- Lineare Wachstumsdrücke von Kristallen (Winkler & Singer, 1972)
- Osmotische Drücke
- Volumenexpansionen durch Fällungen aus stark übersättigten Lösungen

- Kapillardruckmodelle (Fitzner & Snethlage, 1983)
- Porengeometrisches Modell (Fitzner & Snethlage, 1983)
- Thermische Dilatation der Salzkristalle (Attewell & Taylor in Weiss, 1992)
- Nachweis: das Salz wandert beim Eintrocknen in die kleinen Poren und entwickelt dort bei der Hydratation und Kristallisation starke Aufweitungskräfte (Weiss, 1992).

Tabelle 2

An verschiedenen Bauwerken in Baden-Württemberg identifizierte Salzausblühungen und abgeschätzte Häufigkeit (xxx = sehr häufig, xx = häufig, x = selten) (Grassegger & Schwarz, 2009 – aktualisiert).

Mineralname	chemische Formel	Anzahl der Objekte
Gips	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	xxx
Anhydrit	CaSO_4	x
Hannebachit	$\text{CaSO}_3 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$	x
Ammoniumsulfat	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	xx
Glaserit	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	xx
Syngenit	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \times \text{H}_2\text{O}$	xx
Mirabilit, Thenardit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4	xxx
Picromerit	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	x
K-Ca-Mg-Sulfat	$(\text{K}_2\text{CaMg}(\text{SO}_4)_3)$	x
Epsomit oder Hexahydrat (Magnesiumsulfate)	$\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ oder $\text{MgSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$	xx
Glauberit	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	xxx
Eugsterit	$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$	x
Darapskit	$\text{Na}_3(\text{NO}_3)(\text{SO}_4) \times \text{H}_2\text{O}$	xx
Kaliumnitrat	KNO_3	x
Ammoniumnitrat	NH_4NO_3	x
Nitrokalit	KNO_3	xxx
Nitronatrium	NaNO_3	xx
Calcit	CaCO_3	xxx
Vaterit	CaCO_3	x
Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (Neubildung unklar)	xx
Kochsalz (Halit)	NaCl	x
Carnallit	$\text{KMgCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$	x
Hanksit	$\text{KNa}_{22}\text{Cl}(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_3\text{Cl}$	x
Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	xx
Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$	xx
Thermonatrium	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	xx
Whewellit und andere Oxalate	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \times \text{H}_2\text{O}$ (Oxalat)	x
Nesquehonit x)	$\text{MgCO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$	x
Hydromagnesit x)	$\text{Mg}_5(\text{OH})/(\text{CO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$	x
Natrit x)	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$	x
Nahcolith x)	NaHCO_3 und ähnliche	x

x) bestätigt auch nach Arnold (1981), typische für den Kontakt mit alkalischen Baustoffe

Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass viele offene Fragen existieren und derzeit nicht entschieden werden kann, welches die ausschlaggebenden Faktoren und die besten Modelle für Salzsprengungen sind. An Bauwerken in Baden-Württemberg wurden nachfolgende Salze als Ausblühungen nachgewiesene (Tabelle 2).

3.4 Verschmutzungszonen: Immissionswirkungen und Deposition

Die Frage, welche Anteile dieser Stoffe tatsächlich auf dem Baustoff abgelagert werden – feste (Stäube), flüssige und gasförmige Immissionsstoffe – ist sehr komplex und kann nicht generell beantwortet werden. Faktoren, die die Immissionsbelastung einer Fläche neben der reinen Immissionssituation mitbeeinflussen, sind:

- Neigung der Fläche
- Rauigkeit der Fläche
- chemische Eigenschaften des Substrats (alkalische Baustoffe wirken als starker Absorber)
- Porosität (hoher Wasseraufnahmegrad beschleunigt die Schadstoffaufnahme)
- Wasseraufnahmefähigkeit

- Beregnungshäufigkeit / Art der Beregnung
- kleinklimatische Bedingungen, die wiederum von der Himmelsrichtung und der Bauteilgeometrie abhängen.
- Windgeschwindigkeit
- Exposition des Bauteils etc.

Um die maximale Deposition abschätzen zu können und einen allgemeinen Überblick zu geben, werden einige wichtige Immissionsdaten zusammengestellt: Förstner (1984) beschreibt die Zusammensetzung der sauren Niederschläge als ca. zu 2/3 SO_2 -dominiert. Ihr pH-Wert liegt in der Regel im deutlich sauren Bereich bei ca. 4 – 5 und in Einzelfällen wurden pH-Werte bis zu 3,2 – 3,8 gemessen. Diese pH-Werte mobilisieren weitaus stärker als neutrale Werte die Schwermetallgehalte in Böden und auch anderen Substraten, was bei mangelnder Ca-Pufferkapazität zu merklichen Schwermetallgehalten in Lösungen führt (Ulrich 1984).

Zum Vergleich: Die von Luckat (1972 und 1975) gemessenen Depositionsmengen auf zwei Gesteinen, normiert auf die gleiche Dimension (bis auf den Unterschied der Angaben Flächen- und Raummaß) zeigt Tabelle 4. (Ähnliche Messungen wurden von Brüggerhoff, Laidig & Schneider (1996) fortgeführt.

Tabelle 3

Hochrechnung der maximalen Deposition aus der Luftverunreinigung für verschieden stark belastete Gebiete in Baden-Württemberg (Daten des Landesamtes für Umweltschutz, Datenbasis Oktober und November 1989). Kälbelscheuer (Hochschwarzwald) ist ein Reinluftgebiet und Aalen-Wasserralfingen ist ein ländliches Gebiet.

Komponente	Kälbelscheuer pro Jahr (g/m^3)	Stuttgart-Mitte pro Jahr (g/m^3)	Esslingen pro Jahr (g/m^3)	Aalen-Wasserralfingen pro Jahr (g/m^3)
Staub	nicht gemessen	0,52	2,50	0,95
CO	nicht gemessen	79,48	88,12	55,29
CO ₂	nicht gemessen	15686,70	1474,50	14095,20
NO	0,067	7,37	2,38	3,24
NO ₂	0,017	4,16	0,95	1,21
SO ₂	0,293	0,915	1,05	1,71
O ₃	1,640	0,587	0,69	0,73

Tabelle 4

SO₂-Eintrag im Sinne von Gesamtdeposition (g/m^2) nach Messungen von Luckat (1978, 1981) im Kölner Raum mit der IRMA-Anlage (aufgehängte Steinplättchen).

Exponierte Gesteine	regengeschützt	direkt berechnet
Baumberger Sandstein	0,197	0,011
Krensheimer Muschelkalk	0,080	0,007

Die Schadgasimmissionen und die Staubbelastung werden in Deutschland von den Landesämtern für Umweltschutz mit Hilfe eines vollautomatischen Luftmessnetzes laufend flächendeckend gemessen (z. B. statistische Berichte Umwelt). In der Regel zeichnen sich Ballungsräume als spitzenbelastete Gebiete ab, aber auch einige ländliche Gebiete weisen hohe Immissionsraten auf. Die Stäube werden bei diesen Meßverfahren nur gewichtsmäßig erfasst.

Direkte Messungen der Schadstoff-Eintragsraten an Baustoffen erfolgten quantitativ als erstes durch Luckat (1978, 1981). Er ermittelte mittels IRMA-Anlage (aufgehängte Steinplättchen) an verschiedenen regen-geschützten und -ungeschützten Bausteinen Schadstoffeintrag (Tabelle 4). Der Vergleich mit den Immissionsdaten (aus UBA, UMPLIS, 1989) zeigt, dass im regengeschützten Bereich ca. das 10-fache deponiert wird, gemessen an den berechneten Flächen. Und der Vergleich Gesamtmission (Tabelle 3) zu deponierten Anteilen in Hochbelastungsgebieten zeigt, dass nur ca. 10 – 20 % der SO_2 -Immissionen deponiert werden. Neumann (1994) hat systematisch die Zusammensetzung schwarzer Schmutzkrusten untersucht und im anorganischen Bereich überwiegend eine Bindung durch Gips gefunden.

Für die SO_2 -Aufnahme von Gesteinen aus dem Regen unterscheidet Kraus (1985) horizontale, schwach und stark geneigte und senkrechte Flächen, die am Kölner Dom eine unterschiedliche Verwitterungssystematik und schwankende Sulfatgehalte aufwiesen. Sie folgerte aus den Ergebnissen, dass ca. 50% des Schwefels nicht durch Regen deponiert sein können, was mit obigen Abschätzungen übereinstimmt. Die Immissions-situation in der Nähe von modellhaften Bauwerken wurde in Hamburg von Dannecker und seinen Mitarbeitern gemessen (z. B. Steiger & Dannecker, 1994; Stoffregen, 1991).

Lammel & Metzger (1997) haben im Rahmen des deutsch-französischen Projektes „Stein/Pierre – Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten“ präzise, himmelsrichtungsabhängige Depositionsmessungen an mit 45° Neigung aufgehängten Surrogatflächen am Salemer Münster gemacht. Die Gesamtd deposition aller Verbindungen, trocken wie nass

deponiert, war an der westorientierten Surrogatfläche am höchsten, gefolgt von Ost und nahezu gleichwertig Nord und Süd:

- Beim nassem Eintrag allein überwog die Deposition im Westen mit fast 80 %.
- Die höchste Konzentration aller Ionen besaß SO_4^{2-} mit einer Depositionsrate von bis zu $20 \mu\text{equiv m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Insgesamt konnte Salem aber als wenig belastetes, ländliches Gebiet eingestuft werden.
- Bei der Kohlendioxid-Deposition (gemessen als C-Anteil) überwog der nasse gegenüber dem trockenen Eintrag. Auch hier wurden ca. 80 % auf der Westseite deponiert gefolgt von der Ostseite mit ca. 10 % und nur sehr geringen, annähernd gleichen Anteilen auf Nord und Süd.
- Die Deposition auf der Referenzfläche war in der Regel deutlich höher als auf den an der Kirche exponierten Flächen. Der nass eingetragene Anteil überwog bei weitem, wohingegen bei den himmelsrichtungsabhängigen Flächen der „totale“ (d. h. überwiegend trockene) Eintrag überwog.
- Die in ca. 3 m Höhe aufgestellten Immissions-Kollektoren zeigten die sehr geschützte Bauwerks-situation mit einem Bruchteil der Deposition von normalem, aufgehendem Mauerwerk an.
- Lammel & Metzger (1997) gehen durch parallele Niederschlagsmessungen davon aus, dass vertikalen Flächen nur 1,5 – 3 % der Niederschläge erhalten und weniger als 10 % der Immissionen dort deponiert werden können.

Die petrographischen Ergebnisse zur Verwitterung, die im Rahmen dieses gemeinsamen deutsch-französischen Projektes am Salemer Münster erzielt wurden, gibt Grassegger (1999) wieder.

3.5 Verhalten von Gesteinen bei Feuchte- und Temperatur

Um die Rolle der klimatischen Beeinflussung zu verstehen, sollen die Wasseraufnahmemechanismen und ihre Folgen kurz dargestellt werden (Tabelle 5). Zusätzlich beeinflussen Feuchte- und Temperaturdehnungen die Schadensentwicklung am

Naturstein. Gertis (1987, in einem Vortrag) bezeichnet Wasser als den „Motor“ der Verwitterung, da fast alle Verwitterungsarten ohne das Medium Wasser nicht vorstellbar sind.

Aus diesem Grunde werden bauwerksbezogen die häufigsten Wasserbelastungsarten vorgestellt und gezeigt, in welchen Bereichen Wasser angreift und welcher Mechanismus zum Tragen kommt. Andere klimatische Faktoren, wie Windschliff verbunden

mit Staubtransport, können in geologischen Zeiträumen zu Winderosionen führen (Füchtbauer, 1988; Valetton, 1988). Sie tragen vermutlich kaum zum Verwitterungsverlauf an Bauwerken bei.

Als rein physikalische Transport- und Aufnahme-mechanismen der Feuchte sind drei Prozesse anzusehen: Die kapillare Wasseraufnahme, Sickerströmungen und sorptive Wasseraufnahme durch Wasserdampfdiffusion (Tabelle 5).

Tabelle 5: Temperatur- und Feuchteauswirkungen*) im Gestein, Aufzählung der Einzelfaktoren und ihrer Auswirkungen (s. auch Grassegger, 1988).

Ursachen (klimatische Faktoren)	Auswirkungen im Gestein
Feuchtefaktoren	
Beregnung	<ul style="list-style-type: none"> kapillare Wasseraufnahme im Kapillarporenbereich Sickerströmungen im Grobporen- und Rissbereich
Erhöhte Luftfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> hygroskopische Wasseraufnahme durch Diffusion Feuchte Kondensation in den feinsten Kapillaren (Kapillarkondensation) ggf. Wasserkondensation an kühlen Oberflächenbereichen (Taupunktunterschreitung)
Erniedrigte Luftfeuchte	<ul style="list-style-type: none"> Trocknung Bildung von Ausblühungen Verschiebung von Ausblühungs zonen
Zusätzliche Veränderungen, unabhängig vom Aufnahme-mechanismus	<ul style="list-style-type: none"> hygrische Dehnungen Quellungen von quellfähigen Anteilen im Gestein erhöhte Lösung von Bestandteilen und alle Prozessumkehrungen bei Trocknung
Thermische Faktoren	
Temperaturerhöhung	<ul style="list-style-type: none"> thermische Materialdehnung u.U. verstärkte Trocknung Entwässerung von Salzen mit Hydratwasser
Temperaturerniedrigung	<ul style="list-style-type: none"> „Kontraktion“ des Materials Gefrierprozesse der Porenflüssigkeit
Frost/Tau-Wechsel *)	<ul style="list-style-type: none"> Frost/Tau-Beanspruchung (mit starken zonaren und poren-abhängigen Eissprengereffekten)
Frost-/Tausalz-Wechsel *)	<ul style="list-style-type: none"> bei hohen Salzgehalten zusätzlich: Frost/Tausalzbeanspruchungen (mit einer Veränderung der obigen Prozesse) Man geht von einem dreischichtigen Gefrierprozess aus: <ol style="list-style-type: none"> Gefrieren der tiefsten, durchnässten salzarmen Lage 3, ca. bei 0°C Gefrieren der unmittelbaren Oberflächenzone wegen der stärksten Unterkühlung, auch bei erhöhten Salzgehalten Gefrierprozess der mittleren, stark salzbelasteten Schicht bei sehr tiefen Temperaturen (bei Kochsalzstreuung maximale Gefrierpunkterniedrigung auf -22°C)
Sehr schnelle Temperaturwechsel	<ul style="list-style-type: none"> starke Spannungszustände im Gestein, z. T. schichtartig unterschiedliche Temperaturverläufe

*) gekoppelte Feuchte-Temperaturprozesse, siehe auch Kießl (1983), Möller (1993) und Künzel (1994); dort liegen auch quantitative Aussagen zu den gekoppelten Prozessen vor.

Die Art und Menge der Wasseraufnahme an Bauwerken wird durch die Art des Feuchteangebotes als direkte Beregnung (oder Flüssigkeitsangebot allgemein) oder als Wasserdampf-Aufnahme geregelt (Tabelle 5).

So sind die Haupteinflussfaktoren auf den Naturstein das Klima mit der Beregnungsdauer und -art und den luftklimatischen Verhältnissen – Temperatur und Luftfeuchte.

Von größter Wichtigkeit für die Verwitterung von Naturstein ist hierbei die anschließende Verknüpfung der Faktoren:

- welche Bauwerksposition wird
- innerhalb welcher Zeiträume
- mit wieviel Regen/Feuchte belastet
- und welche Trocknungsbedingungen ergeben sich aus den lokalen klimatischen Einzelfaktoren, sodass ein Dauerfeuchtezustand im Stein erreicht wird.

4 Frühere Restaurierungsmaßnahmen

Eine erste große Steinkonservierungsmaßnahme in enger Zusammenarbeit mit Naturwissenschaftlern war die Arbeit an den Parler-Portalen am Münster in Schwäbisch Gmünd. Dabei ging es nicht nur um die Konservierung des Natursteinmaterials sondern auch um die Konservierung der originalen Farbfassung. In Schwäbisch Gmünd wurden erstmals für Baden-Württemberg Methoden der Untersuchung, in der Umsetzung der Maßnahmen sowie neue Materialien eingesetzt, die bis heute ihre Gültigkeit haben und Anwendung finden. So wurden hier Festigungsmaterialien gezielt nur in entfestigte Zonen eingebracht und im größeren

Ausmaß kieselensäureester-gebundene Kittmassen eingesetzt. Auch die Einsetzung eines Experten-gremiums im Vorfeld und in der ständigen Begleitung der Maßnahme ist hier erstmalig erfolgt.

Backoffengruppe in Bad Wimpfen

Diese Kreuzigungsgruppe aus Ettringer Tuff war durch mehrere Maßnahmen seit dem 19. Jh. sehr stark geschädigt. Enorme Belastungen an Schadenssalzen waren durch die chemische Abnahme der Fassungen, durch die Verunreinigung durch Vogelkot und die Exposition vorhanden. Die notwendige Salzreduktion konnte trotz der hohen Wasserlöslichkeit des Tuffs durch exakt vorkonditioniertes Wasser erfolgen. Dabei konnte auf das Forschungsvorhaben zum Tuffstein zurückgegriffen werden. Für die Festigung gab es erstmals eine eigens dafür vorgenommene Modifizierung durch den Hersteller.

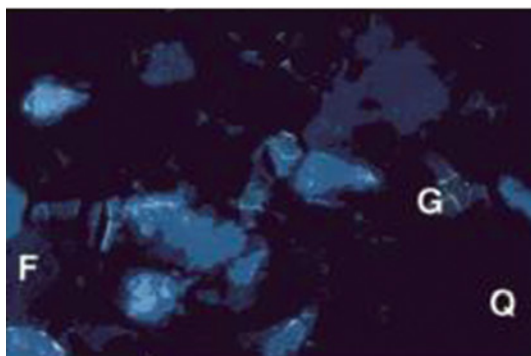
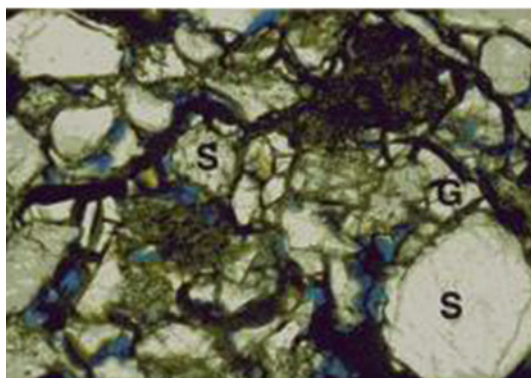
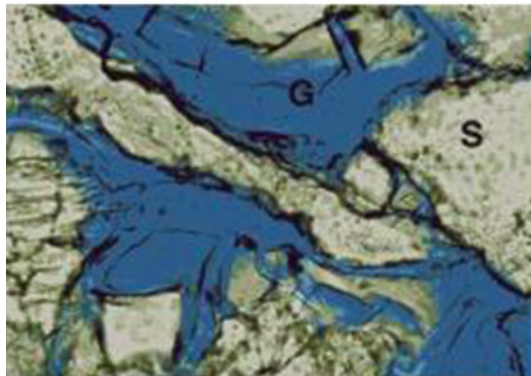
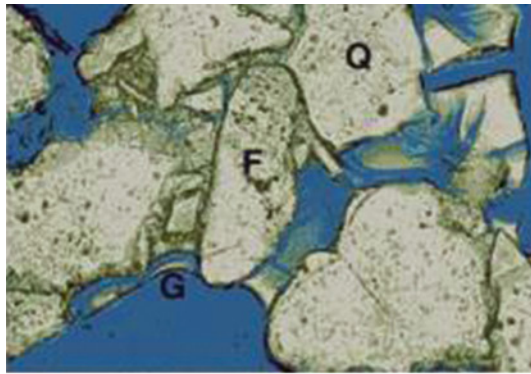
Ein einzigartiger Fall kam durch eine Acrylharztränkung und mangelhafte Unterbringung des Objektes auf die Denkmalpflege zu. Das **Hatzfeldgrabmal in der Bergkirche in Laudenbach**, welches vom Bildhauer Kern aus Forchtenberg um 1600 entstand, war komplett aus Alabaster gefertigt. Leider erst im Nachgang zur Tränkung konnte die Leidensgeschichte des Objektes durch viele wohlgemeinte Maßnahmen rekonstruiert werden. So konnten die vielen eingebrachten Stoffe nicht bei der Entscheidung zur Volltränke berücksichtigt werden und es musste, da die Neuaufstellung in einem nicht isolierten, unklimateisierten Bau erfolgte, zwangsläufig zu den enormen Schäden kommen. Langwierige Untersuchungen zu dem Schadensmechanismus und den möglichen Konservierungsmaterialien führten erst Jahre später zur erfolgreichen Konservierung und Restaurierung. Flankierende Maßnahmen am Aufstellungsort sichern nun langfristig den Erfolg der Erhaltungsmaßnahme. Dieser Fall ist ein wichtiges Beispiel für die große Bedeutung einer Dokumentation, die natürlich auch vor Beginn einer erneuten Maßnahme zu berücksichtigen ist.

Eine in Baden-Württemberg einzigartige großflächige Anwendung von mit Epoxidharz gebundenem Mörtel erfolgte in **Rottweil am dortigen Münster**. Die Fassade, die in der Fläche aus Stubensandstein und in den Gliederungen mit

Schilfsandsteinen gestaltet wurde, war besonders in den Bereichen der Fugen stark rückgewittert. Die häufige Erneuerung der äußeren Fugen durch zu harten, zementhaltigen Mörtel hatte zu trichterförmigen Vergrößerungen der ehemals engen Fugen geführt. Dadurch war das Erscheinungsbild der steinsichtigen Werksteinfassade empfindlich gestört. Um das Bild der durch exakte Fugen geprägten Flächen wieder sichtbar zu machen, erfolgte eine Reprofilierung der einzelnen Steinquader durch einen eigens konzipierten epoxidharzgebundenen Mörtel. Die intensiven naturwissenschaftlichen Recherchen und Vorversuche erbrachten sichere Erkenntnisse zu der Stabilität der Mörtel auch hinsichtlich einer möglichen Gefährdung durch UV-Licht. Auch heute, 20 Jahre später, haben sich die mit Epoxidharz gebundenen Mörtel gut erhalten und zeigen keine wesentlichen Veränderungen. Trotz dieses Erfolgs bleibt der Einsatz sehr begrenzt, da die Entwicklungen im Bereich der auf null auslaufend einsetzbaren Mörtel heute neue, einfachere Möglichkeiten bietet.

4.1 Steinfestigungen

Es gab im wesentlichen nur KSE der Fa. Wacker, der Fa. Goldschmidt und der Fa. Dynamit Nobel (Beispiele als Versuche von Luckat in Köln am Dom). Es wurde viel mit KSE (Wacker OH) und auch den Kombiprodukten Wacker H gefestigt und gleichzeitig hydrophobiert. Die allgemeine Meinung war: man muss sehr achtgeben, sonst macht Wacker OH die gefestigten Bereiche zu steif. Chemisch war damals keinerlei Modifizierung des KSE möglich. Maximal wurde der KSE OH mit Lösemitteln verdünnt. Es war auch häufig zu beobachten, dass es keine gleichbleibende Produktqualität gab. So schwankten damals durchaus die Festigkeitsgehalte des KSE und die Maßnahmen führten zu unterschiedlichen Teilergebnissen. Als Beispiel der neuen Sichtbarmachung für die vielen Maßnahmen in Baden-Württemberg seien die Bilder 1 a – d gezeigt, die darlegen, dass die Festigung nur eine partielle „Verklebung“ der „Sandstein-Körner“ erreichen kann und soll. Dies förderte zwangsläufig auch die große Aversion gegen „chemische Mittel“ in der Instandsetzung bis hin zur völligen Ablehnung. Jede fehlgeschlagene Konservierung wurde



Bilder 1 a–d

Typische Gele von klassischen KSE-Festigern in Poren.

a) zeigt die gefestigten Gefüge von Schilfsandstein, wobei G = KSE Gele sind, F = Feldspäte, Q = Quarz und der Porenraum blau gefärbt wurde;

b) andere Stelle im Schilfsandstein, gefestigt; c) dichtes Sandsteingefüge gefestigt, alle Bezeichnungen wie oben;

d) zeigt eine Kathodolumineszenzaufnahme der Minerale von c: die KSE-Gele selbst waren durch rosa-braune Lumineszenz z. T. erkennbar (Grassegger u Adam, 1992).

den Produkten angelastet und die Nachricht darüber verbreitete sich rasend schnell, ohne dass kritisch reflektierend nach den eigentlichen Ursachen geforscht wurde.

Leider sind viele Maßnahmen aus den frühen Jahren nicht ausreichend dokumentiert worden. Es fehlen meist präzise Angaben über Art und Menge der verwendeten Produkte oder gar die Nennung der Produkte. Ab und an werden die Konservierungs- oder Reinigungsmittel nur mit dem Produktnamen erwähnt. Da das Produkt nicht mehr im Handel ist, kann man kaum noch ermitteln, was es eigentlich war. Vielfach musste bei Recherchen auch festgestellt werden, dass sich in den Archiven zwar die Planung erhalten hat, aber die tatsächlich durchgeführten Maßnahmen nicht niedergeschrieben wurden. Ein Monitoring einer solchen Maßnahme ist dadurch fast nicht durchführbar, auch weil sie zu aufwendig wäre.

Erst im Laufe der Jahre kam auch die Modifizierung beim Einbringen des Festigers vom großflächigen Fluten hin zur gezielten kleinteiligen Einbringung und zur intensiven Applikation über Kompressen. Dabei kam auch den Hochschulen, die vermehrt nun auch Steinrestauratoren ausbildeten, eine große Rolle zu. Die Denkmalpflege unterstützte durch Themennennung und Vermittlung geeigneter Objekte die Findung von Diplomthemen, die sehr nah an der Praxis angelagert waren; eine Situation, von der die gesamte Denkmalpflege profitierte, aber auch das freiberuflich tätige Partnerfeld sowie die beteiligten naturwissenschaftlichen Institute und Labore. So entstanden Arbeiten zur Konservierungsproblematik bestimmter Natursteintypen, aber auch Arbeiten zu Anwendungsmöglichkeiten bestimmter Konservierungsstoffe. Zug um Zug konnten somit immer mehr Erfahrungen für die Steinkonservierung und Restaurierung gesammelt werden und flossen in neue Aufgaben in der Denkmalpflege ein.

Die heute übliche Vorgehensweise der Schadensaufnahme, der Schadensursachenforschung (Untersuchung) und der daraus entwickelten Maßnahmen hat sich auf diese Weise herausgebildet. Begleitet durch eine umfassende Dokumentation

aller Untersuchungen und Anwendungen trägt dies zur Qualitätssicherung in der Restaurierung bei. In heutiger Zeit sollte auch vermehrt ein regelmäßiges Monitoring dazu kommen. Dazu erschien im Rahmen eines von der DBU geförderten Forschungsvorhabens ein Leitfaden, der hilfreiche Hinweise zur Nachkontrolle und Wartung aufzeigt (Auras, Meinhardt, Snethlage, Leitfaden Naturstein-Monitoring und Naturstein-Konservierung) und später eine Übersicht zum Stand der Kenntnisse durch: Patitz, Grassegger & Wölbert (2014).

4.2 Schalenverfestigungen und Hinterspritzungen

Schalenverfestigungen und Hinterspritzungen waren häufig nicht möglich. Besonders bei einigen Gutachtern wurde immer „bis zum gesunden Kern ...“ abgeschlagen und ggf. vorgeblendet. Es wurden auch keine Tiefenprofile des Festigkeitsverlustes behutsam gemessen, sondern ggf. 5–10 cm dicke Bohrkern entnommen und mechanisch geprüft. Dies war z. T. jedoch gar nicht möglich, da bei der Messungspräparation die weichen Teile alle zerfielen.

4.3 Rissverklebungen

Rissverklebungen waren häufig nicht möglich. Es gab noch wenig geringfeste Rissverschlüsse z. B. KSE-gebundene Injektionen oder weiche Anstragungen. Deshalb wurde bei oberflächenparallelen Rissen eine Schutzschlämme aufgetragen, belassen oder abgenommen.

4.4 Salzbehandlungen und Ausblühungen

Es war völlig klar, dass diese unerwünscht sind, aber da man nicht wusste, wie damit umzugehen ist, wurden sie meist trocken abgenommen. Und bei allen Salzen, außer natürlich bei Nitraten, wurden die Restsalze mit Bleihexafluorsilikat (PbSiF_6) behandelt. Viele Zusammenhänge des Kapillartansportes und der Feuchtegewichte waren unbekannt.

4.5 Hydrophobierungen

Sie wurden als sehr positive Abschlussmaßnahme für alle Steinrestaurierungen angesehen. Es wurde sehr viel hydrophobiert. Man glaubte an die hohe Wirksamkeit und eine Dauerhaftigkeit von ca. 15 bis 20 Jahren der Hydrophobierungsschichten. Man glaubte auch – meist ohne Nachprüfung, dass die Hydrophobie sich überall gut und gleichmäßig entwickelt.

4.6 Steinaustausch

Es wurde häufig gedacht: Wenn etwas vor Ort verwittert, muss es mit dem bestmöglichen Material ausgetauscht werden. Dies führte zu zahlreichen Muschelkalkaustauschungen in Sandsteinmauerwerken. Beispiele Frauenkirche/Esslingen, Heilig-Kreuz-Münster/Schwäbisch Gmünd. Erst später erkannte man die negativen Wechselwirkungen zwischen den Gesteinen.

4.7 Verfugungen und Fugenmörtel

Das Standardverfahren war, entweder möglichst guten Zementmörtel zu nehmen oder der sehr weiche Traßmörtel wegen der langen „Nacherhärtung“ das Verfahren der Wahl. Von der Spannungsseite in den Mauerwerken und den Reaktionsmöglichkeiten der Mörtel mit den Steinen war wenig bekannt.

4.8 Reinigungen

An Bauwerken wurde relativ grob und sehr früh gereinigt. Was dabei abfiel, wurde als positiv und „unrettbar“ angesehen. Die Verfahren waren: Dampfstrahlen, Wasserberieselung, Abbürsten mit Metallbürsten etc.

Im skulpturalen Bereich wurde kaum gereinigt, im Gegenteil, man war häufig der Auffassung, die „Patina ... würde eine Schutzschicht gegen weitere Verwitterung bilden ... und man müsste sie erhalten“.

5 Zusammenfassung

Da die allgemeine Sichtweise zum Steinzerfall ab ca. 2000 schon in groben Zügen dem heutigen Stand entsprach (mehrere BMFT-, BMBF-, DFG- etc. Großforschungsprojekte waren gelaufen), lag der Schwerpunkt der Entwicklungen 1990 – 2019 auf den Konservierungsmethoden. (Im Detail finden natürlich laufend Entwicklungen bei der Erforschung des Steinzerfalls und besonders bei der Rolle der Salze, Salzsprengungen und Bildung von Salzen statt). Es wurden nur die „Konservierungsmaßnahmen“ stark weiterentwickelt und differenziert.

Literatur und weitere Quellen

1 Zum Teil: frühere Steinkonservierung

- Deutsche Kunst- und Denkmalpflege 1973, 31, (Dieser Band enthält einen zusammenfassenden Bericht über die Situation der Steinrestaurierung in Deutschland und verschiedene Beiträge zu Einzelfragen sowie eine Bibliographie der deutschsprachigen Literatur zur Verwitterung und Konservierung natürlicher Bausteine. So bildet dieser Band eine Bilanz des damaligen Kenntnisstandes)
- Oel, H. J. (Hrsg.) (1978): Kolloquium über Steinkonservierung, Münster 1978, 25.–27.9.78.
- Oel, H. (Hrsg.) (1984): Kolloquium über Steinkonservierung, 9.–11.4, 1984, in Münster 1984.
- Wihr, Rolf und Snethlage, Rolf (1979): Steinkonservierung – Zur Erhaltung von Flurdenkmälern. Kolloquium über das Acrylharz-Volltränkungsverfahren. In: Arbeitsheft 4 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, München 1979.
- Wihr, Rolf (1980): Restaurierung von Steindenkmälern, München 1980, Callwey Verlag, 229 S.
- Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.), Arbeitsheft 11: Das Salemer Münster, Befunddokumentation und Bestandssicherung an Fassaden und Dachwerk.
- Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.), Arbeitsheft 13: Parlerbauten – Architektur, Skulptur, Restaurierung; Internationales Parler-Symposium Schwäbisch Gmünd 17.–19. Juli 2001
- Snethlage, R. (1984): Sandsteinkonservierung 1979 – 1983, Arbeitshefte des Bayr. Landesamts für Denkmalpflege, Heft 22, München.

Snethlage, R. (1985): Zum Kenntnisstand von Verwitterungsvorgängen an Naturstein. Arbeitshefte des Bayr. Landesamts f. Denkmalpf., Heft 31.

2 Literaturverzeichnis – zum Steinzerfall und zu wissenschaftlichen Konservierungsuntersuchungen

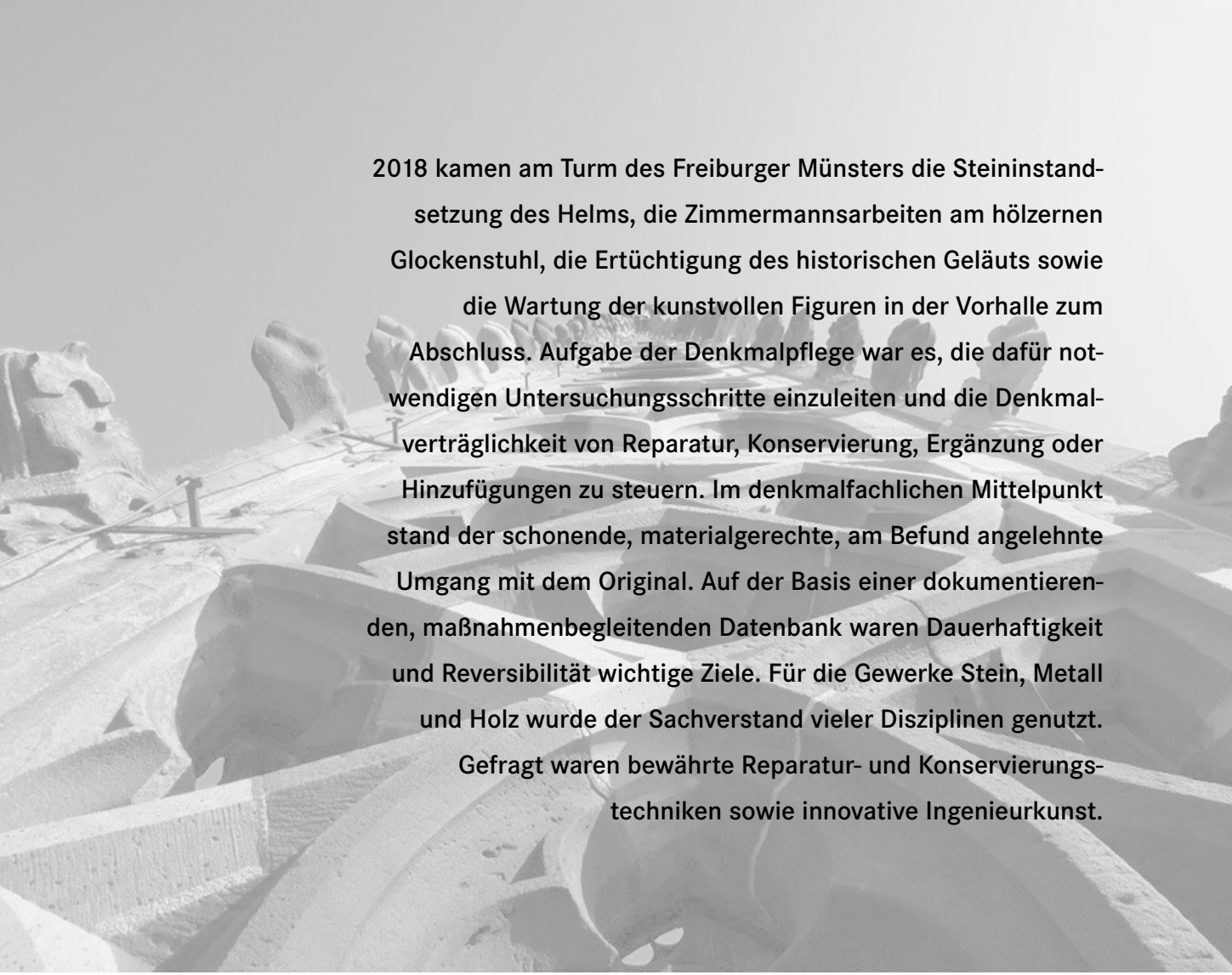
- Arnold, A. (1981): Salzsysteme in Mauerwerken. In: Oel, H. (Hrsg.), Sitzung des Arbeitskreises „Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein“, S. 20 – 47, Dortmund.
- Attewell, P. B. & Taylor, D. (1988): Time-dependent Atmospheric Degradation of Building Stone in a Polluting Environment. In: Marinos & Koukis (eds.): Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and historical Sites, S. 739 – 753, Rotterdam.
- Auras, Meinhardt, Snethlage: Leitfaden Naturstein-Monitoring und Naturstein-Konservierung
- Blaschke, R. (1987): Schleimbildende Mikroorganismen und nitrifizierende Bakterien als Helfer, Gipsbildungen in Naturstein. Bautenschutz & Bausanierung, Sonderheft „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“, 1. Statusseminar des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, 17.–18.12. 1986 in Mainz, S. 38 – 42, B. & B. Verlag, Biersbrunn.
- Blaschke, R. & Jüling, (1992): Ein Jahr analytische Baustoffmikroskopie vor Ort (Hilfestellung für Diagnose und Therapie). Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, S. 2 – 1990, 295 – 315, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Brüggerhoff, S., Laidig, G. & Schneider, J. (1996): Environmental Monitoring with natural Stone Sensors. In: Riederer, J. (ed.): 8th International congress on Deterioration and conservation of stone, Berlin, Proc., S. 861 – 869.
- Fitzner, B. & Snethlage, R. (1983): Modellvorstellungen zum Kristallisations- und Hydratationsdruck von Salzen im Porenraum von Sandsteinen. In Oel, H.J. (Hrsg.): Arbeitskreis „Naturwiss. Forschung an Kunstgütern aus Stein“ Sitzungsber. 1983, Inst. f. Werkstoffwiss., Erlangen, S. 6 – 19.
- Förstner, U. (1984): Freisetzung schädlicher Metallverbindungen aus Sedimenten, In: Merian, E. (Hrsg.): Metalle in der Umwelt – Verteilung, Analytik und biologische Relevanz, S. 171 – 180, Verlag Chemie, Weinheim.
- Füchtbauer, H. (1988) (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine, Sediment-Petrologie Teil II, Schweitzerbart'sche Verlagsanstalt, Stuttgart.

- Gertis, K. A. (1987): Steinerstörung aus bauphysikalischer Sicht. Ist mangelhafter Regenschutz schuld? Bautenschutz & Bausanierung, Sonderheft Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege (Status Seminar in Mainz, 17. und 18. Dez. 1986), S. 95 – 99.
- Grassegger, G. (1988): Natursteine an Baudenkmalen. Stand der Kenntnisse über Zerstörungsvorgänge und Sanierungsmethoden. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, Nachrichtenblatt des Landesdenkmalamtes, Heft 1/1988, S. 13 – 24.
- Grassegger, G. & Mausfeld, S. A. (1991): Qualitative Modellierung der Wechselbeziehungen bei der physikalischen und chemischen Verwitterung von Sandsteinen unter Bauwerksbedingungen.- Eine Diskussionsanregung. In: Denkmalpflege und Naturwissenschaft im Gespräch, Workshop in Fulda am 6./7. März 1990, Sonderheft, „Steinerfall – Steinkonservierung“, S. 101 – 103.
- Grassegger G., Adam, S. (1992): Charakterisierung der Gel-Strukturen von Kieselsäureester-Steinfestigern unter verschiedenen Erhärtingsbedingungen mittels thermoanalytischer Methoden (DTA/TG). In: R. Snethlage (Hrsg.). Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung, Band 2 – 1990, Verlag Ernst & Sohn, S. 179 – 185.
- Grassegger, G. (1999): Der Feuchtezyklus und die Verwitterung des Molassesandsteins am Salemer Münster: ein interdisziplinärer Ansatz zur Immission, Grundfeuchte, Feuchte- und Salzwanderung und Gesteinsschädigung im Mauerwerk. In: Filtz J.-F. (Hrsg.): Proceedings des Abschlußkolloquiums in Straßbourg, 25.-26.2.1997, „Conservation Commune d'un Patrimoine commun – Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten“, Dt.-franz. Forschungsprogramm für die Erhaltung von Baudenkmalern.
- Grassegger, G. & Schwarz, H.-J. (2009): Salze und Salzsäuren an Bauwerken, DBU Publikation Salzsäuren (2009), S. 1 – 16. Hrsg.: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Grimm, W.-D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Bayr. Landesamt für Denkmalpf., Arbeitsheft Nr. 50, 255 S. und 200 Bildtafeln, München.
- Hoffmann, L. (1994): Untersuchungen zur Ursache des Salzsprengphänomens an Bausteinen. Heidelberger Geowiss. Abh. Bd. 72, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, 217 S.
- Hoffmann, L. & Grassegger, G. (1995): Salzsprengeffekte an Naturbausteinen mit verschiedenen umweltrelevanten Salzen. In: Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten, 24. Jahrestagung der GUS, 22.-24. März 1995, Pfinztal/Karlsruhe, V23-1 bis 23-13.
- Kießl, K. (1983): Kapillarer und dampfförmiger Feuchte-transport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Diss. a. d. Universität-GHS Essen, Fachbereich Bauwesen, 124 S. und Anh.
- Kraus, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. Diss. FB Geowiss. der Univ. Köln, 203 S.
- Künzel, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, 104 S. und 43 Abb., Diss. an dem FB Bauingenieurwesen der Univ. Stuttgart.
- Lammel, G. & Metzger, G. (1997): Pollutant Fluxes onto the facades of a historical monument, Atmos. Environment, Vol. 31, No. 15, pp. 2249–2259, 1997, Elsevier Science Ltd.
- Lukat, S. (1972): Ein Verfahren zur Bestimmung der Immissionsrate gasförmiger Komponenten, in: Staub-Reinerhaltung der Luft, 32, S. 484 – 486.
- Lukat, S. (1975): Stone deterioration at the Cologne Cathedral due to air pollution. -The conservation of stone, 1, Proc. Int. Symp. Bologna, 37 – 43.
- Möller, U. (1993): Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen. Diss. Fb Bauingenieurwesen, Univ. Stuttgart (Institut für Bauphysik), 85 S. plus Anhang.
- Neumann, H.-H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. Diss. Inst. f. Anorg. u. Angew. Chemie, Univ. Hamburg, Schriftenreihe Angewandte Analytik, 24, Dannecker, W. (Hrsg.) 178 S., Hamburg.
- Patitz, G., Grassegger, G. & Wölbert, O. (Hrsg.) 2014: Natursteinbauwerke: Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen. Arbeitsheft Nr. 29 des Landesamtes für Denkmalpflege, Baden-Württemberg, IRB-Fraunhofer Verlag und Theiss Verlag/Stuttgart sowie E-Book, 310 S., (Theiss Verlag, 2015).
- Steiger, M. & Dannecker, W. (1994): Determination of wet and dry deposition of atmospheric Pollutants on building stones by field exposure experiments. In: III Int. Symposium on the Conservation of Monuments

- in the Mediterranean Basin, Fassina, V. (ed.); Venice 22-25 giugno 1994, p. 171 – 178.
- Stoffregen, J. (1991): Charakterisierung der Immissions-situation von Kulturbauten und Gesteinsprüfkörpern in verschiedenen Orten Deutschlands mit Hilfe mobiler und stationärer Meßstationen, Doktorarbeit, Fb Chemie der Universität Hamburg.
- UBA, (Umweltbundesamt) (Hrsg.) (1989): Daten zur Umwelt 1988/89, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Ulrich, B. (1984): Deposition von Säure und Schwermetallen aus Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen, In: Merian, E. (Hrsg.): Metalle in der Umwelt-Verteilung, Analytik und biologische Relevanz, S. 163 – 170, Verlag Chemie, Weinheim.
- Valeton, I. (1988): Verwitterung und Verwitterungslagerstätten, In: Füchtbauer, H. (1988) (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine, Sediment-Petrologie Teil II, S. 11 – 68, Schweitzerbart'sche Verlagsanstalt, Stuttgart.
- Warscheid, Th., Petersen, K. & Krumbein, W. E. (1989): Die Besiedlung unterschiedlicher Sandsteine durch chemoorganotrophe Bakterien und deren Einfluß auf den Prozeß der Gesteinszerstörung, Z. dt. geol. Ges., 140, S. 209 – 217.
- Warscheid, Th. & Krumbein, W.E. (1994): Biodeteriorationsprozesse an anorganischen Werkstoffen und mögliche Gegenmaßnahmen. Werkstoffe und Korrosion 45, S. 105 – 113.
- Weiss, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkung auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter, Münchner Geowiss. Abh., Reihe B, Heft 9, 118 S. (und Diss. FB Geologie, LMU München)
- Winkler, E. M. & Wilhelm, E.J. (1970): Salt burst by hydration pressures in architectural stone in urban atmosphere. Geol. Soc. American Bull., 81; p. 567 – 572.
- Winkler, E. M. (1973): Stone: Properties, Durability in Man's Environment, Technische Mineralogie Serie 4, Springer Verlag, Wien, New York, Heidelberg, 230 S.
- DIN 52 111 DIN 52 111, 1990-03-00: Prüfung von Natursteinen und Gesteinskörnungen; Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat, 5 S. (1996 zurückgezogen und ersetzt)

Baustelle Münsterturm Freiburg – Denkmalpflegerische Zielsetzung

von Dagmar Zimdars



2018 kamen am Turm des Freiburger Münsters die Steininstandsetzung des Helms, die Zimmermannsarbeiten am hölzernen Glockenstuhl, die Ertüchtigung des historischen Geläuts sowie die Wartung der kunstvollen Figuren in der Vorhalle zum Abschluss. Aufgabe der Denkmalpflege war es, die dafür notwendigen Untersuchungsschritte einzuleiten und die Denkmalverträglichkeit von Reparatur, Konservierung, Ergänzung oder Hinzufügungen zu steuern. Im denkmalfachlichen Mittelpunkt stand der schonende, materialgerechte, am Befund angelehnte Umgang mit dem Original. Auf der Basis einer dokumentierenden, maßnahmenbegleitenden Datenbank waren Dauerhaftigkeit und Reversibilität wichtige Ziele. Für die Gewerke Stein, Metall und Holz wurde der Sachverstand vieler Disziplinen genutzt. Gefragt waren bewährte Reparatur- und Konservierungstechniken sowie innovative Ingenieurkunst.

KULTURGUT



Steinfigur
Münster Unserer Lieben Frau,
Freiburg
Eines von mehr
als 3600 geförderten
Denkmälern.



DEUTSCHE STIFTUNG
DENKMALSCHUTZ

25
JAHRE

Wir bauen auf Kultur.

Spendenkonto 305 555 500 · BLZ 380 400 07 · www.denkmalschutz.de

1 Baustelle-Kunstwerk

Das Freiburger Münster ist ein bedeutender Denkmalort. Es ist einer der herausragenden gotischen Bauten des deutschen Sprachraums und es zählt zu den großartigsten Baudenkmalen Baden-Württembergs [1,7]. Bei den Ortsterminen am Münsterturm war es immer wieder neu faszinierend, den Weg auf und in den Helm zurückzulegen. Sei es mit dem Arbeitsaufzug entlang der Turmnordwand, sei es zu Fuß im Innern oder über die Stege der Außengerüste. Höhepunkt dieser Begehungen war das Durchklettern der Maßwerke beim Wechsel vom Außen- zum Innengerüst oder umgekehrt. Höhepunkt deshalb, weil die von unten so filigran wirkenden gotischen Maßwerke aus der Nähe auf einmal dickleibig, massiv und ungeheuer monumental wirkten; Steine pur, kunstvolle Artefakte. Dieser überaus attraktive Arbeitsplatz in luftiger Höhe ist seit 2018 geräumt (Bild 1).

Die jüngsten Kampagnen am Turm der Kathedrale bieten die Gelegenheit, die denkmalfachlichen Leitlinien und Methoden zu Maßnahmen an Stein, Holz und Metall in einer Gesamtschau vorzustellen. Die Landesdenkmalpflege betreut das Münster gemeinsam mit der Münsterbauhütte Freiburg und dem erzbischöflichen Bauamt. Es ist wichtig, den baulichen Kontext, in dem sich die verbauten Steine befinden, gesamthaft vor Augen zu führen. Insbesondere auch deshalb, weil in Freiburg traditionell das erzbischöfliche Bauamt sich nur um das Innere des Münsters kümmert, die Bauhütte nur um das Äußere, die Landesdenkmalpflege aber, genauso wie in Ulm, um das Kulturdenkmal insgesamt (Bild 2).

Im Jahr 2018 gab es ein großartiges „Turmfinale“! Kommentar eines geistlichen Mitglieds des Münsterbaukomitees: „In den vergangenen Jahren gerie-

Bild 1

Einer der Hl. Drei Könige aus der Freiburger Vorhalle als Werbeträger der Deutschen Stiftung Denkmalschutz Bonn

Bild 2

Historische Münsterwidmung auf dem Schlossberg „Man sehe das Münster von Abend gegen Morgen erbauet.“

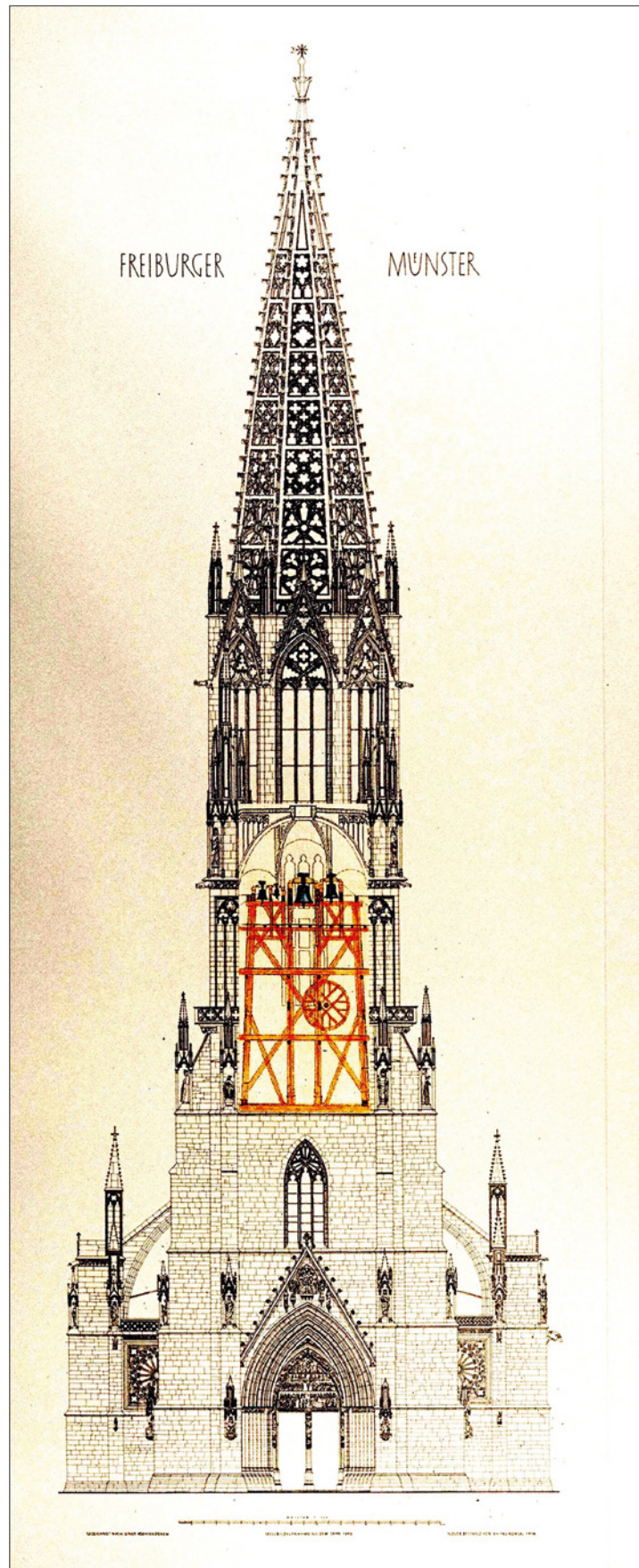


ten Langhaus und Chor des Münsters im Vergleich zum Turmbauwerk quasi zu Nebenräumen.“ Zur Baustelle Münsterturm Freiburg gehörte der Turm aus Stein, der hölzerne Glockenstuhl, die Glocken aus Metall und die Turmvorhalle, in der die gotischen Skulpturen stehen. Für alle genannten Bauteile galten die denkmalpflegerische Vorgehensweise, die Konzepte, Methoden und Standards gleichermaßen. Die an diesem Monument jeweils gefundenen Lösungen für die Gewerke Stein, Holz und Metall haben denkmalfachlich Beispielcharakter und Leuchtturmwirkung.

Das Glockengeschoss unter dem Turmhelm birgt den monumentalen, für die Datierung des Turms so wertvollen hölzernen Glockenstuhl. Dessen bereits über Jahre andauernde zimmermannsmäßige Reparatur kam 2018 zum Abschluss. Es sei nebenbei erwähnt, dass 1889 hochrangige Gutachter vorschlugen: „... es möge der hölzerne Glockenstuhl durch einen eisernen sobald als möglich ersetzt werden ...“ [5]. Brandschutzgründe waren damals der Anlass für diese radikale Empfehlung. Brandschutzauflagen dieser Art können Konservatoren auch heute noch, im wahrsten Sinne des Worts, zur Weißglut bringen. Im November 2018 wurden parallel dazu die Ertüchtigungen am historischen Geläute des Münsters zu Ende geführt. Anlass für diese Eingriffe war das Gefährdungspotential abstürzender Klöppel sowie die in der Fachwelt viel diskutierte präventive Initiative, alle Klöppel zum Schutz der Klangdenkmale auszutauschen (Bild 3).

Und nicht zuletzt wurde 2018 die seit vielen Jahren von der Denkmalpflege angemahnte Wartung der 2005 restaurierten Turmvorhalle mit dem wunderbaren Skulpturenbestand im Sinne eines Monitoring endlich realisiert [2].

Bild 3
Visualisierung des Glockenstuhls nach einer Kollage des Erzbischöflichen Bauamtes



2 Denkmalfachliche Grundsätze

Der Münsterturm ist ein sich veränderndes Fragment. Aber, so wie es gerade ist, ist es eben immer auch das Original, von dem auszugehen ist. Der Denkmalpflege geht es darum, geschichtliche Veränderungsprozesse am Denkmal zu verstehen, diese auch längerfristig ablesbar zu halten und dann, falls erforderlich, Veränderungen anzudeuten, zuzulassen und mit zu begleiten. Die Landesdenkmalpflege hat ebenso den Auftrag, ihr Wissen der interessierten Öffentlichkeit zu vermitteln. Dazu gehört das Werben um Verständnis für Grundlagenforschung, für Dokumentationen oder das Vermitteln einer nachhaltig ausgerichteten Restaurierungskampagne. Sie ermutigt die unterschiedlichsten Partner, sich auf der Denkmalbaustelle ungewöhnlichen Herausforderungen zu stellen. Sie tritt ein für Werkgerechtigkeit und zielt auf angemessene technische Lösungen im Detail. Damit dies nicht im stillen Kämmerlein der Denkmalpflege allein passiert, wurde für die Turmbaustelle immer wieder der Austausch mit Kunsthistorikern, Universitäten, Forschungsinstitutionen und Bauhütten gesucht (Bild 4).

In diesem Zusammenhang ist beispielsweise der bahnbrechende Einsatz für die kostenintensive Erstellung eines 3-D-Kartierungsmodells für den Freiburger Turmhelm hervorzuheben. Eingerichtet und finanziert wurde eine Datenbank (Access mit CAD-System verknüpft), die im Landesamt für Denkmalpflege (LAD) vorgehalten und regelmäßig fortzuschreiben sein wird. Sie fand und findet beim planenden Statiker, im LAD und der Münsterbauhütte Verwendung. Während der jüngst abgeschlossenen und bei künftigen Instandsetzungsmaßnahmen hält diese Datenbank auf jeden einzelnen Stein bezogene Informationen vor wie etwa Zeitstellung, Steinvarietät, Schadenssituation und durchgeführte Maßnahmen. Sie stellt diese in Flächen- und Raumgrößen, Fotos, Plänen und 3-D-Darstellungen zur Verfügung. Mit ihr können die Ergebnisse untereinander verglichen, neue Erkenntnisse gewonnen und fachliche Entscheidungen noch fundierter getroffen werden. Zudem lassen sich die dabei erzielten Erkenntnisse in der Öffentlichkeit wirkungsvoll präsentieren. Mit diesem Projekt konnte sich die Fachbehörde direkt an der Entwicklung einer neuen Dokumentationsform beteiligen und deren Inhalte mitbestimmen. Diese

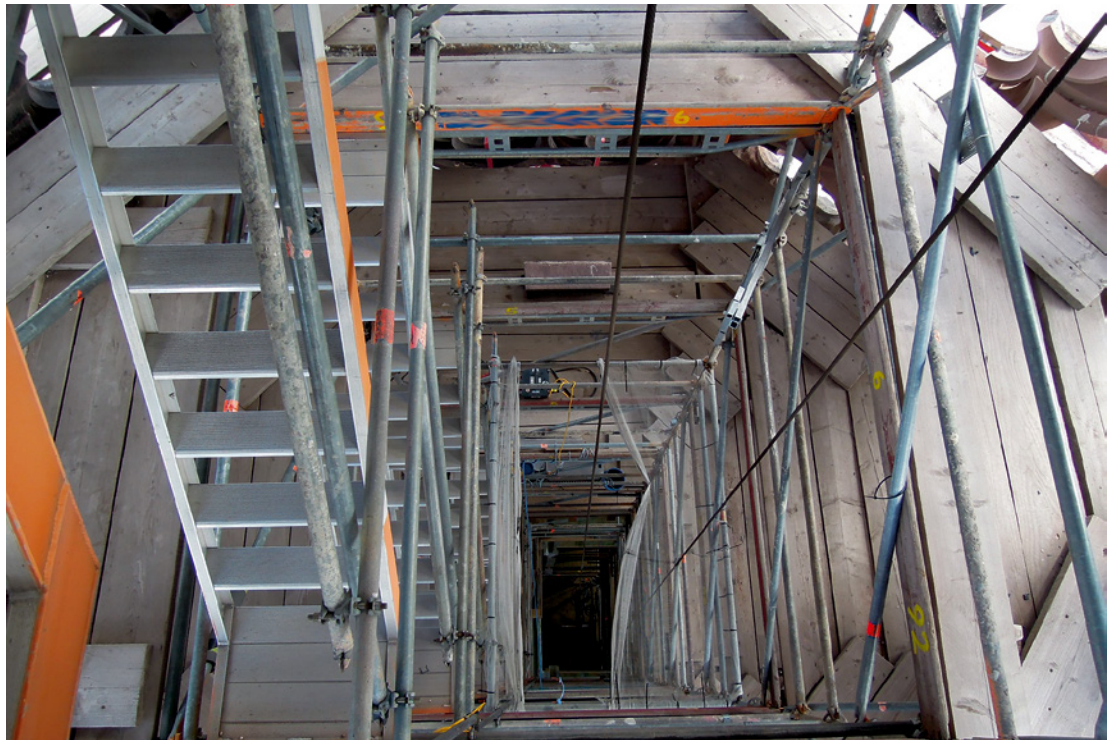


Bild 4
Treppengerüst im Innern
des Helms

für den Turmhelm aufgebaute Datenbank ermöglicht die Weiterentwicklung von neuen Standards für Baudokumentationen und damit für die Übertragung und Anwendung auf andere Kulturdenkmale landesweit [1].

Auf der Turmbaustelle schien aus verschiedenen Gründen manchmal die Zeit still zu stehen. Das Kunstwerk Turm entschwand hinter den Gerüsten und den Fangnetzen den fragenden Blicken der Freiburger Bürgerschaft (Bild 5). Ausdauer, Geduld und langer Atem waren angesagt, findige Finanzierungsinitiativen ebenso. Immerhin war es zwischenzeitlich vortrefflich gelungen, das Turmbauwerk virtuell und pressewirksam geschickt in Szene zu setzen. Die inspirierende und attraktive Öffentlichkeitsarbeit des Münsterbauvereins überbrückte die Zeiten dieser Geduldsproben gekonnt und im Blick auf das so notwendige Fundraising erfolgreich. Die wunderbare Ausstellung des Freiburger Augustinermuseums 2013 „Baustelle GOTIK“ war dabei mehr als nur ein kleines Trostpflaster [4].

Neben der materialgerechten und am Befund angelehnten Ausbildung von Austausch- bzw. Ergänzungsteilen bedurfte es präventiver Instand-

setzungsideen, bewährter Reparatur- und Konservierungstechniken sowie innovative und interdisziplinäre Grundlagenforschung. Für den denkmalfachlichen Umgang galt die Einsicht, dass dem grundsätzlich nicht aufhaltbaren Verschleiß und Verfall des Materials durch gezielte Maßnahmen gegengesteuert werden musste. Bei drohendem Verlust hatten Sicherungsmaßnahmen Vorrang vor Austausch (Bild 6). Aufgabe der Denkmalpflege war es, die dafür notwendigen Anpassungen, einzelne Untersuchungsschritte, letztlich die Veränderungen zu steuern und für deren Dokumentation Sorge zu tragen. Für Hinzufügungen galt, dass diese stets als solche erkennbar blieben, aber das Erscheinungsbild respektierten und allenfalls minimal beeinträchtigten. Idealerweise sollten sie reversibel sein, bestenfalls rückbaubar. Auch wenn es anfangs schwer fiel, die nötigen Veränderungen einerseits als Quelle möglicher Beeinträchtigung in Kauf zu nehmen, war es ein Lernprozess andererseits sie aber immer mehr auch als legitimes Mittel der Bewahrung zu akzeptieren. Das Kerngeschäft des Landesamtes hieß also: Beurteilen und Benennen der Denkmalwerte, Beurteilen und Moderieren der Denkmalverträglichkeit von Reparatur, Konservierung, Ergänzung oder Hinzufügung.



Bild 5
Helmspitze 2016

Bild 6
Sprechendes Bauschild am Gerüst des Helmes

3 Turmvorhalle

Von 1999 bis 2004 hatte der kostbare Bestand der Vorhalle eine intensive Restaurierungskampagne erfahren, die mit ihren bahnbrechenden Ergebnissen hinsichtlich Entstehungsgeschichte, Befunden zu Fassungen, Polychromie und Bauforschung die Restaurierungswerkstatt des Landesamtes über Jahre hinaus in Atem hielt. Zehn Jahre nach Abschluss der umfangreichen Konservierungsarbeiten hatten sich mittlerweile erneut Schmutz und Staub auf den Oberflächen gebildet, die sich als feste Schichten abzulagern drohten. Leichte Abplatzungen im Farb- und Malschichtbestand waren zu beobachten. Ferner musste die als Vogelschutz dienende Verdrahtung abgenommen und gereinigt werden. Diese Schutzverdrahtung verhinderte wirksam die Besiedlung der Vorhalle durch Vögel. Sie war ein wichtiger Bestandteil der vorsorgenden Schutzkonzeption für dieses Bauteil, das nach der Restaurierung durch die Öffnung als Hauptzugang zum Münster eine stark erhöhte Besucherfrequenz erfuhr. Das Monitoring der Skulpturen und des Architekturbestandes in der Vorhalle stand seit 2007 an. Es bedurfte mehrerer Anläufe, damit die Bauherrschaft tatsächlich Einsicht zeigte, mit einer Wartung die Nachhaltigkeit

der damaligen Kampagne zu überprüfen. Während der 2018 durchgeführten Arbeiten gelang es schließlich, die Baukommission mit auf das Gerüst vor Ort zu nehmen, mit dem Erfolg, dass die Belegstellen dicker Staubaufgaben bei den Auftraggebern ihre Wirkung nicht verfehlten. Als Fazit insgesamt war festzuhalten, dass sich die ursprünglichen Konservierungskonzepte für Stein und Fassungen erfreulicherweise bewährt hatten und sich hoffentlich die Einsicht weiter festigt, dass sich Monitoring in angemessenen Intervallen präventiv und kostenmäßig durchaus lohnt (Bild 7).

4 Glockenstuhl

Die auf 1289/1290 dendrochronologisch datierte Holzkonstruktion des Glockenstuhls zeigte insgesamt Schäden. Im Bereich der Basis erfolgten von 2008 bis 2013 zimmermannsmäßige und statische Sanierungsarbeiten. Da sich weitere Schäden oberhalb der Basis abzeichneten, wurde die gesamte Konstruktion messtechnisch erhoben und untersucht. Die Dokumentation machte ein Gesamtbild der Verformungen und sonstiger Bauschäden möglich und ihre ausgewerteten Ergebnisse



Bild 7

Die Törichten Jungfrauen in der Vorhalle Sommer 2018

bildeten die Grundlage für die weiteren Sanierungsschritte, die ab 2015 wieder aufgenommen wurden. Insbesondere standen Nachbesserungen an Details einer Ertüchtigungsphase von 1957 an. Ferner musste die Ebene unterhalb der Glockenstube stabilisiert und der historische Dielenboden aus Eiche in der von Besuchern hochfrequentierten Türmerstube neu verlegt werden. Anhand der detaillierten Aufmaßpläne wurden weiterhin die nötigen und durchgeführten Maßnahmen vom Statiker und Zimmermann vorbereitet und dokumentiert. Beispielsweise konnten durch maßnahmenbegleitende dendrochronologische Untersuchungen Reparaturen und Ergänzungen unterschiedlicher Zeiträume nachgewiesen werden. Dieser Nachweis zur Verstärkung nachträglich eingefügter Büge, Winkelhölzer und Streben erleichterte die Entscheidungsfindung für das Ausmaß der aktuellen Reparaturen. Letztlich wurden abgängige Holzverbindungen, die wieder hergestellt werden mussten, in entsprechender handwerklicher Weise mit Zapfen und Holznägeln ausgeführt. Bei nur teilweise abgängigen Hölzern ist ähnlich vorgefahren worden. Allerdings kam die Ertüchtigung an ausgewählten Hauptknotenpunkten nicht ohne statische Eingriffe aus. Diese wurden nicht versteckt; sie sind als moderne Zufügungen befragbar (Bild 8).

5 Kulturgut Klangdenkmal

Eine besondere Herausforderung stellte die Sanierung des Freiburger Münster geläutes dar. Glockenstuhl, Glockenjoch und Glocken unterliegen als Ensemble besonderen musikalischen, ästhetischen, technischen und denkmalpflegerischen Ansprüchen. Im Rahmen der Sanierung des Turmhelms, des Glockenstuhls und der Türmerstube wurden alle Glocken mit einem neuen Klöppelsatz ausgestattet. Ein besonderes Augenmerk lag auf der bestmöglichen Schonung der historischen Glocken und der sorgfältigen Abstimmung der dynamischen Wechselwirkungen zwischen Glockenläuten und dem Turmbauwerk. Im Hinblick auf die hohe campanologische Bedeutung des Freiburger Münster geläutes wurde mit Unterstützung der Denkmalpflege der sogenannte „musikalische Fingerabdruck“ der Glocken entsprechend den Forschungsergebnissen von „ProBell“ durch die Hochschule Kempten ermittelt. Die Voruntersuchungen zeigten, dass aufgrund der Läuteintensität und der Ausgestaltung der bestehenden Klöppel ein vergleichsweise hoher Verschleiß an Glockensubstanz stattfand. Neue, auf die einzelnen Glockenindividuen abgestimmte Klöppel helfen heute diesen Substanzverlust präventiv zu minimieren (Bild 9) [7].

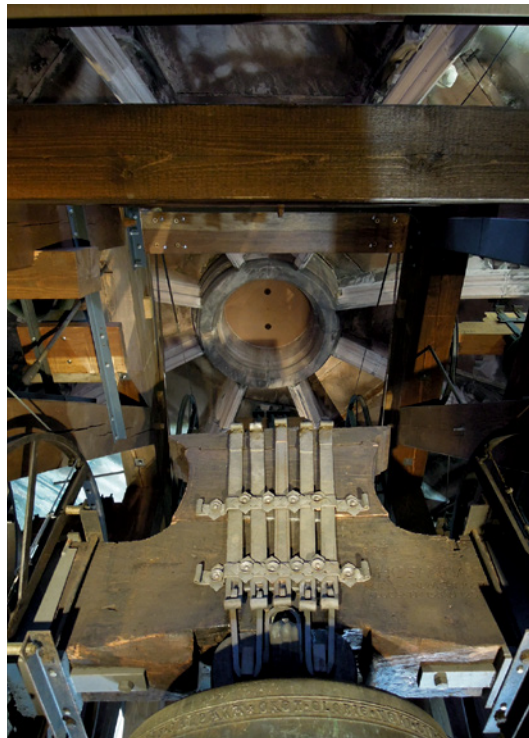


Bild 8
Zimmermannsmäßige Reparatur
am Eckposten des Glocken-
stuhls 2018

Bild 9
Blick von der Hosanna auf
den gotischen Schlussstein
des Glockengeschosses

6 Turmhelm

Der Münsterturm ist einer der ganz wenigen Türme, die bereits im Mittelalter fertiggestellt wurden. Vor allem die zierliche Maßwerkkonstruktion des Helms verleiht ihm seine Einzigartigkeit und ist damit der Grund für seine hohe Bedeutung. Dies ist bekannt. Heute wissen und ahnen die Denkmalschützer genauer denn je, wie der Helm errichtet, geplant und umgeplant wurde. Noch immer ist allerdings unbekannt, wo und wie das Wunderwerk der schmiedeeisernen Ringanker hergestellt wurde. Wie sie überhaupt in die Helmgasse gelangen konnten. Und wer sich dies Alles ausgedacht hat. Was aber bekannt war, ist, wie genial und gleichzeitig einfach die Hightech-Konstruktion Turmhelm sei über 700 Jahren funktioniert (Bild 10).

Die zwölf Jahre dauernde Gerüststellung lenkte das Augenmerk in die Tiefe dieses steinernen Kleinods. Die Baustelle gab stets neue Impulse, noch genauer hin zuschauen. Es öffneten sich Einblicke für ganz wunderbare Entdeckungen. Zum Beispiel dann, wenn verstanden wurde, dass es vermutlich historischen „Pfusch“ am Bau gab, weil die Zeit für den Abschluss der Arbeiten auf der mittelalterlichen Baustelle wohl sehr gedrängt hatte.



Bild 10
Turmspitze nach der
Instandsetzung 2017

Seit 2006 war die Turmpyramide eingerüstet (Bild 11) [1, 6]. Die kühne mittelalterliche Konstruktion war an bedeutenden Stellen geschwächt, die Gesamtstatik in Gefahr. 2009 lenkten besorgniserregende Verformungen an den Eckstreben den Blick verstärkt auf Probleme der Statik. Nach den Ursachen der statisch bedingten Risse wurde intensiv und aufwändig geforscht. Dafür ist ein Ingenieurbüro mit dem Schwerpunkt mittelalterliche Konstruktion eingeschaltet worden. In interdisziplinärer Zusammenarbeit mit Prüfstatiker, Steinmetzen der Freiburger Münsterbauhütte und den Spezialisten der Landesdenkmalpflege wurde zum ersten Mal ein Tragwerksmodell für dieses einzigartige, auch bautechnische Denkmal errechnet. In der Folge der Untersuchungen war davon auszugehen, dass an den konstruktiven Knotenpunkten des Turmhelmes umfangreiche Auswechslungen der tragenden Steine nötig wurden. Das zugrunde liegende System war über die Jahrhunderte ausgeleiert. Es galt, dieses System dauerhaft zu retten. Die Frage aber war, wie?

Die insgesamt komplexen Fragestellungen wurden bereits 2011 öffentlich in einem Fachgespräch „Denkmalpflegerische Erhaltungskonzepte“ vor Ort in Freiburg präzisiert, diskutiert und in Teilen beantwortet [7]. Das Expertengespräch erläuterte damals den methodischen Ansatz zur Grundlagenforschung und denkmalpflegerischen Konzeptfindung für Erhalt und Instandsetzung des steinernen Helms. Es versuchte in exemplarischer Auswahl eine denkmalfachliche Standortbestimmung zum Umgang mit der historischen Konstruktion, mit den Schäden am Stein und am eisernen Ringanker (Bild 11).

Zur Verabschiedung des finalen Sicherungskonzeptes war schließlich der Sachverstand sehr vieler Disziplinen gefordert. Denkmalfachliches Wirken am Münsterbauwerk geriet zu einem herausfordernden logistischen Unternehmen. Die historischen Informationen des Bauwerks abzufragen, sie zu dokumentieren und fortzuschreiben, musste mit der Forderung nach Dauerhaftigkeit und Reversibilität der Eingriffe wichtigstes Ziel bleiben. Substanzeingriffe und Untersuchungen am Bauwerk erfolgten allein um Informationen zu erhalten, die für die Entscheidungen über den denkmalpflegerischen Umgang mit dem Objekt erforderlich waren



Bild 11
Baubehelf und Blick auf den freiliegenden Ringanker

oder um wichtige Zeugnisse zu sichern wie z.B. kein flächendeckendes Aufdecken des Ringankers. Wie auch könnte er aufgedeckt werden? Oder wie könnten metallurgische Probenentnahmen von den originalen Ankerstangen erfolgen?

Was aber war dem Freiburger Turmwunder an technischen Zusätzen zuzumuten? Bekannt war sehr genau: Das Münster wurde aus festem Buntsandstein gebaut, einem verdichteten und gepressten Sand. Dieser Prozess der Steinwerdung ist naturwissenschaftlich umkehrbar. Aus Stein kann wieder Sand werden (Bild 12). Ein äußeres Hilfstragwerk mit vier 1 cm dicken Stahlseilen um den Helm herum: War das etwa die Lösung? Äußere Stahlseile würden dem Bau eine Zusatzspannung geben und die Aufgabe der Ringanker in der Horizontalen übernehmen. Aber: die Funktionalität des Originals würde damit außer Kraft gesetzt werden!

Oder wäre in herkömmlicher Bauhüttentradition ein vollständiger Austausch der beschädigten Steine und ein Vertrauen auf das altbewährte statische System die Lösung? Diese Idee gab es bereits 1889 als das Münsterkomitee vorschlug, „die Spitze (des Helms) um etwa 15 m abzutragen und neu aufzuführen“. Denn: „Schadhaft ist nur die Spitze, welche in ihrer jetzigen Verfassung nicht gehalten werden kann.“[5]. Stattdessen lautete schließlich das

gemeinsam beschlossene Ziel: höchstmögliche Bewahrung der sichtbaren steinernen Originalsubstanz sowie die Erhaltung der unsichtbaren statischen Baudee (möglicherweise eines Erwin von Steinbachs). Voraussetzung für diesen Ansatz war die Erkenntnis, dass das mittelalterliche Statiksys-

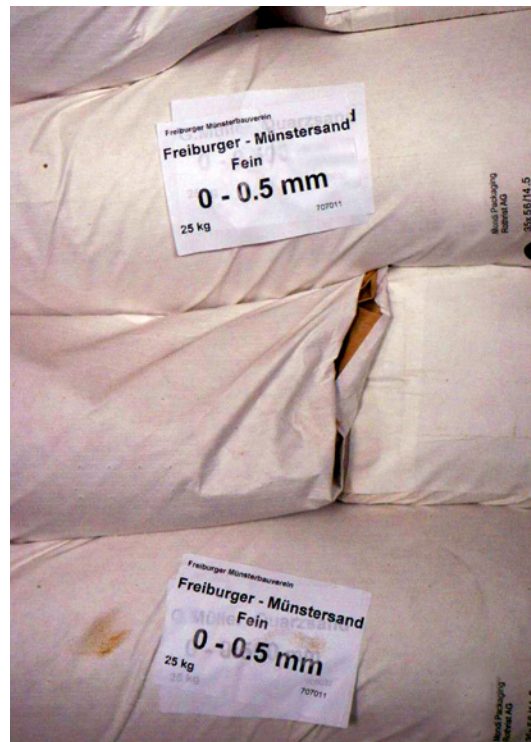


Bild 12
„Münstersand“ als Zuschlagstoff

tem gleichermaßen schützenswert ist. Auch wenn der These der Statiker, äußere Stahlseile seien eine konsequente Weiterführung des historischen Ankersystems nur mit anderen Mitteln, ein gewisser theoretischer Charme nicht abzusprechen war. Eine berechnete Statik des Münsterturms gab es nicht. Jetzt musste sie über ein virtuelles Modell des mit jedem einzelnen Stein dokumentierten Turms neu entwickelt werden. Um diese Statik nachvollziehbar abbilden zu können, waren Zeit und Geld gefragt.

2015 schließlich war der richtige Weg klar: Originale, bauzeitliche Steine werden an Ort und Stelle gesichert; ihr Ausbau sollte die Ausnahme bleiben; Sanierung jedes einzelnen geschädigten Steines plus Hightech Ertüchtigung mittels kleinstinvasiven Statikeingriffen. Sehr stark geschädigtes und schlechtes Steinmaterial wird entfernt; neue Steine hinzugefügt, wenn nötig überfangen Stahlklammern konservierte Stellen zusätzlich. Bei ca. 40 Tonnen Last an manchen Stellen war das eine Herkulesarbeit. Als Credo galt die Maxime, dass essentiell für den Erhalt des Zeugniswertes die Art der Verarbeitung und Einbindung der erneuerten Bauteile wichtig war. Form-, Werk- und Materialgerechtigkeit sind dafür die Schlagworte.

Der Austausch betraf weitestgehend Steine mit Vorschädigungen. Einundzwanzig gerissene Ecksteine wurden mit korrosionsbeständigem Titan umgriffen, acht mussten durch neue ersetzt werden (Bild 13). Für die Konservierung machte man sich auf die Suche nach den geeigneten Materialien. Die Landesdenkmalpflege hatte für den Helm bereits frühzeitig Expertisen für die Beschaffung von Ersatzgesteinen in die Wege geleitet. In diesem Zusammenhang sei an die erfolgreiche Vitalisierung der vulkanischen Tuffsteine für die Instandsetzung des Breisacher Münsters vor einigen Jahren erinnert. Hochwertiges einheimisches Werksteinmaterial wurde gesucht und gefunden. Die Möglichkeiten und Chancen von geeignetem Steinerfüllungsmörtel sind intensiv verfolgt und diskutiert worden. Für die untersten Schichten am Fuß des Helmes wurde beispielsweise folgender Materialeinsatz dokumentiert: 210 kg Strahlgut, 25 kg Rissinjektionsmasse, 70 l Kieselsäureester, 40 kg Kittungsmasse, 3 kg Restauriermörtel, 30 l Bindemittel Kieselöl, 8 m Titangewindestäbe. Was ist das schon gegenüber 700 Jahre eherner Standfestigkeit?



Bild 13
Detail der Hightech
Titanverschraubung

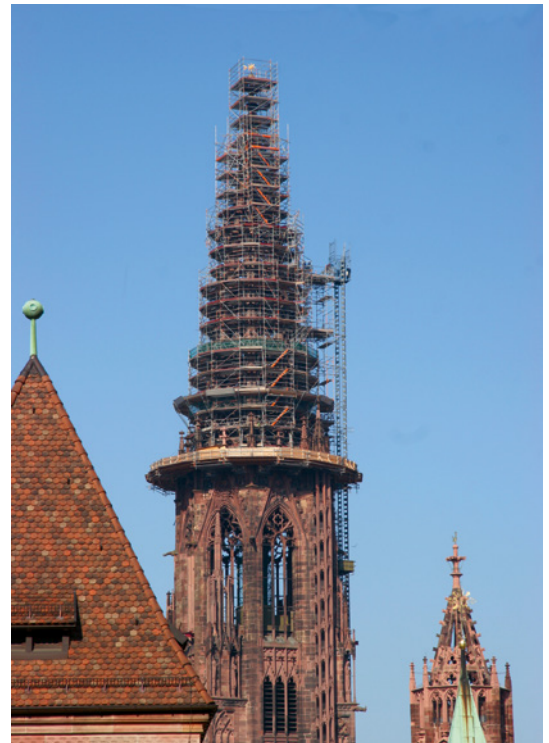


Bild 14
Turmgerüst 2007

7 Finale

Endlich entrüstet! Respekt vor der genialen Konstruktion! Wir bauten mit [3]! So lauteten die klingenden Aufmacher zum Turmfinale 2018. Imposante Hindernisse stellten sich während der Baustelle den Mitarbeitern auf dem Gerüst in den Weg, genannt seien die temporären Holzbehelfe, stark verengte Gerüstbreiten, am Turm verankerte Wind-eisen oder, nicht zu vergessen, die Fang- und Staubnetze, die Sicherheit gaben, aber ständig im Weg waren. Und ganz zu schweigen vom Wetter. Der eingangs zitierte Irrweg, die Turmspitze 15 m abzubauen, musste nicht eingeschlagen werden. Der alte Freiburger Münsterturm ging und geht nicht an Krücken. Das Freiburger Turmwunder „mit der künstlich gebauten und gezierten Pyramide“ steht ohne ein Gerüst [5]. Heute kommt in der Helmspitze das beeindruckende Wechselspiel aus Licht, Sandsteinrot und Himmelsblau wieder zur vollen Wirkung, ohne sichtbare Einschränkungen durch sekundäre statische Hilfskonstruktionen. Das ist ein großes Finale für alle Beteiligten nach einer ereignisreichen Wegstrecke.

Literatur

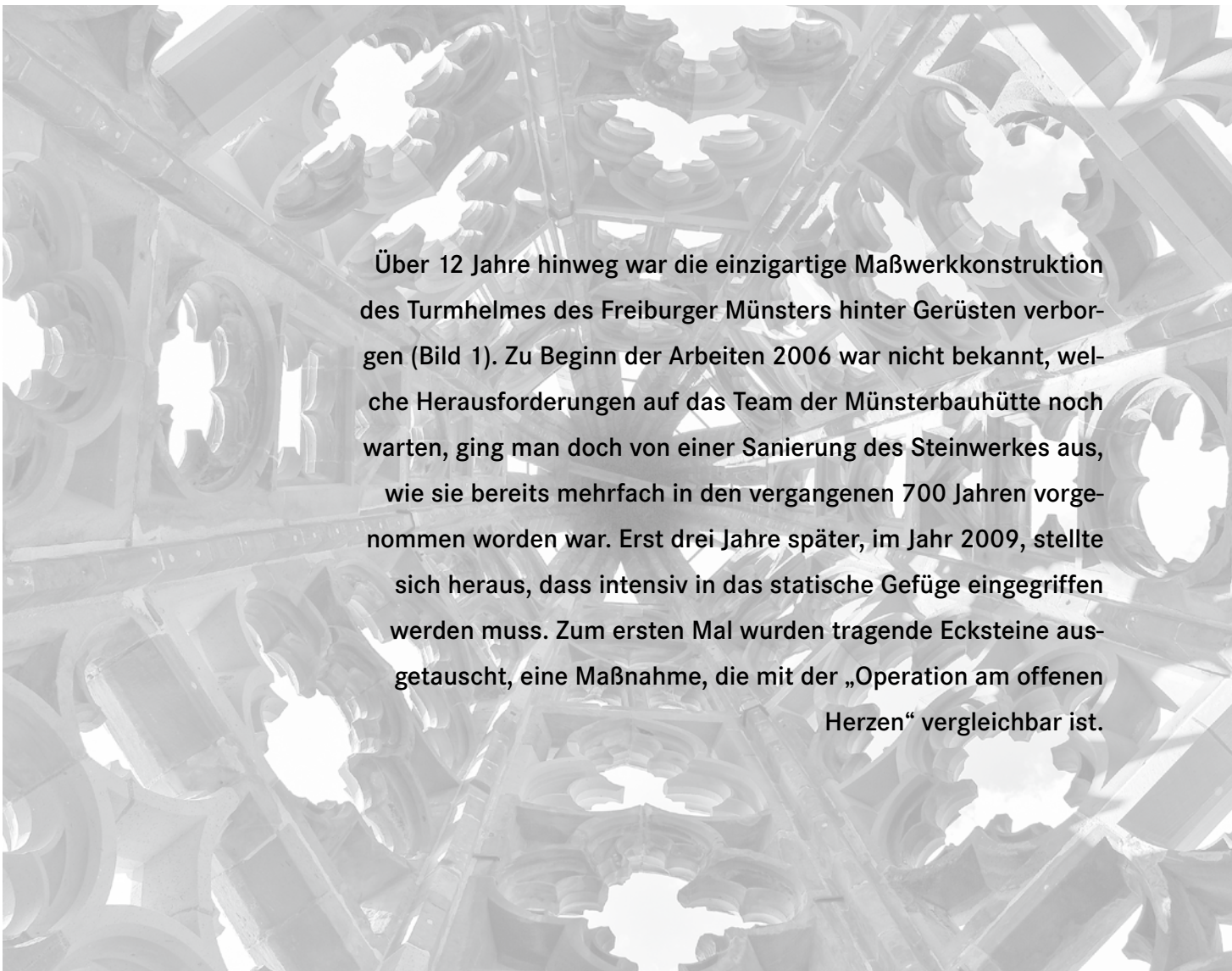
- [1] Dagmar Zimdars und Otto Wölbart (Hrsg.): Der Turmhelm des Münsters Unserer Lieben Frau in Freiburg. Arbeitsheft 27 Landesdenkmalpflege Baden-Württemberg. Konrad Theiss Verlag: Darmstadt, Esslingen 2014.
- [2] Die Turmvorhalle des Freiburger Münsters. Untersuchung und Konservierung der Polychromie: Arbeitsheft 17 Landesdenkmalamt Baden-Württemberg. Konrad Theiss Verlag: Stuttgart 2004.
- [3] Wir Bauten Mit! Die große Sanierung des Freiburger Münsterturms. (Hrsg.): Freiburger Münsterbauverein e.V. Freiburg 2018.
- [4] Baustelle Gotik. Das Freiburger Münster: (Hrsg.): Peter Kalchthaler, Guido Linke, Mirja Straub. Imhof-Verlag: Petersberg 2013.
- [5] Gutachten der Sachverständigen über den baulichen Zustand, die notwendigen Wiederherstellungsarbeiten und die Freilegung des Münsters in Freiburg. Freiburg 1889. Jubiläumsschrift zum 30jährigen Bestehen des Münsterbauvereins, Freiburg 1920.
- [6] Münsterblatt, Jahresschrift des Freiburger Münsterbauvereins e.V. (Hrsg.): Freiburger Münsterbauverein Nr. 25, 2018. Schillinger Verlag: Freiburg 2018.
- [7] Ortsakten und Dokumentationen zum Freiburger Münsterturm: Landesamt für Denkmalpflege, Referat 83. 2 Bau- und Kunstdenkmalpflege.

Abbildungen

Bild 1: Plakat der Deutschen Stiftung Denkmalschutz
 Bild 3: Erzbischöfliches Bauamt Freiburg
 Alle anderen Abbildungen: Dagmar Zimdars

Freiburger Münster – Die Turmhelmsanierung 2006–2012

von Yvonne Faller



Über 12 Jahre hinweg war die einzigartige Maßwerkkonstruktion des Turmhelmes des Freiburger Münsters hinter Gerüsten verborgen (Bild 1). Zu Beginn der Arbeiten 2006 war nicht bekannt, welche Herausforderungen auf das Team der Münsterbauhütte noch warten, ging man doch von einer Sanierung des Steinwerkes aus, wie sie bereits mehrfach in den vergangenen 700 Jahren vorgenommen worden war. Erst drei Jahre später, im Jahr 2009, stellte sich heraus, dass intensiv in das statische Gefüge eingegriffen werden muss. Zum ersten Mal wurden tragende Ecksteine ausgetauscht, eine Maßnahme, die mit der „Operation am offenen Herzen“ vergleichbar ist.

**Bild 1**

Turmhelm im Gerüst,
Sommer 2007

Bild 2

Stark geschädigte
mittelalterliche Kreuzblume,
Aufnahme um 1918



700 Jahre Sanierungsgeschichte

Durch verschiedene Quellen ist belegt, dass dieses Meisterwerk der Architektur, die filigrane Maßwerkkonstruktion des Turmhelmes, immer wieder gefährdet war und eine ständige Instandhaltung erforderte. Erstaunlicherweise waren es nicht Erdbeben, die der Konstruktion am stärksten zusetzten, sondern Blitzeinschläge, Kriege und vor allem die Bewitterung in dieser exponierten Lage hoch über dem Münsterplatz.

Berichte über Blitzeinschläge an der Turmspitze sind seit dem 15. Jahrhundert überliefert. Die zahlreichen Reparaturen sind deutlich ablesbar vor allem an der südwestlichen Strebe. Nicht ganz so gewaltig wie die Auswirkungen heftiger Gewitter waren die Folgen kriegerischer Auseinandersetzungen in der Stadt. Bekannt sind Beschießungen des Münsterturms im 16. Jahrhundert während des Bauernkrieges und im 18. Jahrhundert mehrfach im Laufe der französischen Belagerungen. Glücklicherweise waren die Beschädigungen nie so groß, dass die Standfestigkeit des Turmhelms gefährdet war. Das gleiche gilt für die beiden Weltkriege, in denen das Münster und der Münsterturm verschont blieben, obwohl am 27. November 1944 mehrere Bomben in unmittelbarer Nähe des Münsters detonierten.

Die erste dokumentierte umfassende Turmsanierung fand von 1913 bis 1922 statt. Ein insgesamt 60 Meter hohes Holzgerüst wurde in zwei Etappen, zunächst um das Oktogon, danach am Turmhelm errichtet, um die notwendigen Arbeiten durchzuführen. Neben der Erneuerung von zahlreichen Maßwerksteinen und Krabben ersetzte man 1920 auch die mittelalterliche Kreuzblume durch eine Kopie (Bild 2).

Doch bereits 1957 musste nahezu der gesamte Münsterturm erneut für 25 Jahre bis 1983 eingerüstet werden, der Turmhelm selbst von 1963–1966 (Bild 3). Es waren Schäden zu beheben, die noch aus der Zeit des II. Weltkrieges stammten, vor allem jedoch solche, die durch den Einfluss des sogenannten sauren Regens entstanden sind. Diese Zerstörung des Steines durch die Auflösung des Bindemittels durch Schwefelsäure ging schleichend aber kontinuierlich voran.

Die zerstörerischen Auswirkungen zeigten sich oft schlagartig, sodass bereits 12 Jahre später 1994 erneut ein Gerüst im Bereich der Oktogonhalle errichtet werden musste. Noch bevor die Arbeiten in diesem Bereich fertiggestellt werden konnten, stürzte in einer stürmischen Nacht im Juli 2005 ein Teil eines Maßwerkes auf den Holzboden der Besucherplattform. Ein rostender Eisendübel hatte zur Absprengung dieser Maßwerknase auf circa 74 Meter Höhe geführt. Bei der kurzfristig anberaumten Bekletterung des Turmhelms stellte sich bald heraus, dass aufgrund mannigfaltiger Schadensbilder eine lokale Reparatur nicht ausreichend sein würde, sondern dass die gesamte Konstruktion saniert werden muss. Noch im Jahr 2005 wurde ein entsprechendes Gerüst geplant, das im Frühjahr 2006 errichtet wurde.

Die Bestandserfassung und Materialerforschung im Verlauf der Turmhelmsanierung

Die erste Bewertung des Zustandes vom Kletterseil aus konnte nur einen sehr groben Überblick über das Ausmaß der Schäden geben. Nach der Gerüsterstellung war deshalb zunächst der Zustand des Turmhelms detailliert zu erfassen und zu dokumentieren. Aufgrund der herausragenden Bedeutung der mittelalterlichen Konstruktion waren die Anforderungen in diesem Fall besonders hoch. Neben den Steinmetzen waren weitere Spezialisten aus unterschiedlichen Disziplinen beteiligt, um Erkenntnisse zur Geschichte, Konstruktion und zu Materialien zu sammeln, zu dokumentieren und zu bewerten. Dieses interdisziplinäre Team begleitete die Münsterbauhütte über die gesamten 12 Jahre hinweg: allen voran die Denkmalpflege mit Dr. Dagmar Zimdars, Otto Wölbert und Rolf-Dieter Blumer; die Ingenieure für Tragwerksplanung aus dem Münchener Büro Barthel & Maus mit Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel und Dr. Christian Kayser sowie dem Freiburger Münsterstatiker Guido Kremp und dem Karlsruher Ingenieur Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Wenzel. Bauforscher Stefan King und Restauratorin Johanna Quatmann trugen sämtliche Hinweise zusammen, die eine Altersbestimmung ermöglichten. Das Fachwissen zur Gesteinskunde lieferten der



Geologe Dr. Wolfgang Werner und die Mineralogin Dr. Hiltrud Müller-Sigmund.

Neben der Recherche in den Archiven erfolgte die Bestandserfassung hauptsächlich vor Ort auf dem Turmgerüst. Glücklicherweise standen zu diesem Augenblick erstmals detaillierte Bestandspläne aus fotogrammetrischen Vermessungen zur Verfügung. In diese Pläne wurden Stein für Stein alle sichtbaren Befunde eingetragen: Herkunft der Steine, Art und Umfang von Bewuchs, Risse, Fehlstellen und sonstige Schäden. Aber auch Steinmetzzeichen, Reste von Farbfassungen und Reparaturen der Vergangenheit wurden erfasst und dokumentiert. Sie geben wichtige Hinweise auf die Baugeschichte des Turmes.

Da unter der Verschmutzung und dem Flechtenbewuchs vieles gar nicht zu erkennen war, musste die gesamte Oberfläche des Turmes gereinigt werden (Bild 4). Erst dann zeigten sich die erwarteten Schadensbilder am Sandstein, die der exponierten Lage in dieser Höhe geschuldet sind: Abschalungen, Abplatzungen, Rostsprengungen, Krustenbildung, Fehlstellen und Risse (Bild 5): daneben auch Schäden an den Fugen, die in Folge der heftigen Bewitterung größtenteils ausgewaschen oder ausgebrochen waren.

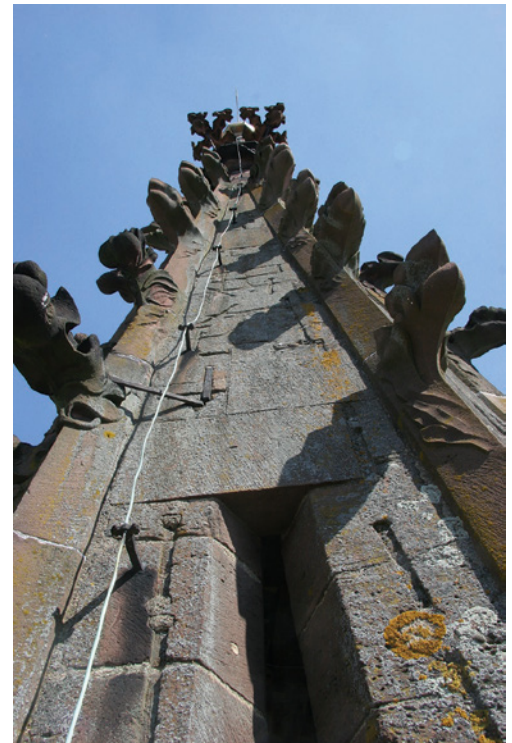


Bild 3
Münsterturm hinter Gerüsten, Aufnahme 1963

Bild 4
Helmspitze mit Flechtenbewuchs

**Bild 5**

Risse im Krabbenkopf

Bild 6Diagonaler Riss
unterhalb des Ringankers

Sandstein

Neben der Erfassung der Schäden lag ein Schwerpunkt auf der Untersuchung der verwendeten Materialien. Da wäre in erster Linie das Baumaterial Buntsandstein zu nennen, von dem im Laufe der Jahrhunderte Varietäten aus verschiedenen Steinbrüchen der Umgebung zum Einsatz kamen, die sich in Körnung, Bindemittel, Farbigkeit und Verwitterungsverhalten unterscheiden. Insgesamt sechs Varietäten von Sandstein wurden von Astrid Hirsch identifiziert, die sich intensiv mit dem Gestein des Freiburger Münsters beschäftigte. Von der Bauzeit an bis in die 1920er Jahre wurde Sandstein aus der Gegend von Emmendingen/Freiamt verwendet. Erst in den 1960er Jahren wurde eine Sandsteinvarietät aus dem Raum Freudenstadt eingesetzt. Leider erwiesen sich nicht alle Gesteine als gleich widerstandsfähig. Vor allem die im 20. Jahrhundert eingesetzten sehr feinkörnigen Varietäten der Steinbrüche am Allmendsbarg (bei Emmendingen) und um Freudenstadt hielten der Verwitterung nicht lange stand und waren stark geschädigt, was an der spezifischen Zusammensetzung des jeweiligen Sandsteins liegt. Dabei ist dieses Baumaterial grundsätzlich geeignet, was sich schon daran zeigt, dass ca. 83 Prozent der noch vorhandenen Steine aus der Bauzeit des Mittelalters stammen und seit 700 Jahren nahezu unverändert Wind und Wetter trotzen.

Neben den „normalen“ Alterungsspuren am Sandstein durch Verwitterung wurden einzelne Risse entdeckt, die sich in ähnlicher Form an mehreren Ecksteinen befanden und zwar an den Stellen, die am stärksten durch den Ringanker belastet werden: am Kreuzungspunkt der horizontalen Anker und der vertikalen Streben (Bild 6). Auch einige Maßwerkfelder waren vertikal aufgespalten und in den Fugen leicht verschoben. Lage und Form der Rissbilder ließen auf eine statische Ursache schließen, aber auch Rostsprengungen können eine mögliche Erklärung sein.

Schmiedeeisen

Neben dem Sandstein spielt das eingebaute Eisen eine tragende Rolle. Die komplette Turmpyramide ist mit zahlreichen unterschiedlichen Eisenkon-

strukturen versehen, die teilweise aus der Bauzeit stammen. Es handelt sich vorwiegend um Eisenklammern von circa 20 bis 40 cm Länge, die sowohl sichtbar als auch verdeckt angebracht sind (Bild 7).

Die wichtigste Eisenkonstruktion ist allerdings unsichtbar, obwohl erst durch sie dieses kühne Bauwerk möglich war: die Ringanker aus geschmiedetem Eisen, die in acht Ebenen des Turmhelms die Horizontalkräfte aufnehmen und ableiten. In den Obergurten der Maßwerkfelder liegt in einer eigens dafür hergestellten Nut und in Kalkmörtel eingebettet die Ankerstange mit einer Länge von bis zu 4,5 m und einem Querschnitt von 3×4 cm. Die acht Stangen einer Ebene werden in den acht Ecksteinen über einen ebenfalls eingelegten Eisenring miteinander verbunden und bilden dadurch einen geschlossenen Ring (Bild 8).

Um die Stabilität des gesamten Turmes bewerten zu können, war es wichtig, zuverlässige Aussagen zum Zustand der verschiedenen Eisenbauteile zu erhalten, dies vor allem in Bezug auf die Korrosion, denn das Eisen wird zum größten Feind, sobald es korrodiert. Rostige Stellen blähen sich auf und entwickeln durch diese Volumenvergrößerung eine enorme Sprengkraft.

Eine erstaunliche Erkenntnis war die, dass sich am mittelalterlichen Schmiedeeisen sehr wenig Korrosion zeigte und teilweise sogar noch die Schmiedehaut intakt war (Bild 9). Rost wurde vor allem an jenen Stellen entdeckt, die durch neuere Reparaturarbeiten mit zementhaltigem Mörtel in Verbin-



Bild 7
Blick in das Innere der Turmspitze mit zahlreichen Eisenklammern

dung gebracht wurden. Während die meisten an der Oberfläche angebrachten Eisenklammern gut zu überprüfen waren, stellte die Bestandsaufnahme und Bewertung des innenliegenden Ringankersystems eine größere Herausforderung dar.

Nur wenn benachbarte Steine ausgebaut wurden, konnten diese mittelalterlichen Stangen und Ringe mit dem bloßen Auge betrachtet werden (Bild 10). Das war zwar aufschlussreich für diese wenigen konkreten Stellen, aber nicht ausreichend für die Bewertung des gesamten Systems. Um in das Innere zu schauen, wurde ein Röntgenverfahren mit Kobaltstrahlen eingesetzt, was zu gut lesbaren Ergebnissen führte. Diese Röntgenmessungen



Bild 8
3-D-Darstellung von Ringanker, Eckstein und Maßwerksteinen



Mörtel

Ein unscheinbarer, aber wesentlicher Bestandteil der Konstruktion ist der Mörtel. Man unterscheidet dabei zwischen Versetzmörtel und Fugenmörtel. Der Versetzmörtel muss die Last des Steines übernehmen, während der Fugenmörtel die Oberfläche der Fuge verschließen und das Eindringen von Wasser verhindern soll. In dieser Höhe waren natürlich sehr viele Fugen durch Wind und Regen ausgewaschen worden, dennoch konnten aus den verschiedenen Reparaturetappen zahlreiche unterschiedliche Mörtel identifiziert werden, die sich als mehr oder weniger geeignet für den jeweiligen Zweck erwiesen haben. Auch hier setzte sich die Erkenntnis durch, dass die ganz alten Mörtel aus der Bauzeit im 14. Jahrhundert ihre Aufgabe am besten erfüllt haben. So konserviert der ursprüngliche weiche Kalkmörtel das mittelalterliche Eisen, während moderne „verbesserte“ Mörtel durch den Einsatz von Zement insgesamt zu hart waren und zu Nässe und Abplatzungen am Sandstein führten.

Bauforschung

Obwohl der Turmhelm immer wieder eingerüstet und Gegenstand von Untersuchungen war, birgt er noch immer eine ganze Reihe an Geheimnissen. Nachdem keine Aufzeichnungen aus der Bauzeit existieren, muss das Bauwerk selbst befragt werden. Glücklicherweise entwickeln sich die Untersuchungsmethoden weiter, so dass es tatsächlich immer noch neue Entdeckungen gibt.

Eine dieser überraschenden Entdeckungen waren Reste einer rötlichen Farbfassung sowohl auf den Fugen als auch auf der Steinoberfläche. Diese Farbgestaltung ist auf der gesamten Innenseite der Turmpyramide nachgewiesen worden, während auf der Außenseite nichts (mehr?) aufzufinden ist. Es ist inzwischen bekannt, dass die heutige Steinsichtigkeit alter Bauwerke nicht dem Originalzustand entspricht, da diese in der Regel farbig gefasst waren. Dass allerdings in dieser Höhe eine Farbfassung aufgebracht wurde, ist dennoch erstaunlich.

Bild 9 bildeten Ankerstangen, Eisendübel, Steinrisse, Mörtelfugen und Korrosionsschäden ab. Sie zeigten, dass die Ringanker weitgehend korrosionsfrei waren. Allerdings konnte keine Aussage zum Zustand der Ankerringe getroffen werden, da diese in Blei eingebettet sind, was eine abschirmende Wirkung hat.

Bild 10 Durch den Ausbau des Ecksteins entstandene Lücke

Für den zeitlichen Ablauf der Bau- und Sanierungsgeschichte gibt das Bauwerk unterschiedliche Hinweise. Am leichtesten zu identifizieren sind Inschriften und Steinmetzzeichen, obwohl sie nicht immer leicht zu interpretieren sind. Insgesamt 125 Inschriften wurden vom Bauforscher Stefan King eigenhändig abgepaust und dokumentiert. Ähnlich aussagekräftig ist die Bewertung der unterschiedlichen eingebauten Sandsteine, da sie durch Abgleich mit vorhandenen Rechnungen bestimmten Steinbrüchen und damit einer bestimmten Bauzeit zuzuordnen sind.

Eine sehr anschauliche Darstellung der Bau- und Sanierungsgeschichte bietet die Gestaltung der Krabben (= Kriechblume), mit denen die acht Streben des Turmhelmes bestückt sind. Diese außen angebrachten prägenden Schmucksteine sind der Witterung am stärksten ausgesetzt und wurden im Lauf der Jahrzehnte mehrfach ausgetauscht. Sie geben damit wertvolle Hinweise für die Datierung von Sanierungsepochen.

Ursachenforschung der (statischen) Schäden

Die Ursachen für die meisten Schadensbilder sind zum größten Teil offensichtlich. Es handelt sich meistens um Alterungserscheinungen des Steines oder nachweisbare äußere Einwirkungen. Diese Eindeutigkeit galt allerdings nicht für die Risse in den Ecksteinen (Bild 11) und in Maßwerksteinen. Die Vermutung lag nahe, dass eine punktuelle statische Überlastung der Grund dafür war. Dies nachzuweisen stellte eine der größten Herausforderungen dar, die im Rahmen der Turmsanierung gemeistert werden mussten.

Um ein statisches System auf seine Wirksamkeit beurteilen zu können, muss zunächst ermittelt werden, welche Lasten (Wind, Eigengewicht) vorhanden sind, wie sie vom System aufgenommen und nach unten abgeleitet werden. Erst danach kann geprüft werden, ob die verwendeten Materialien in der Lage sind, diese Lasten aufzunehmen. Da es für den Turm weder Aufzeichnungen und schon gar keine Berechnungen gab, bestand die Herausforderung darin, für die gebaute Konstruktion des Turmhelmes im Nachhinein ein statisches Modell



Bild 11
Gelöstes Stück eines Ecksteins

zu entwickeln, das die Realität abbildet. Die Entwicklung des Tragwerksmodells war eine äußerst komplexe Aufgabe, da in die Berechnungen unzählige Unbekannte aufgenommen werden mussten.

Die Ermittlung des Eigengewichtes war dabei noch die einfachste Aufgabe, da sowohl Anzahl und Größe der Steine als auch deren Gewicht bekannt war. Völlig unbekannt dagegen war die Belastung durch den Wind auf die filigrane Maßwerkkonstruktion. Erstaunlicherweise gab es bislang kein Rechenmodell für die Verteilung von Windlasten am achteckigen Querschnitt. Diese Angaben waren jedoch wesentlich für die Bewertung der Konstruktion.

So wurde an einem eigens dafür hergestellten Modell im Windkanal der Firma Wacker der Einfluss des Windes auf den Turmhelm gemessen (Bild 12). Dies erfolgte unter nahezu realistischen Bedingungen mit dynamischem Wind. Die einwirkenden Kräfte wurden mittels Sensoren gemessen, die am Modell angebracht waren. Die Auswertung zeigte, dass die tatsächlich einwirkende Windkraft größer



Bild 12
Turmmodell im Windkanal



Bild 13
Probekörper Ecksteine im
Druckversuch

ist als bisher angenommen, sich jedoch gleichmäßiger auf die acht Seiten verteilt als vermutet.

Im nächsten Schritt wurde getestet, ob der Sandstein im Prinzip geeignet war, die einwirkenden Kräfte aufzunehmen, deren Größenordnungen jetzt zum ersten Mal genau bekannt waren. Dies war zwar anzunehmen, da der Turm seit 700 Jahren allen Belastungen aus Wind, Wetter und Erdbeben standgehalten hat, aber nun war der rechnerische Nachweis gefordert. Außerdem sollte überprüft werden, ob die Ursache für die diagonalen Risse in den Ecksteinen wie vermutet in der Zugbelastung durch den Ringanker liegt.

An mehreren Prüfkörpern, die im Originalmaßstab den Eckstein mit eingelegtem Ringanker abbildeten, wurden in der Materialprüfanstalt der Karlsruher Universität (KIT) Druck- und Zugversuche durchgeführt (Bild 13). Das Ergebnis bestätigte die Theorie: Die während der Versuche erzeugten Rissbilder in den nachgebildeten Ecksteinen entsprachen denen, die real am Turm vorgefunden wurden. Beruhigend dabei: Die zur Zerstörung benötigten Kräfte im Versuch sind deutlich höher als die Kräfte, die durch den Wind am Turm angreifen. Auch die Druckfestigkeit des Sandsteines ist um ein vielfaches höher als der Druck, der durch das Eigengewicht auf die Ecksteine ausgeübt wird.

Als Fazit konnte festgehalten werden, dass das Tragsystem mit den verwendeten Materialien ein geeignetes und nachhaltiges Konstruktionsprinzip darstellt. Die Risse sind in diesem Zusammenhang auf Materialermüdung zurückzuführen, was in Anbetracht der langen Standzeit von 700 Jahren zu akzeptieren war.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der zahlreichen Untersuchungen führten zunächst vor allem dazu, dass die Achtung und Bewunderung für die Schöpfer dieses Bauwerks noch größer wurde als bislang. Noch deutlicher wurde erkennbar, welche Herausforderungen schon damals die Steinmetze auf geniale Weise meisterten. Und es setzte sich auch die Erkenntnis durch, dass trotz aller Befragungen und Untersuchungen nicht alle Geheimnisse der Turmkonstruktion gelüftet werden konnten.

Die zahlreichen Untersuchungen ergaben, dass der Gesamtzustand des Turmes „altersbereinigt“ gut ist. Das Zusammenspiel der mittelalterlichen Baumaterialien Sandstein, Kalkmörtel und Schmiedeeisen ist perfekt aufeinander abgestimmt, die Konstruktion war damit für Jahrhunderte gut gerüstet und wird es wohl auch bleiben, solange man diese bewährte Materialkombination respektiert. Denn es hat sich auch gezeigt, dass in vielen Fällen eine vermeintliche Verbesserung durch neue Materialien eher zu einer Verschlechterung des Systems führte.

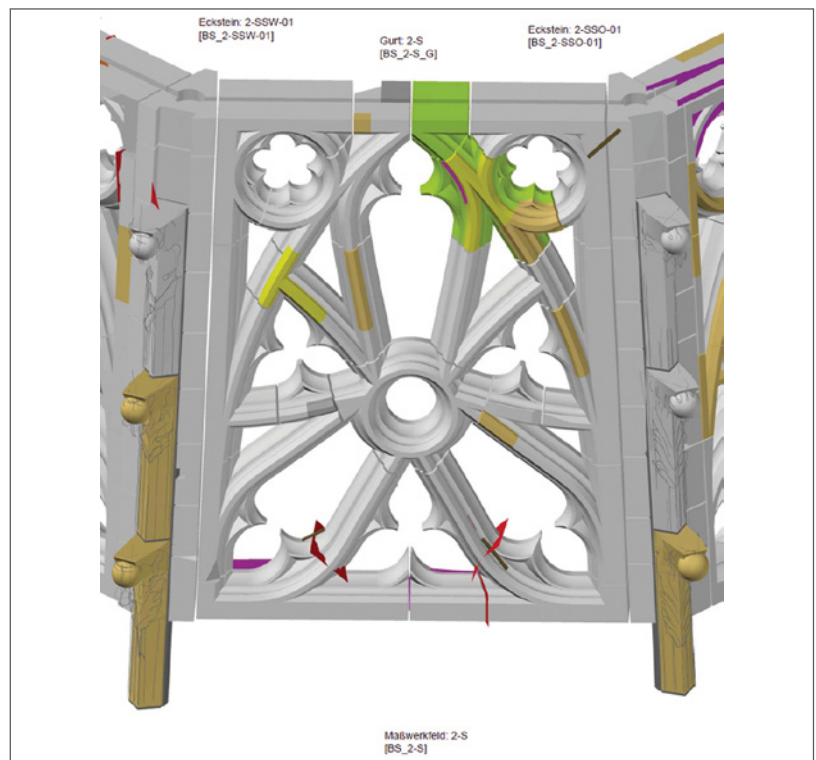
So war z. B. die Kombination von sehr weichem Kalkmörtel und Schmiedeeisen ideal. Der Kalkmörtel konnte Feuchtigkeit wie ein Löschpapier aufnehmen und diese so vom eingebauten Schmiedeeisen fernhalten, damit es nicht rostet. Allerdings konnte dieser weiche Mörtel schneller von Wind und Regen aus den Fugen herausgewaschen werden und wurde deswegen zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch härtere, zementgebundene Mörtel ersetzt. Die unerwünschte Nebenwirkung war ein Feuchtestau am Eisen, da durch diesen Mörtel keine Feuchtigkeit vom Eisen weggenommen wurde und das Eisen rostete. Auch der Austausch von schmiedeeisernen Klammern der Bauzeit gegen Klammern aus modernem Baustahl führte nicht zum gewünschten Ergebnis einer längeren Haltbarkeit. In Kombination mit dem eisenhaltigen Buntsandstein rosteten diese „modernen“ Stahllegierungen deutlich schneller als das mittelalterliche Schmiedeeisen. Heutige Stahlsorten bestehen aus Legierungen unzähliger Bestandteile, die unkontrolliert mit ihrer Umgebung reagieren können, während im bauzeitlichen Schmiedeeisen nur Eisen vorhanden ist, was keine Verbindungen mit anderen Materialien mehr eingeht und dadurch auch viel weniger korrodiert.

Die Schäden, die durch Verwitterung, Alterungsprozesse und den Einsatz von falschen Materialien entstanden sind, waren in dieser Form teilweise erwartet und weniger überraschend. Sie sind reparabel und stellen die Dauerhaftigkeit des Turmes nicht prinzipiell in Frage. Größere Sorgen bereiteten die Risse, die sowohl in den Ecksteinen als auch in zahlreichen Maßwerksteinen entstanden sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass es sich um statische Überlastung an den je-

weiligen Stellen handelte. In der Abwägung, ob diese durch ein einmaliges Ereignis (Erdbeben, Blitzeinschläge) hervorgerufen wurde oder durch die gleichförmige Belastung über Jahrhunderte hinweg, tendierte man zur zweiten Erklärung. Die horizontal angreifenden Windkräfte führten zu ständigen Bewegungen der Gesamtkonstruktion, was deswegen irgendwann einmal dazu führte, dass einzelne Steine nachgaben.

Die Aufgabe bestand nun darin, das gesamte System der Turmhelmkonstruktion als solches so zu ertüchtigen, dass seine im Laufe der Zeit nachlassende Standfestigkeit wieder auf ein sicheres Niveau angehoben wird. Doch dafür musste die Bestandsaufnahme der statischen Schäden präziser und umfassender erfolgen. Dank der Unterstützung des Landesamtes für Denkmalpflege wurde vom Ingenieurbüro Barthel & Maus ein digitales dreidimensionales Modell erstellt, in das selbst die kleinsten Risse und Bewegungen millimetergenau eingetragen wurden. (Bild 14) Erst diese Gesamtübersicht ermöglichte die Bewertung der einzelnen Schäden und die Auswirkungen auf die Gesamtstatik.

Bild 14
Ausschnitt aus
der 3-D-Kartierung



Die Sanierungsmaßnahmen

Auf der Grundlage der Bestandserfassung und der Ursachenforschung wurde ein umfassender Maßnahmenplan entwickelt, der sowohl die Konservierung des Bestandes, den Austausch stark geschädigter Steine sowie auch die Konsolidierung des Tragwerkes umfasste.

Bei den konservierenden und restaurierenden Arbeiten handelt es sich um Maßnahmen, die von der Münsterbauhütte seit vielen Jahren ausgeführt werden und die dazu dienen, die Originalsubstanz des Steinwerkes solange wie möglich vor Ort zu erhalten. Am Turmhelm hatte Dipl. Restaurator Luzius Kürten die Verantwortung für das Konservierungskonzept. Schäden an der Oberfläche des Steinwerkes wurden mit entsprechenden Maßnahmen behoben. So wurden z. B. kleinere Risse mit speziellen Massen verfüllt oder mit schmalen Dübeln überbrückt und Fehlstellen mit Restauriermörteln ergänzt, um die Wasserableitung zu gewährleisten. (Bild 15) Die Reparatur von mehreren Kilometern Mörtel- und Bleifugen waren ebenfalls Bestandteil der Restaurierung.

Es flossen auch neue Erkenntnisse in das Konzept ein, vor allem im Bereich der einzusetzenden Reparaturmaterialien. Wie festgestellt funktioniert

das System am besten mit den ursprünglichen Baumaterialien, die allerdings in dieser Form auf dem Markt nicht mehr oder nur selten zur Verfügung standen. So musste Schmiedeeisen zunächst aus England importiert werden, bis ein Lieferant in Deutschland gefunden wurde, der dieses Metall unter der Bezeichnung C 15 anbieten konnte.

Bei statisch relevanten Stellen ließ sich dieses Eisen jedoch nicht einsetzen, da es nicht in dem notwendigen Maß berechenbar war. Nach ausführlicher Recherche und weiteren Untersuchungen fiel die Wahl auf eine bestimmte Titanlegierung, die all den Anforderungen an Stabilität, Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitungstechnik und Farbgebung entsprach.

Langwierig war auch die Suche nach einem geeigneten Mörtel, der auf der Basis von Romazement eigens entwickelt wurde. Romazement besteht aus tonhaltigem Kalkstein und lässt sich nicht mit dem bekannten Portlandzement vergleichen. Für den Anwendungsbereich am Münster war dieses Bindemittel die beste Wahl, da der Mörtel elastisch bleibt, dadurch weniger rissanfällig ist und bei Wasserzufuhr nachhärtet. Der einzige Nachteil besteht in der Verarbeitung, da der Fugenmörtel lange feucht gehalten werden muss, damit er beim Trocknen nicht schwindet und reißt.



Bild 15
Rissverfüllung per Injektion

Bild 16
Frisch eingesetzte
Vierungsstücke

Bei der Wahl des geeigneten Sandsteines konnte auf die Ergebnisse der Versuche und Untersuchungen zurückgegriffen werden. Ausschlaggebend war eine hohe Druckfestigkeit, ein quarzitisches Bindemittel und ein dem Originalstein ähnliches Wasseraufnahmeverhalten. Gefunden wurde der passende Stein im Neckartal, nahe Heidelberg, der dem eingebauten originalen Stein am Münsterturm sehr ähnlich ist. Die Wahl des richtigen Steines war auch wichtig im Hinblick auf die über 200 Vierungen (Teilergänzungsstücke) die ersetzt werden mussten. (Bild 16)

Statische Konsolidierung

Die größte Herausforderung stellte die statische Konsolidierung dar, da Maßnahmen in diesem Umfang bislang noch nie umgesetzt wurden. Im ersten Erschrecken über die Erkenntnis, dass der Turmhelm Unterstützung benötigt, wurde als erster Lösungsansatz vorgeschlagen, die Maßwerkkonstruktion auf der gesamten Höhe mit mehreren Stahlgurten zu umschlingen. Außer der optischen Beeinträchtigung durch ein außenliegendes Korsett, dem auch einige Originalkrabben zum Opfer gefallen wären, war schließlich die nicht eindeutig belegbare Wirksamkeit dieses Eingriffs ein Grund dafür, nach geeigneten Alternativen zu suchen. Für die Entscheidungsfindung haben sich alle Beteiligten mit viel Zeit, Kreativität und alternativen Lösungsansätzen dem Problem aus unterschied-

lichen Richtungen genähert. Nach ausführlichen Diskussionen und in Abwägung verschiedener Möglichkeiten entwickelte sich bei allen Beteiligten Einigkeit darin, dass eine Lösung, die nicht den einen großen Eingriff, sondern zahlreiche kleine, präzise Maßnahmen vorsah, dem Bauwerk angemessener sein würde. Nach umfangreichen und mehrfach überprüften statischen Berechnungen durch das Ingenieurbüro Barthel & Maus wurde ein Konzept entwickelt, das vorsah, nur an den Stellen, die Spuren von Überlastung zeigten, die Substanz zu verstärken. Unterschiedlichste Maßnahmen wurden dazu detailliert entwickelt und Schritt für Schritt von den Steinmetzen und Restauratoren umgesetzt.

Als Hilfsmittel wurden in der Regel Klammern, Dübel und Platten aus Titan eingesetzt. Mit diesen Metallteilen konnte man z. B. aufgespaltene Maßwerksteine kraftschlüssig miteinander verbinden und größere Risse überbrücken.

Ecksteine, die lediglich angerissen waren, erhielten ihre Tragkraft durch eine doppelte Verdübelung mit Gewindestangen aus Titan, die kreuzförmig durch den Stein geführt und an den Außenseiten mit Platten fixiert werden (Bilder 17 a, b). Dazu waren äußerst präzise Bohrungen auf bis zu 70 cm Länge notwendig, die von zwei Mitarbeitern des Turmteams durchgeführt wurden. Insgesamt wurden diese sogenannten Bandagen an 16 Ecksteinen angebracht und ermöglichten so den Erhalt der Originale an dieser Stelle.

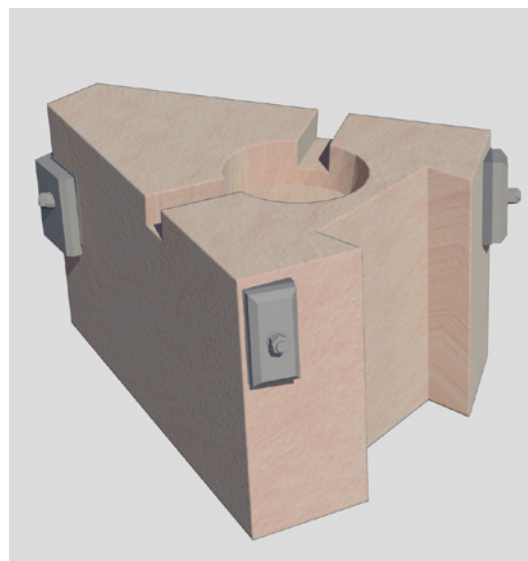
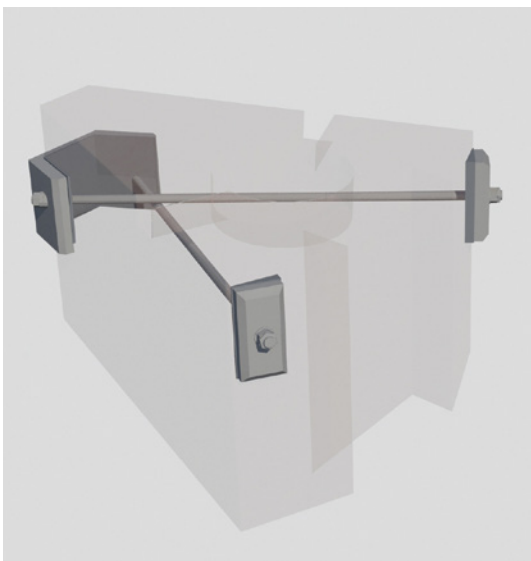


Bild 17 a+b
Darstellung des Prinzips der Verdübelung mit Titangewindestangen

Austausch Ecksteine

Bild 18

Ansicht der Titanplatten
von außen

Bild 19

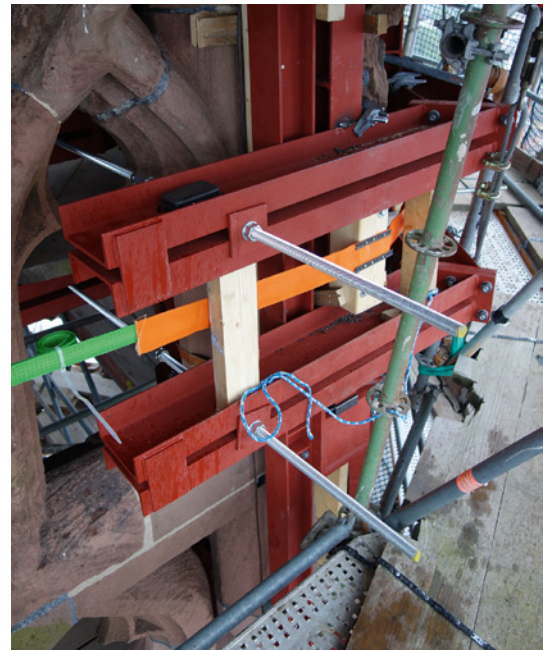
Ausgebauter zerrissener
Eckstein

Bild 20

Unterfangungskonstruktion für
den Ausbau eines Ecksteins

Acht Ecksteine waren bereits ganz durchgerissen, sie mussten deshalb ausgebaut und durch neue ersetzt werden (Bild 18). Diese Maßnahme war die aufwändigste und auch aufregendste der gesamten Turmsanierung. Dieser Eingriff in die Statik wurde in den 700 Jahren Standzeit des Turmes bislang noch nie vorgenommen. Aus diesem Grund wird dieser Arbeitsschritt hier etwas ausführlicher beschrieben:

Konstruktionsbedingt ist es schwierig, einen Eckstein aus dem Gefüge zu lösen, da der Ringanker in der Vertiefung des Steines liegt und dieser nicht nach außen, sondern nur nach unten weggezogen werden kann. Das bedeutet, dass auch der unter dem Eckstein liegende Strebenstein ausgebaut werden musste. Außerdem lastet auf diesen Ecksteinen ein Gewicht von bis zu 40 Tonnen, das für die Zeit des Austausches aufgefangen und seitlich abgeleitet werden muss. Dafür wurde von den Tragwerksingenieuren eine spezielle Stützkonstruktion aus mächtigen Stahlprofilen entworfen. Bis zu sechs Meter lange Stahlstützen wurden an der Innen- und an der Außenseite an der Strebe entlanggeführt, mit querliegenden Stahlträgern untereinander verbunden und an die Turmstreben angedrückt (Bild 20). Durch den erzeugten Reibungsdruck war der betroffene Eckstein entlastet und konnte ausgebaut werden (Bild 19). Der neu geschlagene Eckstein mit einem Gewicht von ca. 250 kg wurde auf Walzen an seinen Platz geschoben und passgenau in die Lücke platziert. Anschließend wurde der Ringankerraum im Eckstein sorgfältigst mit Blei vergossen, damit keine Hohlräume entstehen. Doch damit war die Prozedur des Ecksteinaustausches noch nicht beendet, denn der Mörtel der beiden unteren Lagerfugen benötigte zunächst 28 Tage Aushärtezeit, um die erforderliche Druckfestigkeit zu entwickeln. Erst danach wurde die oberste Lagerfuge über dem



Eckstein vermörtelt, nachdem man diese Fuge mittels Stahlkeilen mit definierter Kraft um ein Zehntel Millimeter auseinandergedrückt hatte. Dieses minimale Anheben der Strebe an dieser Stelle stellte einen erheblichen Eingriff in das Gesamtgefüge dar, war aber notwendig, um das Zusammensacken des Mörtels nach dem Aushärten auszugleichen.

Anschließend mussten weitere 28 Tagen Aushärtezeit abgewartet werden, bevor das gesamte Gewicht wieder auf den Eckstein geführt wurde, der damit seine tragende Aufgabe für die nächsten Jahrhunderte übernahm. Beim ersten Eckstein war dieser Augenblick so spannend, dass alle Beteiligten kurze Zeit den Atem anhielten und wie gebannt auf die Messeinrichtung starteten, mit der überprüft wurde, ob das Gefüge wie geplant im Gleichgewicht blieb. Glücklicherweise zeigte das hochsensible Messgerät keinerlei Bewegung an. In der kühleren Jahreszeit konnte der Eckstein dann noch immer nicht sich selbst überlassen bleiben, denn der Mörtel benötigte insgesamt 90 Tage zur Aushärtung, in denen die Temperatur nicht unter +5 Grad Celsius sinken durfte. Dies wurde mit Hilfe einer Palmenheizung, Mineralwolle und Regenschutz sichergestellt.

Insgesamt wurden für den Austausch eines einzigen Ecksteines mit allen Vor- und Nachbereitungen circa vier Monate benötigt. Auch wenn nicht alle Maßnahmen so aufwändig waren wie der Eck-

steintausch, galten für alle Eingriffe die gleichen Prämissen: Sorgfalt, Qualität und Nachhaltigkeit.

Insgesamt wurden 121 größere und kleinere Steine ersetzt und weitere 225 Vierungen (Teilstücke) ausgetauscht. Dabei waren nur ganz wenige bauzeitlich, die meisten ersetzten Steine stammten aus den Sanierungsepochen um 1920 und 1960. (Bild 21)

Schlussbetrachtung

Dass die Umsetzung des Gesamtkonzeptes gelang, war allen Beteiligten zu verdanken: den externen Beratern und Kollegen, die immer wieder bereit waren, getroffene Entscheidungen zu diskutieren und zu hinterfragen, wenn neue Erkenntnisse dies erforderten und natürlich dem Turmteam aus Steinmetzen und Restauratoren, die mit größter Hingabe und unter teilweise widrigen Umständen größtes Engagement, umfangreiches Fachwissen sowie Kreativität und unendliche Geduld eingebracht haben.

Das Ende der Sanierung ruft unterschiedliche Gefühle hervor. Dankbarkeit dafür, dass die Arbeiten ohne Zwischenfälle abgeschlossen und Erleichterung, dass die schwierigen Herausforderungen bewältigt werden konnten. Aber ein wenig Wehmut ist auch dabei, denn die Sanierung ermöglichte



Bild 21
Einbau eines neu geschlagenen Maßwerksteins

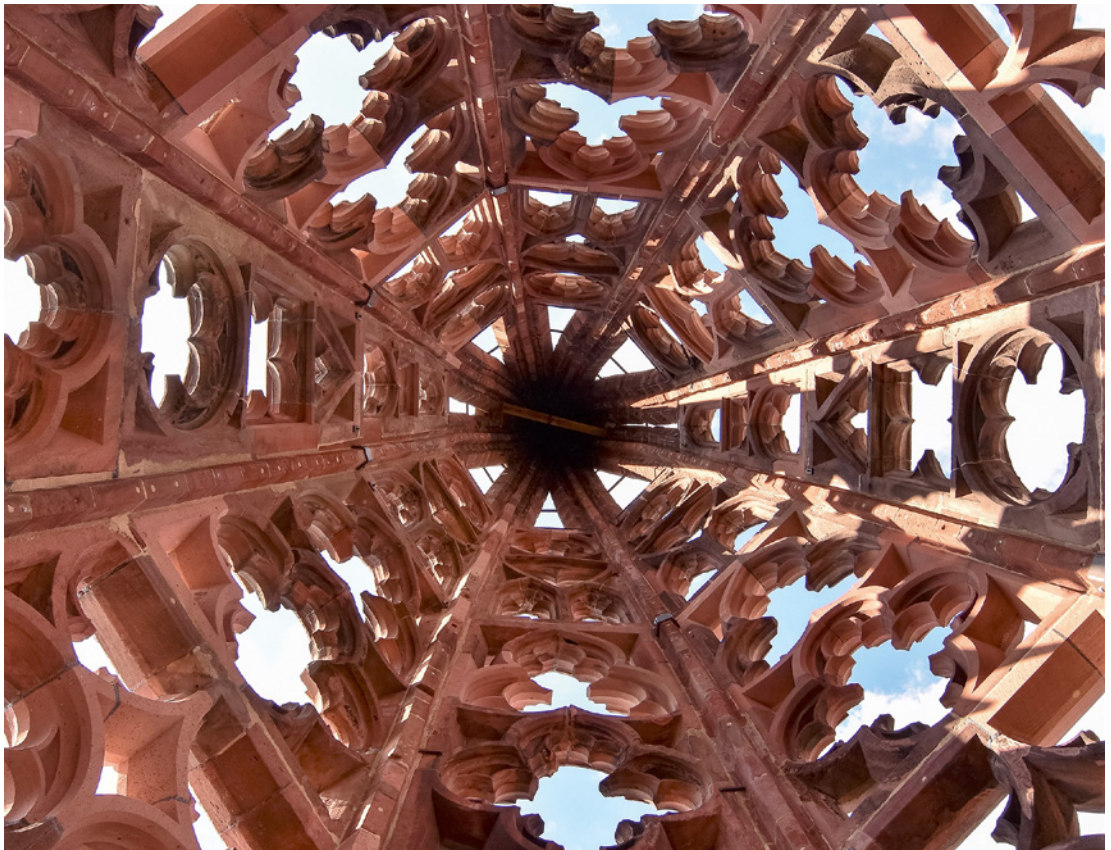


Bild 22

Blick in die sanierte Helmspitze,
Aufnahme August 2017

auch ganz besondere Erlebnisse. So ist ein Besuch an der Wetterfahne so schnell (hoffentlich!) nicht mehr möglich, genauso wenig wie das außergewöhnliche Raumempfinden auf dem obersten Gerüstboden innerhalb des Maßwerkhelmes. (Bild 22)

Abbildungen

Bilder 8, 14, 17 a, b: Barthel & Maus

Bild 12: Wacker-Ingenieure

Alle anderen Abbildungen: Archiv Münsterbauverein

Bau-Ing. Thomas **Bauer**
Bauingenieur
bauer lauterbach GmbH Beratende Architekten
und Ingenieure für Historische Rekonstruktionen
Tiergartenstraße 72, 01219 Dresden
bauer@schlingrippe.de

Dipl. Geol. Thorsten **Behrendt**
Sandner Architekten
Heisterbacher Str. 20, 53639 Königswinter
t.behrendt@sandner-architekten.de

Prof. Dr. phil. Stefan **Bürger**
Professur für Kunstgeschichte
Institut für Kunstgeschichte
der Universität Würzburg
Am Hubland, 97074 Würzburg
stefan.buerger@uni-wuerzburg.de

Dipl.-Ing. Heike **Dreuse**
Materialforschungs- und -prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität
Coudraystraße 9, 99423 Weimar
heike.dreuse@mfpa.de

Yvonne **Faller**
Architektin, Münsterbaumeisterin
Freiburger Münsterbauverein e. V.
Schoferstraße 4, 79098 Freiburg
faller@muensterbauverein-freiburg.de

Prof. Dr. rer. nat. Gabriele **Grassegger**
Professur für Baustoffkunde
Sanierungstechnik, Untersuchung v. Baudenkmälen,
„ConservationSciences“, Hochschule für Technik (HFT)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
Gabriele.Grassegger-Schoen@hft-stuttgart.de

Dipl.-Ing. (FH) Alban **Huschenbeth**
Denkmalpflege Mühlhausen
Alban Huschenbeth GmbH & Co.KG
Thomas-Müntzer-Straße 15, 99974 Mühlhausen
a.huschenbeth@denkmalpflege-muehlhausen.de

Albert **Kieferle**
Restaurator
AeDis AG für Planung,
Restaurierung und Denkmalpflege
Lerchenweg 21, 73061 Ebersbach-Roßwälden
a.kieferle@aedis-denkmal.de

Dipl.-Ing. Jörg **Lauterbach**
Architekt
bauer lauterbach GmbH Beratende Architekten
und Ingenieure für Historische Rekonstruktionen
Tiergartenstraße 72, 01219 Dresden
lauterbach@schlingrippe.de

Tobias **Neubert**
Steinrestaurierung Tobias Neubert
Bereich Gutachten
Am Schulberg 1a, 09633 Halsbrücke
kontakt@steingutachten.com

Holger **Probst**
Architekt und Projektleiter
Vermögen und B.-W., Amt Pforzheim
Simmlerstraße 9, 75172 Pforzheim
holger.probst@vbv.bwl.de

Peter **Reiner**
Architekt
AeDis AG für Planung,
Restaurierung und Denkmalpflege
Lerchenweg 21, 73061 Ebersbach-Roßwälden
p.reiner@aedis-denkmal.de

Dr. Christoph **Reuther**
Steinrestaurierung Tobias Neubert
Bereich Gutachten
Am Schulberg 1a, 09633 Halsbrücke

Dipl.-Ing. Markus **Sandner**
Architekt
Sandner Architekten
Heisterbacher Str. 20, 53639 Königswinter
m.sandner@sandner-architekten.de

Barbara **Schmitz** M.Sc.
Architektin
Sandner Architekten
Heisterbacher Str. 20, 53639 Königswinter
b.schmitz@sandner-architekten.de

Dipl.-Ing. Stefan **Zeuch**
Stadtverwaltung Mühlhausen
Fachbereich Gebäude- und Grundstücksverwaltung
Ratsstraße 25, 99974 Mühlhausen
stefan.zeuch@muehlhausen.de

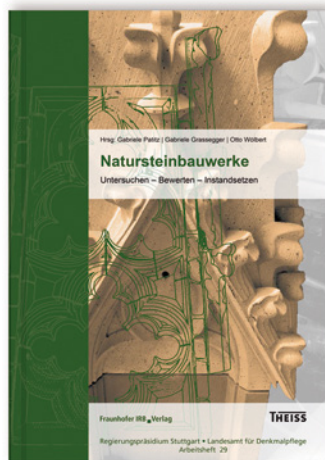
Felipe **Valderrama**
Luft- und Raumfahrtingenieur
Executive Assistant CEO bei HYDRO Systems KG
Ahfeldstraße 10, 77781 Biberach
Felipe.Valderrama@hydro.aero

Dr.-Ing. Hans-Werner **Zier**
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der
Bauhaus-Universität
Coudraystraße 9, 99423 Weimar
hans-werner.zier@mfpa.de

Otto **Wölbert**
Restaurator für Stein
Landesamt für Denkmalpflege am RP Stuttgart
Abteilung: Restaurierungswerkstatt
Berliner Str. 12, 73728 Esslingen
otto.woelbert@rps.bwl.de

Dr. Dagmar **Zimdars**
Hauptkonservatorin
Landesamt für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Referat 83.2 Bau- und Kunstdenkmalpflege
Sternwaldstr. 14, 79102 Freiburg
dagmar.zimdars@rps.bwl.de

Umfassendes Wissen für Natursteinbauwerke

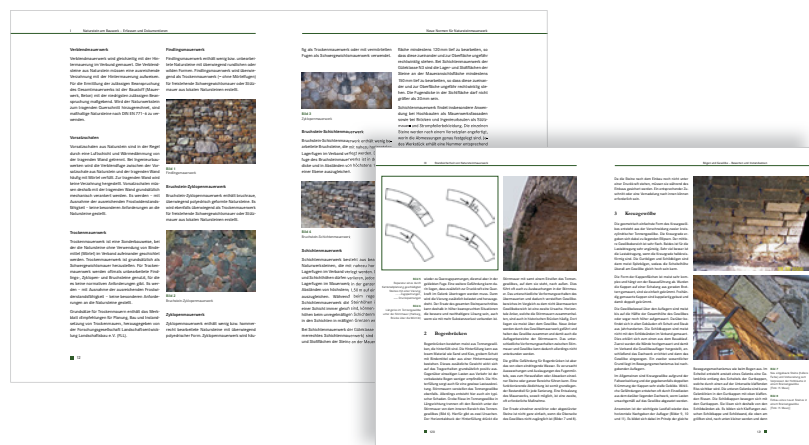


Natursteinbauwerke

Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen

Die Bausubstanz vieler Natursteinbauwerke ist durch Umwelteinflüsse gefährdet. Für die Erfassung und Bewertung von Schäden sowie für die Planung und Ausführung von Instandsetzungen ist ein umfassendes Fachwissen erforderlich, das dieses Buch liefert. Es befasst sich ausführlich mit der Bestandsaufnahme am Gebäude, der Kartierung von Schäden sowie geeigneten Sanierungsmaßnahmen. Die zahlreichen Autoren gehen dabei gezielt auch auf planerische Aspekte, Strategien zur Schadensprävention und aktuelle Normen ein.

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2014, 300 Seiten, zahlr. Abb. und Tab., Softcover
ISBN 978-3-8167-9196-6



Direkt online bestellen:
www.baufachinformation.de

Nobelstraße 12 ■ 70569 Stuttgart ■ irb@irb.fraunhofer.de ■ www.baufachinformation.de

Natursteinbauwerke im Mittelpunkt



Natursteinsanierung Stuttgart 2018

Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse
und messtechnische Erfassungen

Die fortschreitende Digitalisierung und neue baustofftechnologische Entwicklungen aus der Nanotechnologie verändern auch die Instandsetzung von Natursteinbauwerken. Dank moderner Verfahren sind die täglichen Herausforderungen bei Bestandserfassung, Voruntersuchung, Planung und Ausführung immer besser zu meistern. Die Beiträge der 24. Fachtagung »Natursteinsanierung« befassen sich mit Qualitätsstandards für die zeitgemäße Bauaufnahme und geben Einblick in die neuesten Methoden der behutsamen Natursteininstandsetzung und -instandhaltung an ausgewählten Bauwerken.

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert

136 Seiten, 171 Abb., 5 Tab., Softcover

ISBN 978-3-7388-0098-2 | € 29,–

Zur Vervollständigung Ihrer Bibliothek – die Tagungsbände der Jahre 2010 bis 2017

Natursteinsanierung Stuttgart 2017

112 Seiten, 168 Abb., 8 Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-9863-7

Natursteinsanierung Stuttgart 2016

132 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-9598-8

Natursteinsanierung Stuttgart 2015

136 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-9404-2

Natursteinsanierung Stuttgart 2014

128 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-9167-6

Natursteinsanierung Stuttgart 2013

120 Seiten, zahlr. teilw. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-8924-6

Natursteinsanierung Stuttgart 2012

160 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-8660-3

Natursteinsanierung Stuttgart 2011

156 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-8461-6

Natursteinsanierung Stuttgart 2010

196 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Softcover

ISBN 978-3-8167-8254-4

Direkt online bestellen:

www.baufachinformation.de

Nobelstraße 12 ■ 70569 Stuttgart ■ irb@irb.fraunhofer.de ■ www.baufachinformation.de

ISBN 978-3-7388-0243-6



9 783738 802436

Hochschule
für Technik
Stuttgart

Fakultät B, Bauingenieurwesen
Denkmalschutz-Untersuchungen
Labor für Bauchemie



IGP Ingenieurbüro
Dr. Ing. Gabriele Patitz

in Zusammenarbeit mit



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART
LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE