

Tagung 13./14. März 2020 in Karlsruhe/Köln

2020

NATURSTEIN SANIERUNG

Fraunhofer IRB Verlag

Gabriele Patitz, Karin Schinken (Hrsg.)

NATURSTEINSANIERUNG 2020

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse,
messtechnische Erfassungen
und Sanierungsbeispiele**

Tagung am 13./14. März 2020 in Karlsruhe/Köln

Herausgeber

Dr.-Ing. Gabriele Patitz
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe
Telefon: (0721) 3 84 41 98
E-Mail: info@natursteintagung.de
www.natursteintagung.de

Karin Schinken, M.A.
Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart
Referat Spezialgebiete - Fachbereich Restaurierung
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen am Neckar
Telefon: (0711) 90 44 54 28
E-Mail: karin.schinken@rps.bwl.de

Lektorat

Dr. Steffie Gawlik – Karlsruhe

Herstellung

Andreas Preising

Layout und Satz

Manuela Gantner | Punkt, STRICH. – Karlsruhe

Druck und Bindung

RCOM Print GmbH, Würzburg-Rimpar

Einband

Foto: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte

1. Auflage

2020 Fraunhofer IRB Verlag,
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

ISBN (Print): 978-3-7388-0415-7

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0416-4

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 Dr. Patitz und Frau Schinken 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 der 26. Fachtagung Natursteinsanierung,
liebe Leserinnen und Leser,**

sehr herzlich begrüßen wir Sie zwar an einem neuen Veranstaltungsort in Karlsruhe, setzen jedoch Bewährtes fort. Mit den Vorträgen, der Posterausstellung, den Informationsständen und Beiträgen im vorliegenden Tagungsband werden Ihnen aktuelle Themen und Arbeitsschwerpunkte aus Forschung und Praxis präsentiert. Wir wollen Sie als Denkmalpfleger, Restauratoren, Naturwissenschaftler, Architekten, Ingenieure, ausführende Firmen sowie Kollegen und Kolleginnen aus Forschung und Lehre ansprechen und zu einem interdisziplinären Austausch einladen. Aktuelle Fachliteratur wird Ihnen an den Ausstellerständen des Fraunhofer IRB Verlages und des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg präsentiert.

Im Fokus der diesjährigen Exkursion stehen der Kölner Dom und seine Bauhütte. Zwei Vorträge, ergänzt durch Posterpräsentationen, führen in laufende Maßnahmen an diesem weltberühmten Kulturdenkmal ein. Vor Ort besteht die Möglichkeit, sich an thematischen Führungen, die aktuelle Instandsetzungsarbeiten zeigen und Diskussionen ermöglichen, zu beteiligen.

Zwei Referenten stellen ihre Recherchen, Arbeiten und umfangreichen Untersuchungen zu Mörteln in z. T. denkmalgeschütztem Mauerwerk vor. Ein von der DBU gefördertes Projekt befasst sich mit Nachuntersuchungen von Sanierungsmaßnahmen an gipshaltigem Mauerwerk. Bei einem süddeutschen Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung mussten für etwa 1.600 Grabsteine aus verschiedenen Natursteinen Konservierungskonzeptionen erarbeitet, erprobt und bewertet werden. Belastungsversuche als Basis für statische Sicherungen erfolgten an einer mit Naturstein verkleideten Eisenbahn-Stampfbetonbrücke. Erdbebengefährdete Pfeiler und Türme erfordern für diese Beanspruchungsart ganz spezielle Überlegungen und Instandsetzungsmaßnahmen. Renaissancebauteile aus Gotländer-Sandstein der Dorfkirche Semlow erhielten Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen und eine Kaskadenanlage im Garten des Schlosses Linderhof von König Ludwig II ist nach alten Vorbildern wieder hergestellt worden.

Mit diesen ausgewählten und breit gefächerten 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 und Karin Schinken

Inhalt

Peter Füssenich	Die Kölner Dombauhütte	7
Albert Distelrath Matthias Deml Tanja Pinkale	Die Restaurierung des Michaelportals am Kölner Dom	15
Boris Froberg Claudia Dietze	Festigung von Renaissancebauteilen aus Gotländer-Sandstein in der Dorfkirche Semlow	25
Maurus Baldermann Juliane Weigele Judit Zöldföldi	Hoppenlau-Friedhof Stuttgart 1.600 Grabsteine – Schadenserfassung, Konzeption und Planung der Konservierung	39
Toralf Burkert Angela Eckart	Gipshaltiges Mauerwerk Bewertung des langfristigen Sanierungserfolges auf der Basis von Nachuntersuchungen	59
Marc Gutermann Andreas Wasjuta Konstantin Tiefenthaler	Experimentell gestützter Nachweis einer mit Naturstein verkleideten Eisenbahn-Stampfbetonbrücke	73
Axel Dominik Pascale Dominik	Untersuchungen zur Sicherung eines Natursteinmauerwerks an einer denkmalgeschützten Autobahnbrücke	85
Ulrich Bauer-Bornemann	Schloss Linderhof – Wiederherstellung der Kaskadenanlage	101
Ronald Betzold	Statische Sicherungen erdbebengefährdeter Pfeiler und Türme in Basel (CH) und auf der Schwäbischen Alb	111
	Autorenverzeichnis	125



Die Kölner Dombauhütte

Die Kölner Dombauhütte ist eine der großen aber bei weitem nicht die einzige Dombauhütte. In vielen Ländern Europas gibt es zahlreiche Bauhütten, die teilweise sogar ohne Unterbrechung seit dem Mittelalter fortbestanden haben.

Ohne die europäischen Bauhütten wäre der Erhalt der Kathedralen und anderer großer Baudenkmäler, die einen wesentlichen Teil des europäischen Kulturerbes bilden, kaum denkbar. Bis heute stehen sie in der Tradition der mittelalterlichen Bauhütten und geben ihr unschätzbare Fachwissen und ihre Traditionen von Generation zu Generation weiter und sind damit Garantie für den Erhalt der Gesamtkunstwerke.

Peter Füssenich

Geschichte des Kölner Dombaues und der Kölner Dombauhütte im Mittelalter

Mit der Grundsteinlegung für den heutigen hochgotischen Dom (Bild 1) im Jahr 1248 schlägt die Geburtsstunde der Kölner Dombauhütte. Die Ostteile des alten Domes waren in diesem Jahr abgebrochen worden. An ihrer Stelle sollte zunächst der Domchor gebaut werden, in dem die Gottesdienste gefeiert wurden.

Angestrebt war die Errichtung eines Domes, der alle älteren Kathedralen Europas an Größe und Pracht übertreffen sollte. Bereits 1322 (Bild 2) konnte der Domchor mit seinem Umgang und seinen Kapellen feierlich geweiht werden. Bald nach seiner Vollendung begann der Bau des Querhauses, des Langhauses und der Türme.

Zuständig für den Bau des Domes war bereits im Mittelalter die Dombauhütte, eine Gemeinschaft von Handwerkern und Künstlern unterschiedlicher Fachrichtungen, die eng vernetzt zusammenarbeiteten. Mit »Bauhütte« bezeichnete man einerseits

den Werkhof neben einem großen Bau – zumeist einem Kirchbau – andererseits auch die darin arbeitenden Werkleute und ihre Organisation, die im Vergleich zu den städtischen Zünften überregionale Rechtsbefugnisse besaß.

Die größte Gruppe waren die Steinmetzen, aus denen auch der Dombaumeister hervorging. Sie stellten sämtliche Werkstücke aus Stein aber auch Bauskulpturen, so vor allem die Wasserspeier und die zumeist Blattwerkornamentik zeigende Bauzier her. Fast ebenso wichtig waren die Zimmerleute, die nicht erst beim Bau des Dachstuhles gefragt, sondern von Anfang an auf der Baustelle tätig waren. Die riesigen, im Südturmbereich über 16 Meter tiefen Fundamentgruben mussten mit Schalbrettern und Balken abgestützt werden, damit das Erdreich nicht ins Rutschen geriet und die Arbeiter nicht verschüttet wurden. Gerüste, Hüttengebäude und Baumaschinen bis hin zum gewaltigen Domkran auf dem Südturm mussten erstellt werden. Hilfsarbeiter, die Steine, Mörtel und anderes Baumaterial über steile Leitern und Schrägen nach oben trugen, über Winden nach oben zogen und in Laufträdern gehend den Kran antrieben, waren eine



Bild 1
Köln, Dom,
Ansicht von Nordwesten

weitere Berufsgruppe an einer Kathedralbaustelle. Von zentraler Bedeutung waren die Schmiede, welche die eisernen Werkzeuge erstellten und reparierten. Von ihnen stammten auch wichtige Bauelemente wie die Windeisen der Fenster, die nicht nur für die Befestigung der Fensterscheiben dienten, sondern auch für die Statik der Architektur notwendig waren. Am Domchor sind sie zum Teil durch die Pfeiler hindurchgeführt und bilden einen umlaufenden Ringanker, der gemeinsam mit dem aus Strebebögen und Strebepfeilern bestehenden Strebewerk die himmelstrebende Architektur der Kathedrale zusammenhält. Hinzu kamen zu den entsprechenden Zeiten Dachdecker, Anstreicher und Verputzer.

Um 1520 (Bild 3) geriet der Bauprozess ins Stocken und wurde für über 300 Jahre eingestellt. Zu diesem Zeitpunkt waren Lang- und Querhaus gerade bis auf Höhe der Seitenschiffe hochgezogen. Während die Mauern des Nordturmes nur wenige Meter hoch gebaut waren, war der Südturm immerhin bis auf eine Höhe von 58 Metern errichtet. Auf dem Stumpf stand noch bis ins 19. Jahrhundert der

mittelalterliche Baukran, der geradezu das Wahrzeichen Kölns war und daran ermahnte, eines ferneren Tages den unterbrochenen Dombau wieder aufzunehmen.

Da das Archiv der mittelalterlichen Dombauhütte seit 1794 verschollen ist, sind die Gründe, die 1520 zum Baustopp führten, nicht bekannt. Mehrere Faktoren dürften ausschlaggebend gewesen sein: Durch die Reformation Martin Luthers war die Finanzierung des Dombaues zusammengebrochen. Wie aus der einzigen in einer Abschrift überlieferten mittelalterlichen Baurechnung des Domes aus dem Jahr 1513/14 bekannt, wurden in diesem Abrechnungsjahr etwa 84 Prozent der für die Finanzierung notwendigen Mittel aus sogenannten Almosenfahrten aufgebracht. Von diesen erhofften sich die Menschen Heilung und Abwehr von Krankheiten und anderen Übeln wie etwa Dürre, Hunger oder Überschwemmungen. In der Zeit der Reformation geriet diese Praxis in Verruf und wurde schließlich auch bei den Katholiken verboten. Damit hatte der Dombau seine finanzielle Basis verloren.



Bild 2
Köln, Dom, Dombau 1322



Bild 3
Köln, Dom, Dombau 1520

Die Architektur des Domes galt zudem seit dem 16. Jahrhundert als altmodisch. Um 1520 wurde sich in Deutschland verstärkt an Architekturformen der italienischen Renaissance orientiert. Gotische Architektur galt hingegen als unmodern und barbarisch. Somit war wohl auch aus künstlerischen Gründen das Interesse gering, einen solch altmodischen Bau fortzuführen.

Geschichte des Kölner Dombaus und der Kölner Dombauhütte im 19. Jahrhundert

Die negative Bewertung des gotischen Baustils änderte sich erst im späten 18. Jahrhundert, als in vielen europäischen Ländern mittelalterliche Architektur wiederentdeckt wurde. Dass in dieser Zeit das Interesse an den authentischen gotischen Bauzeugnissen wuchs, erklärt sich damit von selbst.

Bild 4

Köln, Dom, Georg Osterwald, Grundsteinlegung zur Domvollendung 1842



Einer der wichtigsten Vorreiter für die Wiederentdeckung der Gotik in den deutschsprachigen Ländern war kein Geringerer als der junge Johann Wolfgang von Goethe. 1773 verfasste der gerade einmal 24-jährige, dennoch aber schon als berühmter Schriftsteller gefeierte Goethe unter dem Titel »Von Deutscher Baukunst« ein feuriges Traktat über das Straßburger Münster und dessen Baumeister Erwin von Steinbach. Bedeutend ist Goethes Traktat vor allem deshalb, weil sich viele Zeitgenossen von seiner Begeisterung anstecken ließen und der lange Zeit verachtete Baustil wieder in Mode kam.

Gleichzeitig waren diese Jahre der Wiederentdeckung mittelalterlicher Architektur auch die Zeit der größten Gefährdung für die Kathedralen Europas und den Kölner Dom. 1794 wurde Köln von den französischen Revolutionstruppen besetzt. Diese waren kirchenfeindlich eingestellt und zerstörten zahlreiche Kunstwerke. Da man für den anhaltenden Krieg gegen die europäischen Monarchien Munition brauchte, wurden die Bleiplatten, mit denen das Chordach gedeckt war, heruntergerissen und zu Kugeln umgegossen. Die Folge war, dass über viele Jahre der Regen in den mittelalterlichen Dachstuhl eindrang und dieser völlig vermoderte und vermorschte. Vor allem aber wurden sämtliche Instandhaltungsarbeiten, die von einer kleinen Schar Handwerker auch nach 1520 fortgeführt worden waren, für etwa 30 Jahre eingestellt. Es gab nun endgültig keine Dombauhütte mehr, die den Bau wenigstens notdürftig wartete und reparierte. Dies führte dazu, dass im Mauerwerk nach wenigen Jahren Sträucher und Bäume wuchsen, die Wasserleitungen nicht gereinigt wurden und bald nicht mehr richtig funktionierten und somit der Verfall des gesamten Bauwerkes rapide voranschritt. Im November 1796 wurde der Dom gänzlich geschlossen; die unvollendeten Bereiche dienten im Winter 1797/98 sogar als Kriegsgefangenenlager für österreichische Soldaten. Wegen des strengen Winters verbrannten sie nahezu die gesamte hölzerne Ausstattung in diesem Bereich.

Die schlimmste Zeit war zwar 1803 überstanden und der Dom wieder geöffnet, aber erst 1823 wurde die Dombauhütte neu gegründet. Sie war in den folgenden 20 Jahren mit der Wiederherstellung des stark vernachlässigten Baues beschäftigt. Auf Betreiben des Kölner Kaufmannsohns und Privat-

gelehrten, Sulpiz Boisserée, konnten in den folgenden Jahrzehnten viele politische, gesellschaftliche und geistige Größen des Landes von der Idee überzeugt werden, den Dom nach über 300 Jahren Baupause endlich zu vollenden.

Am 4. September 1842 legte der König von Preußen, Friedrich Wilhelm IV., den Grundstein zur Domvollendung (Bild 4) mit Bedacht darauf, den Bau möglichst nach den mittelalterlichen Plänen fertigzustellen. Es war ein großes Glück, dass der im frühen 19. Jahrhundert in zwei Hälften geteilte, über vier Meter hohe, um 1280 entstandene Plan der Westfassade in Paris und Darmstadt wiederentdeckt wurde.

Dass es geschafft wurde, den gewaltigen Kathedralbau bis 1880, in nur 38 Jahren, zu vollenden, lag zum einen an der fortschrittlichen Bautechnik, aber auch an der wesentlich größeren Mitarbeiterzahl. Arbeiteten im Mittelalter in der Dombauhütte schätzungsweise 30 bis 40 Handwerker, beschäftigte die Dombauhütte im 19. Jahrhundert zeitweise über 500 Mitarbeiter. Auf Eisenbahnschienen fuhren gewaltige Windenwagen über die Baustelle, mit denen die Werkstücke nach oben gezogen werden konnten. Ab den späten 1860er Jahren kam eine Dampfmaschine zum Einsatz.

Innovativ war vor allem der Eisendachstuhl (Bild 5), der 1860 über Lang- und Querhaus errichtet wurde. Als 1880 die Türme des Domes, ziemlich genau 600 Jahre nach ihrer Planung, vollendet wurden, waren sie mit über 157 Metern für einige Jahre das höchste Bauwerk der ganzen Welt (Bild 6).



Bild 5

Köln, Dom, Chor, Hohes Dach,
Blick in den Dachstuhl,
Ansicht nach Westen

Bild 6

Köln, Dom, Ansicht von Osten,
Domvollendung 1880,
Historische Fotografie 1880

Erhaltung des Domes im 20. Jahrhundert

Die Domvollendung bedeutete keinesfalls das Ende der Arbeiten an der Kathedrale. Nachbesserungen am Bau, die Errichtung neuer, ebenfalls aus Eisen gefertigter Chor- und Seitenschiffdächer, der Abbau der Gerüste und vor allem die Vollendung der Innenausstattung zogen sich noch etwa 20 Jahre lang hin. Auch zum Teil starke Schäden durch die Luftverschmutzung in Köln, verursacht durch Industrieanlagen und den nahegelegenen Hauptbahnhof bedurften der Aufmerksamkeit der Dombauhütte. Bis gegen Ende der 1930er Jahre erneuerte die Dombauhütte unter Leitung von Dombaumeister Bernhard Hertel und seinem Nachfolger Hans Güldenpfennig nahezu das gesamte Chorstrebbewerk.

Kriegszerstörung und Wiederaufbau

Gefährlicher noch als die Verwitterung wurden für den Bestand des Domes die Bombardements des Zweiten Weltkriegs. Als 1945 die Kölner Innenstadt nahezu vollständig zerstört war, ragte aus der Ferne gesehen der Dom zwar scheinbar unversehrt

aus der Trümmerwüste (Bild 7). Bei näherer Betrachtung zeigte sich aber, welch schwere Schäden der Bau in Wirklichkeit davongetragen hatte. Dombaumeister Weyres entschied sich damals für einen freien Umgang bei der Wiederherstellung zerstörter Bauteile: Nur die grobe Umrissform sollte gewahrt bleiben. Ansonsten aber war es den Steinmetzen und Bildhauern der Dombauhütte gestattet, an Stellen, wo ursprünglich Blattornamentik vorherrschte, figürlichen Schmuck anzubringen und die Formen zu modernisieren. So wurden bis in die 1970er Jahre etliche Mitarbeiter der Dombauhütte und sogar deren Familienangehörige am Kölner Dom verewigt. Es gibt aus dieser Zeit zum Beispiel auch ein Kapitell, das Fußballspieler zeigt, eine Darstellung des Geißbocks »Hennes«, des Maskottchens des Kölner Fußballvereins 1. FC Köln, Darstellungen von Figuren des Kölner Karnevals sowie alle möglichen Arten von Tieren und vieles mehr.

Auch der in seiner eisernen Konstruktion bis heute erhaltene Vierungsturm von 1860 erhielt Anfang der 1960er Jahre eine moderne Außenverkleidung aus Blei. Die Neugestaltung des Turmes hat durchaus einen eigenständigen künstlerischen Wert und ist ein typisches Denkmal der Nachkriegszeit, das es zu erhalten gilt. Dennoch trauern auch heute noch viele Kölner der ursprünglichen, sehr viel kleingliedrigen und filigranen Gestaltung des Originalturmes von Ernst Friedrich Zwirner nach.

Heute wird bei Wiederherstellungsarbeiten am Dom seit den 1970er Jahren zumeist wieder rekonstruierend vorgegangen. Durch Krieg und Verwitterung zerstörte Elemente werden wieder in der ursprünglichen Form hergestellt – zumindest soweit das Aussehen des Originals überliefert ist. Wenn dies nicht der Fall ist, sind neue Wege zu gehen, um auch die Kunst der Gegenwart in den Dom einzubringen. So wurde 2007 im Südquerhaus des Domes ein modernes Fenster nach Entwürfen des weltbekannten Kölner Künstlers Gerhard Richter eingebaut. Dies ist vielleicht das Faszinierendste an einem Baudenkmal wie dem Kölner Dom, dass alle Generationen seine Geschichte fortzuschreiben. Es ist ein echtes, über Jahrhunderte fortgeführtes Generationenprojekt und Gesamtkunstwerk.

Bild 7

Köln, Dom, Dom in der zerstörten Stadt Köln nach dem 2. Weltkrieg, Luftansicht von Südwesten



Die Dombauhütte heute

Heute arbeiten in der Dombauhütte etwa 100 Mitarbeiter eng vernetzt zusammen, davon etwa 80 im handwerklichen und restauratorischen Bereich.

Die größte Werkgruppe sind die **Steinmetzen**, die alle architektonischen Werkstücke für den Dom fertigen: Maßwerke, Wimperge (die Giebel über Fenstern und Portalen), Fialen (kleine Türmchen über den Pfeilern), Strebebogenelemente.

In früheren Zeiten waren es dieselben Steinmetzen, die im Winter die Werkstücke erstellten und sie bei warmem Wetter am Bau versetzten. Heute gibt es in der Dombauhütte eine eigene Gruppe von **Versetzsteinmetzen**, die mit dem Aus- und Einbau von Werkstücken beschäftigt sind. Bei allen der Verwitterung besonders ausgesetzten Architekturgliedern vergießen sie die Fugen auf traditionelle Weise mit Blei. Die Werkstücke werden mit Metalldübeln aus Edelstahl verbunden und die Fugen mit heißem Blei vergossen.

Die Aufgabe der **Steinbildhauer** ist es, die figürlichen Elemente herzustellen. Allein im 19. Jahrhundert wurden für den Dom mehr als 1.500 Skulpturen geschaffen. Insbesondere die Figuren am Außenbau waren in hohem Maße den Zerstörungen des Zweiten Weltkrieges und der Verwitterung ausgesetzt. Beschädigte Skulpturen müssen daher restauriert und ergänzt, zerstörte erneuert werden.

Daneben gibt es in der Dombauhütte **Steinrestauratoren**. Deren Aufgabe ist die Konservierung und vorsichtige Reinigung sowie die Dokumentation und Restaurierung der historischen Steine am Dom.

Der Dom hat einen umfangreichen Bestand historischer Glasmalereien. Das älteste Fenster stammt von etwa 1260. Das jüngste Fenster ist das Südquerhausfenster aus dem Jahr 2007.

Aufgabe der **Glasmalerei restauratoren** ist die Konservierung der historischen Fenster. Sie entfernen behutsam Staub, Schmutz und Beläge von den empfindlichen Glasoberflächen. Die wichtigste Schutzmaßnahme für historische Glasmalereien ist u. a. eine Schutzverglasung. Damit werden Regen, Winddruck, Luftschadstoffe und Schwitzwasser von den historischen Scheiben ferngehalten.

Arbeitsschwerpunkt der **Glasmaler und Kunstglaser** ist die Rekonstruktion kriegszerstörter Fenster nach originalen Vorlagen. Zurzeit werden im Obergaden des Querschiffes Fenster des 19. Jahrhunderts wiederhergestellt. Während die figürlichen Partien im Zweiten Weltkrieg ausgebaut wurden, gingen die darüber liegenden Scheiben vollständig verloren. Die im Dombauarchiv verwahrten Entwürfe ermöglichen ihre Rekonstruktion.

Die Dombauhütte beschäftigt einen **Schlosser** und einen **Schmied**. Die Esse in der Schmiedewerkstatt ist das einzige brennende Schmiedefeuer, das es in der Kölner Innenstadt noch gibt. Wie einst ist die Aufgabe der Metallbauer die Herstellung nahezu sämtlicher für den Dom benötigter Metallelemente sowie die Anfertigung und Wartung von Werkzeugen.

Für die Erhaltung eines Bauwerks ist die Wasserableitung von entscheidender Bedeutung. Die Wartung und Erneuerung der Dachflächen erfolgt durch die **Dachdecker** der Dombauhütte. Zurzeit konzentrieren sich die Arbeiten auf die kleinteiligen Dächer des Chorumgangs und der Chorkapellen. Daneben ist die Wartung und Reparatur der insgesamt circa zehn Kilometer langen Regenrinnen und der Fenstergesimse ein Arbeitsschwerpunkt.

Bild 8

Köln, Dom, Gerüstbau am Kölner Dom, Abhängung des Nordturmgerüsts 2013



Heute beschäftigt die Dombauhütte sechs **Gerüstbauer**. Sie sind gewöhnlich die ersten und letzten an einer Baustelle, denn für nahezu alle Arbeiten am Dom sind größere oder kleinere Gerüste notwendig. Besonders spektakulär ist das etwa 30 Meter hohe Hängegerüst am Nordturm (Bild 8). Es ist mithilfe von Ketten an einer Stahlkonstruktion im Inneren des Turmhelmes aufgehängt und nicht mit einem Dübel im Mauerwerk verankert. Sobald die Arbeiten dort abgeschlossen sind wird es zurückgebaut und mit einem riesigen Baukran vom Bauwerk abgenommen.

Der Kölner Dom besitzt 456 Holztüren, 230 Kirchenbänke sowie unzählige Schränke und Beichtstühle, die von den **Schreibern** der Dombauhütte gewartet und repariert werden.

Weitere wichtige Gewerke in der Dombauhütte sind **Elektriker**, **Maler**, eine **Metallrestauratorin**, eine **Goldschmiedin** und ein **Silberschmied**, ein **Installateur** und ein **Bauhelfer**. Die Bauhelfer waren in früheren Zeiten für das Hochziehen der Werkstücke, das Anrühren und Heranschaffen von Mörtel und weitere Aufgaben zuständig. Heute wird der Bauhelfer für vielfältige Arbeiten und zur Unterstützung der anderen Gewerke eingesetzt.

Zu den Gewerken der Dombauhütte kommen noch etwa 20 Personen hinzu, die in der Verwaltung der Dombauhütte als Architekten, Ingenieure, Wissenschaftler, Sekretärinnen und Fotografinnen angestellt sind. Sie sind für die Planung der Erhaltungsarbeiten sowie für die Erforschung und Dokumentation der Kathedrale und ihrer Kunstschatze verantwortlich.

Die Kölner Dombauhütte ist eine der großen aber bei weitem nicht die einzige Dombauhütte. In vielen Ländern Europas gibt es zahlreiche Bauhütten, die teilweise sogar ohne Unterbrechung seit dem Mittelalter fortbestanden haben. Untereinander stehen sie in engem Austausch, von dem alle profitieren, da sie an den unterschiedlichen Orten mit ähnlichen konservatorischen Problemen konfrontiert sind. Ohne die europäischen Bauhütten wäre der Erhalt der Kathedralen und anderer großer Baudenkmäler, die einen wesentlichen Teil des europäischen Kulturerbes bilden, kaum denkbar.

Bis heute stehen sie in der Tradition der mittelalterlichen Bauhütten und geben ihr unschätzbares Fachwissen und ihre Traditionen von Generation zu Generation weiter und sind damit eine Garantie für den Erhalt der Gesamtkunstwerke.

Bildnachweis

- Titel, Bild 2: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte;
Rekonstruktion und Darstellung: Lengyel Toulouse
Architekten
- Bild 1: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte;
Foto: Matz und Schenk
- Bild 3: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte;
Rekonstruktion und Darstellung: Lengyel Toulouse
Architekten
- Bild 4: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte
- Bild 5: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte;
Foto: Matz und Schenk
- Bild 6: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte
- Bild 7: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte
- Bild 8: © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte;
Foto: M. Unkelbach

Die Restaurierung des Michaelportals am Kölner Dom



Das aus dem späten 19. Jahrhundert stammende und im Zweiten Weltkrieg schwer beschädigte Michaelportal am Nordquerhaus des Kölner Doms wird derzeit aufwendig durch die Dombauhütte Köln restauriert. Ziel ist es in erster Linie, die Lesbarkeit des Figurenprogrammes wiederherzustellen. Nach einer Laserreinigung ist die Restaurierung großer Abschnitte des Tympanons und der Archivoltens bereits abgeschlossen. Dabei werden nicht nur Skulpturen, sondern auch Architekturelemente wie Baldachine und Friese ergänzt. Die Restaurierung des oberen Wimpergs und der unteren Portalfiguren steht noch aus.

Albert Distelrath
Matthias Deml
Tanja Pinkale

1 Geschichte und Bildprogramm des Michaelsportals

Das Michaelportal ist der zentrale Eingang des Nordquerhauses des Kölner Doms. Wie an der Südquerhaus- und der zentralen Westfassade wird es als großes Hauptportal von zwei kleineren Seitenportalen gerahmt. Das Michaelportal sowie sieben weitere der insgesamt neun großen Portale wurden erst im Zuge der Domvollendung zwischen 1842 und 1880 errichtet. Lediglich das Petersportal an der Westfassade unter dem Südturm stammt noch aus der mittelalterlichen Bauzeit.

Dombaumeister Richard Voigtel (1829–1902) beauftragte 1878 den Bildhauer Peter Fuchs (1829–1898), der bereits 1865 mit der Herstellung der Pfeilerfiguren des Lang- und Querhauses betraut worden war, mit der Ausführung des Figurenschmucks an den drei Nordquerhausportalen. Fertiggestellt war er erst 1881, ein Jahr nach der offiziellen Feier der Domvollendung.

Peter Fuchs bemühte sich – wie von Dombaumeister Voigtel gefordert – um eine starke Unterordnung der Skulptur in die Architektur und orientierte

sich daher eng an den mittelalterlichen Skulpturen des Petersportales (Bild 1).

Für das Michaelportal waren von Fuchs acht große Gewändefiguren, 58 sitzende Heiligenfiguren für die Archivoltens (Bogenlaibungen) sowie 56 ganze und 26 halbe Figuren für das Tympanon (Bogenfeld über dem Portal) herzustellen. Hinzu kamen fünf große Skulpturen für den Wimperg (Maßwerkgiebel) des Portals. Die zentrale Figur des Portals, den Hl. Michael, der bereits 1875 vom Bildhauer Franz Meynen (1840–1915) geschaffen wurde, überarbeitete Fuchs erheblich.

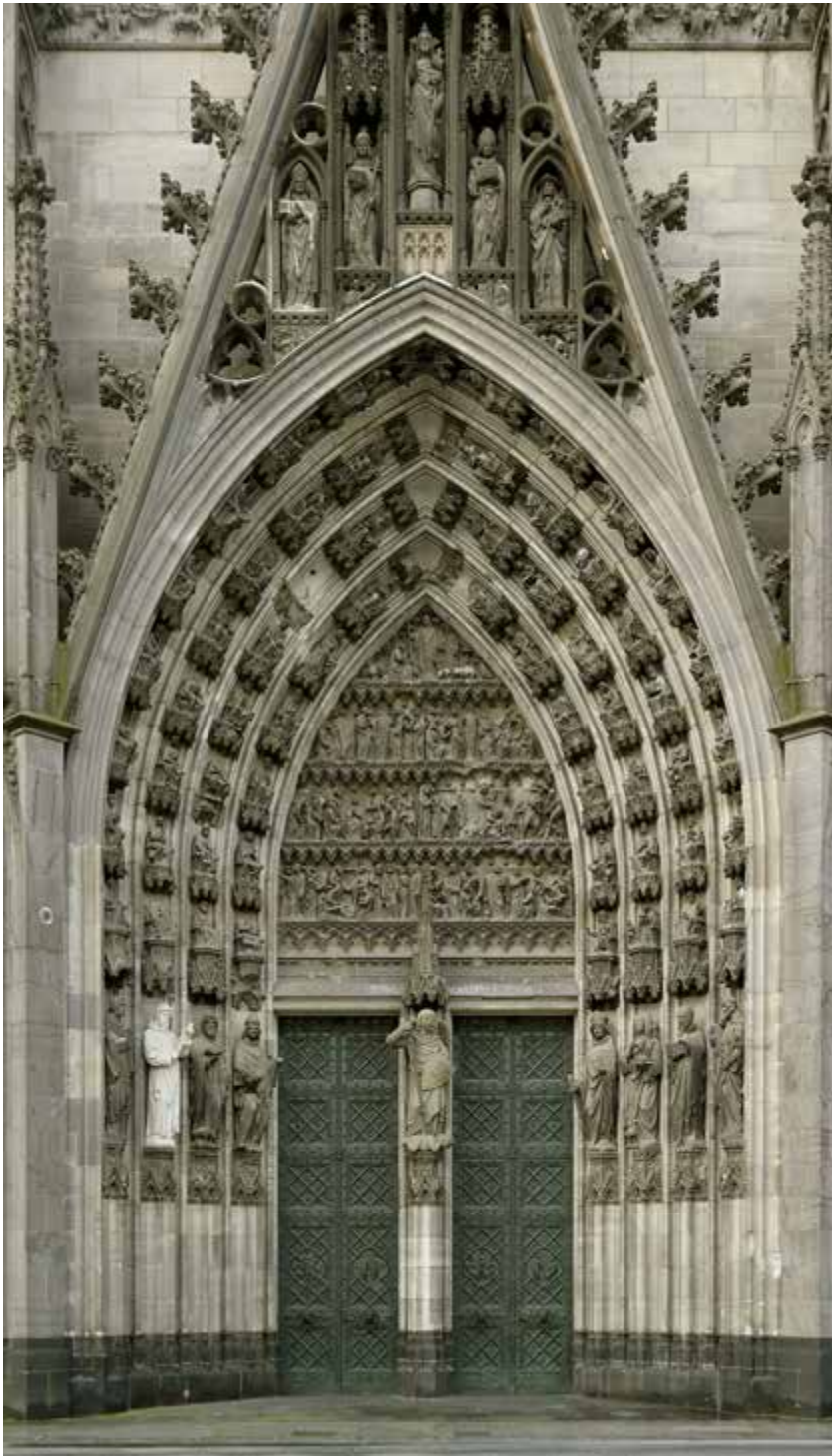
Das Hauptthema des Portalschmucks sollte nach dem Vertrag die »Verwirklichung des Erlösungswerkes in der Menschheit durch Christus und seine Stiftung in der Kirche« sein. Als zentrale Figur im Wimperg über dem Michaelportal erscheint daher der auferstandene Christus mit der Siegesfahne. Das Tympanon zeigt Szenen aus dem Leben Jesu nach seiner Auferstehung und Szenen aus der Apostelgeschichte. In den Bogenlaibungen wurden Figuren von 58 Schutzpatronen der unterschiedlichen Stände, Künste und Gewerbe angebracht. Die zentrale Figur des Erzengels Michael als Beschüt-

zer der Kirche und als Schutzpatron des Deutschen Reiches wird von acht weiteren Figuren flankiert, die Vertreter der geistlichen Stände und Ordensgründer darstellen.

Fuchs fertigte zunächst Tonmodelle im Maßstab 1:2 bzw. 1:3 an, die nach der Abnahme durch den Dombaumeister in Gips abgegossen wurden. Diese

Bild 1

Michaelportal, Nordquerhaus



Gipsmodelle, die als direkte Vorlage für die Umsetzung in Stein dienten, haben sich in großer Zahl in der Modellkammer des Domes erhalten. Sie bilden heute die Grundlage für die Ergänzung beschädigter Skulpturen bzw. für die Rekonstruktion der gänzlich oder weitgehend zerstörten Figuren. Das Steinmaterial, aus dem im 19. Jahrhundert die Skulpturen geschaffen wurden – Kalkstein aus der Gegend von Caen in Nordfrankreich, wurde Fuchs von der Dombauhütte gestellt (Bild 2).

Im Zweiten Weltkrieg erlitt der Kölner Dom schwere Zerstörungen. Während die großen Bauschäden in der Nachkriegszeit beseitigt wurden und der Dominnenraum 1956 in seiner Gänze der Öffentlichkeit zurückgegeben werden konnte, sind am Bauwerk auch heute noch unzählige kleinere Kriegsschäden zu erkennen. Besonders auffällig und störend sind diese im Bereich der Domportale. In den Bogenlaibungen und Relieffeldern der Tympana klafften bis zu Beginn der Restaurierungsmaßnahme noch immer Einschusslöcher und kraterförmige Aussprengungen. Zahlreiche Archivoltenfiguren waren durch die Kriegseinwirkungen verstümmelt oder gänzlich zerstört worden. Diese Fehlstellen zu schließen ist eine wesentliche Aufgabe der laufenden Restaurierung (Bild 3).

2 Restaurierungsarbeiten

2.1 Vorbereitende Arbeiten und Schadenskartierung

Vor Beginn der eigentlichen Restaurierungsarbeiten wurde mit Hilfe von Messbildern und Laservermessung ein maßstabs- und verformungsgerechtes Aufmaß des Portals erstellt. In diesem werden sämtliche Schäden und Schadensbilder an Architektur und Skulpturen in einer detaillierten Schadenskartierung meistens direkt auf der Baustelle digital mit Tablets mit dem Programm *metigo Map* erfasst. Zudem wurden Materialanalysen (Materialproben zum Kalkstein) am Stein vorgenommen. Diese aufwendige Dokumentation dient als Grundlage aller weiteren Arbeiten am Portal.

2.2 Restaurierungskonzept

Die Zielsetzung ist der Erhalt von möglichst viel originaler Substanz. Eine vollkommene Wiederherstellung des Portals mit Beseitigung aller Schäden ist nicht geplant. Daher sollen auch Spuren des Krieges für künftige Generationen am Portal ablesbar bleiben, sofern der Gesamteindruck dadurch nicht beeinträchtigt wird.

Das Ziel am Michaelportal ist es fortan, die Lesbarkeit im Figurenprogramm wiederherzustellen. Allerdings muss dafür nicht jeder Schaden beseitigt werden. Generell ist ein abgestuftes Vorgehen angedacht. Das Tympanonfeld mit seinem reichhaltigen Figurenschmuck soll einschließlich seiner Architekturfassung mit Blendfriesen usw. zur Ablesbarkeit der geschichtsbildenden Zusammenhänge soweit möglich vervollständigt werden. In den Archivoltten hingegen sollen zwar die Figuren wieder ergänzt werden, allerdings können hier Schäden an der Architektur wie den Baldachinen leichter hingenommen werden. Die untere Reihe der Baldachine soll jedoch quasi als Basis der Archivoltten ebenfalls weitgehend in ihrer Gesamtarchitektur wiederhergestellt werden.

2.3 Reinigung des Portals und der Portalskulpturen

Nach einer Vorreinigung (mechanisch trocken und feucht, Krusten mit Partikelstrahlgerät ausgedünnt, Strahlgut Asilit A1 – A0 im Verhältnis 1:1, Schmelzkammerschlacke Aluminiumsilikat), bei der zunächst Taubenkot und grober Schmutz entfernt wurden, erfolgt die oberflächenschonende Reinigung der Skulpturen und Reliefs mittels zwei eigens für das Restaurierungsprojekt erworbener Laser (Nd:YAG Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1.064 nm). Die schwarzen Schmutzkrusten auf dem Stein absorbieren dabei die hohe Energie der gebündelten Lichtstrahlen und erhitzen sich kurzfristig so massiv, dass sie in Kleinstpartikeln abplatzen und verdampfen. Da das Licht des verwendeten Laser-Reinigers nur von dunklen Oberflächen absorbiert wird, bleibt es auf der hellen Steinober-

fläche wirkungslos. Damit ist gewährleistet, dass nur die dünne Schmutzschicht abgetragen wird, die darunterliegende helle Kalksteinoberfläche nicht geschädigt wird und danach Steinbearbeitungsspuren wieder erkennbar sind (Bild 4).



Bild 2
Gipsmodell und
Kalkstein-Rekonstruktion

Bild 3
Michaelportal mit
Kriegsschäden 1945





Bild 4

mit Laser gereinigter und unge-
reinigter Bereich im Tympanon

2.4 Ergänzen und Kopieren kriegs- zerstörter und -beschädigter Bauteile und Skulpturen

Kriegszerstörte Bogenstücke und Konsolbaldachine des Michaelportals werden durch den Steintech-
niker der Dombauhütte aufgemessen, um detail-
lierte Schablonen für die Steinmetze der Dombau-
hütte anzufertigen. Nach diesen werden die fehlen-
den Architekturteile rekonstruiert.

Bild 5

rekonstruierter Baldachin



Von den Architekturbereichen, die ergänzt werden müssen, verdienen fünf weitgehend zerstörte Baldachine in den Archivolten besondere Erwähnung. Aufgrund ihrer kleinteiligen, detailreichen und vielfach durchbrochenen Gestaltung zählen Baldachine zu den aufwendigsten Steinmetzarbeiten an einer gotischen Kathedrale, deren Herstellung teilweise über ein Jahr Arbeit erfordert (Bild 5).

Allerdings wird auch im Bereich der Architektur-
elemente versucht, möglichst auf eine Vollrekon-
struktion zu verzichten, um das Maximum an vor-
handener Substanz zu erhalten. Sofern möglich
werden daher kleinteilige und z. T. sehr komplexe
Vierungen in die geschädigten aber noch zu erhal-
tenden Baldachine eingefügt. Dies betrifft insbe-
sondere die Baldachine der untersten Figurenreihe.
Auf vorgesägten Steinblöcken werden zunächst die
Profilebenen aus Zeichnungen und mittels Schab-
lonen angelegt und die Ebenen in Stufen angesetzt.
Danach sind Flächen und Profile aus dem Stück
herauszuarbeiten. Zierelemente wie Krabben, Blatt-
friese oder auch die Zierwasserspeier werden zu-
nächst noch als Bossen – quasi als unausgearbei-
tete Quader – stehen gelassen und erst am Ende
im Detail ausgearbeitet. Vierungen sind im
Arbeitsprozess immer wieder vor Ort mit der Ein-
bausituation abzugleichen, um noch kleinere Kor-



Bild 6
Baldachin G2 vorbereitet zum Einbau von Vierungen



Bild 7
Baldachin G2 mit Vierungen

rekturen vornehmen zu können. Besonders beim Anschluss an die geschwungenen Gewölbekappen und -rippen sowie bei den Profilanschlüssen an den Vorderseiten ist dies erforderlich (Bilder 6 und 7).

Ähnlich anspruchsvoll sind auch die Ergänzungen der Architekturfriesen im Tympanon, die momentan in der Dombauhütte gefertigt werden. Auch hier müssen sehr aufwendige Vierungen mit unterschiedlichsten Anschlusspunkten in den Bestand eingepasst werden (Bild 8).

Zur Rekonstruktion von Figuren erstellen die Bildhauer der Dombauhütte Kopien/Rekonstruktionen der weitgehend oder gänzlich zerstörten Skulpturen. Hierzu werden zunächst die zerstörten Partien im Maßstab 1:1 auf die Torsi der zerstörten Skulpturen aufmodelliert. Als Vorbilder dienen ihnen die zumeist gut erhaltenen 1:2-Gipsmodelle von Peter Fuchs aus den Jahren 1879/80. Anschließend wird die neue Figur in Stein erstellt, indem mittels Punktiermaschine, wie bereits im 19. Jahrhundert, die Oberflächen vom Modell maßgenau auf den Stein übertragen werden.

Nach dem gleichen Verfahren erstellen die Dombildhauer auch Teilerergänzungen für weniger stark beschädigte Skulpturen wie etwa Köpfe, Arme und Attribute der Heiligen. Sie werden als Vierungen an

die Originalskulpturen angesetzt. Dies hat den Vorteil, dass die Skulpturen nicht vollständig kopiert werden müssen, sondern die erhaltenen Reste des Originals am Portal verbleiben können. Kleinere Fehlstellen werden mit einem Steinerfüllmörtel (Mineros 2000, farblich angepasst, Körnung 0,3 mm und 0,5 mm) anmodelliert (Bilder 9–12).

Als Grundlage zur Rekonstruktion bzw. Teilerergänzung dienen auch Abgüsse mittels Silikon-

Bild 8
Vierung Architekturfries





Bild 9

Modellvorlage für Teilergänzung



Bild 10

Teilergänzung einer Skulptur
mit Punktiermaschine



Bild 11

Ausschnitt Tympanon mit
Teilergänzung der Figuren

Formen an intakten oder teilzerstörten Originalfiguren im Michaelportal oder vergleichbaren Figuren an anderen Orten des Domes. Diese dienen dann ebenfalls als Grundlage zur Modellherstellung und Reproduktion verlorener Teile. Es wurden auch Versuche unternommen, mittels Abgüssen Kopien in Steinersatzmasse auszuführen. Dies erwies sich aber am Michaelportal aufgrund des sehr feinen verwendeten Kalksteins sowie der hohen handwerklichen Qualität der Bildhauerarbeiten an den Originalen als nicht zielführend und wurde verworfen.

2.5 Verwendeter Naturstein zur Steinergergänzung

In der Vergangenheit wurde in der Dombauhütte als Austauschmaterial für Kalkstein ein französischer Kalkstein aus Tercé verwendet. Aufgrund der schlechten Qualität der letzten Lieferungen dieses Materials begann eine umfangreiche Recherche über geeigneten Kalkstein, welcher künftig für die hoch anspruchsvollen Steinmetz- und Bildhauerarbeiten der Dombauhütte verwendet werden kann.



Bild 12
Ausschnitt Tympanon mit
Teilergänzung der Figuren

In den Akten des 19. Jahrhunderts wurde »Pierre de Caen« erwähnt. Der Stein kam nachweislich ab 1865 am Dom zur Anwendung. Untersuchungen durch die Technische Hochschule Köln bestätigten die Herkunft des Steines aus der Umgebung von Caen. So konnte nachgewiesen werden, dass der Stein am Michaelportal wie auch an Baldachinen über den Portalfiguren des Marienportales verwendet wurde. Der Wechsel von Tercé auf Caen war unproblematisch, da die Steine sehr ähnliche Materialeigenschaften haben. Überdies passt sich der neue Stein aus Caen in der Farbigkeit und Oberflächentextur besser an den gereinigten Altbestand an.

Inwiefern die helleren Steinvierungen später noch durch eine Lasur farblich an den gereinigten Originalbestand angepasst werden, wird erst zum Ende der Maßnahme entschieden. Eine Anpassung würde das Gesamtbild mit Darstellung des Figurenprogramms wieder zusammenfassen. Die neuen Steinvierungen hell zu belassen würde hingegen die Eingriffe in den Bestand deutlich zeigen und ablesbar machen (Bild 13). Beide Vorgehensweisen sind vom Grundsatz her möglich, sofern damit ein schlüssiges Gesamtergebnis zu erzielen wäre.



Bild 13
neuer Zierwasserspeier aus
Caen-Kalkstein



Bild 14
mit 3D-Drucker erstellte
Modelle der Archivoltfiguren
zur Übergabe an die Paten mit
Patenbrief

2.6 Rückgabe verloren geglaubter Fragmente

Im Mai 2017 erhielt die Kölner Dombauhütte ein Köpfchen vom Tympanonrelief zurück, das in den Wirren der letzten Kriegstage in Köln, im März 1945, abhandengekommen war. Ein junger Soldat der US-Armee hatte das abgesprengte Fragment, das den Sturz aus etwa sieben Metern Höhe erstaunlich unversehrt überstanden hatte, mitgenommen. Sein Sohn fand es nach dem Tod der Eltern eingeschlossen in einem Schrank in deren Wohnhaus bei Washington D. C. Über die amerikanische Kunstberaterin Amy Kuhnert ließ er die Herkunft des Köpfchens recherchieren. Sie war es auch, die das Fragment der Kölner Dombauhütte überbrachte. Es wurde bereits gereinigt und passgenau eingesetzt.

2.7 Einsatz moderner Restaurierungsverfahren

Die Dombauhütte sieht in der Durchführung und Pflege der seit Generationen weitergegebenen kunsthandwerklich anspruchsvollen Techniken eine hohe Verpflichtung. Allerdings kommt auch modernste Technik im Einzelfall und zur Vereinfachung bestimmter Arbeitsschritte zum Einsatz.

Sämtliche Pläne werden in der Dombauhütte in 3D mit dem Programm Autodesk Inventor gezeichnet.

Die Bestandserfassung erfolgt größtenteils in 3D-Photogrammetrie. Mittels hochauflösender digitaler Bilddaten werden 3D-Volumenmodelle errechnet, auf deren Grundlage auch Kopien durch 3D-Drucker erzeugt werden können. Das verwendete Druckmaterial ist eine Mischung aus Quarzsand mit einem speziellen Klebstoff. Aber auch andere Druckmaterialien werden derzeit getestet. Die so erzeugten Modelle können zur bildhauerischen Reproduktion einer 1:1 Kopie in Stein verwendet werden.

Die Bestandserfassung mittels 3D-Scanner hat aber auch noch andere Vorteile. So erfolgt das Aufmaß berührungsfrei und kann auch ausgeführt werden, wenn ein Abformen nicht möglich ist oder Witterungsverhältnisse dies nicht zulassen.

Mit Hilfe der 3D-Daten wurden auch schon an größeren Skulpturen anderer Baustellen Versuche unternommen, diese mittels CNC-Fräsen vorzufertigen. Aufgrund der Kleinteiligkeit und Filigrantät der Bauteile am Michaelportal ist dies hier kaum möglich und nicht praktikabel.

Der Einsatz neuer Verfahren in der Bestandserfassung, Planung und Herstellung von Werkstücken wird als Hilfsmittel und Unterstützung gesehen. Die Wahrung der handwerklichen Tradition in der Dombauhütte darf dadurch allerdings nicht verloren gehen.

3 Finanzierung

Generell wird die Restaurierung des Kölner Domes zu großen Teilen aus Spendenmitteln getragen. Der 1842 gegründete Zentral-Dombau-Verein ZDV mit seinen über 17.500 Mitgliedern trägt mit über 60 Prozent den größten Anteil am jährlichen Bauetats von ca. 8 Millionen Euro. Die weitere Unterstützung kommt vom Erzbistum Köln, dem Land Nordrhein-Westfalen und der Stadt Köln.

Die Restaurierung des Michaelportals wird zum Teil zusätzlich finanziert. Die Wiederherstellung aller kriegszerstörten Bereiche wird mit Mitteln aus dem Nachlass von Berta Woodward aus England finan-

ziert, welche die Hohe Domkirche im Jahr 2012 über die Deutsche Stiftung Denkmalschutz erhalten hat.

Über ein Patenprogramm des ZDV können sich Bürger und Vereine an der Restaurierung und Wiederherstellung spezieller Figuren nach ihrer Wahl beteiligen. Paten erhalten auch verkleinerte 3D-Drucke ihrer geförderten Figuren (Bild 14).

Es ist und bleibt wichtig, die Öffentlichkeit über die Restaurierungsmaßnahmen regelmäßig und umfassend zu informieren, nicht nur um an finanzielle Mittel zu gelangen, sondern auch eine große öffentliche Akzeptanz zu erreichen.

Weiterführende Literatur

- Becker, Jochen: Das Plastikprogramm des Kölner Doms 1845-57, S. 15–28, in: Kölner Domblatt 1970, Jahrbuch des Zentral-Dombau-Vereins, Köln 1970
- Distelrath, Albert: Die Teilergänzung an Baldachinen vom Michaelportal – ein Werkbericht, S. 58–65, in: Kölner Domblatt 2019, Jahrbuch des Zentral-Dombau-Vereins, Köln 2019
- Deml, Matthias: Geschichte und Bildprogramm, Restaurierungsarbeiten, S. 7–23, in: Zentral-Dombau-Verein (Hrsg.): Patenschaften, Portale am Hohen Dom zu Köln, Michaelportal – Patenbrief, Köln 2015
- Füssenich, Peter: Dombauberichte, in: Kölner Domblatt 2014–2019, Jahrbuch des Zentral-Dombau-Vereins, Köln 2019
- Hauck, Michael: Dombaubericht, S. 8–119, in: Kölner Domblatt 2013, Jahrbuch des Zentral-Dombau-Vereins, Köln 2013
- Lauer, Rolf: Die Skulptur des 19. Jahrhunderts am Kölner Dom, in: Trier, Eduard und Willy Weyres (Hrsg.), Kunst des 19. Jahrhunderts im Rheinland, S.13–62, Düsseldorf 1980
- Lauer, Rolf und Michael Puls: in: Borger, Hugo und Heiko Steuer (Hrsg.), Der Kölner Dom im Jahrhundert seiner Vollendung, S.295–324, Köln 1987

Bildnachweis

- Bild 1: Kulturgutvermessung Linsinger, St. Johann im Pongau
- Bilder 2, 5, 6, 8–10: Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte, A. Distelrath
- Bild 3: Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte
- Bilder 4, 12: Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte, M. Unkelbach
- Bilder 7, 11, 13, 14: Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte, J. Rumbach

Festigung von Renaissancebauteilen aus Gotländer-Sandstein in der Dorfkirche Semlow



Die Dorfkirche Semlow in Vorpommern bietet eine beachtliche Ausstattung. Zwei Sandsteinepitaphe, die Anfang des 17. Jahrhunderts mit umfangreichen Renaissancebeschlagwerk geschaffen wurden, standen im Mittelpunkt der restauratorischen Bearbeitung. Die beiden Epitaphe zeigten eine umfangreiche Bandbreite von Schäden. Im Vordergrund standen hier die Rostsprengung und die Gefügeschäden der Sandsteinsubstanz. Die Konservierung und Restaurierung der beiden Epitaphe erfolgte in den Jahren 2018–2019. In diesem Zusammenhang sind große Bereiche der Natursteindekoration demontiert worden um sie konsolidieren zu können.

Boris Froberg
Claudia Dietze

Teil 1: Konservierung und Restaurierung von Sandsteinepitaphien

Die Dorfkirche in Semlow in Vorpommern wurde etwa von 1190 bis 1220 aus Feldsteinen errichtet und bietet eine bedeutende Ausstattung (Bilder 1 und 18)¹. Das Kirchenschiff mit Flachdecke und Neorenaissanceempore (einschließlich Orgel) ist geprägt durch eine 1861–63 durch Carl Julius Milde entstandene komplett erhaltene Ausmalung, die auf mittelalterliche Befunde zurückgeht und dem Bau damit ein Alleinstellungsmerkmal verleiht.² Im gewölbten Chorraum findet sich ein hölzerner Altar mit Empore von 1723 und zwei Sandsteinepitaphe. Diese sind bereits Anfang des 17. Jahrhunderts mit vollplastischen und lebensgroßen Skulpturen von Meistern der sogenannten Florisschule geschaffen worden. Hierbei zeigt sich eine Verbindung italienischer Wandepitaphien mit dem Floris- oder Beschlagwerkstil und Pommerschen Renaissancegrabmälern. Stilistisch gesehen stehen die Epitaphe in der Tradition der Grabmonumente Brandins im Güstrower Dom, die in Zusammenarbeit mit Midow und Berninger entstanden.^{3,4} Der sich durch

die Verwendung von Roll- und Beschlagwerkornamentik auszeichnende niederländische Floris-Stil⁵ war in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts im gesamten protestantisch geprägten nord- und mit-



Bild 1
Ansicht von Südosten 2019



Bild 2
Epitaphien an der Chorsüdwand
im Vorzustand 2018



Bild 3
Endzustand der beiden Epita-
phen in der Gesamtansicht im
September 2019

teleuropäischen Raum verbreitet, wobei neben Cornelius Floris auch Philip Brandin eine entscheidende Rolle spielte. Das Wandepitaph für Adam von Behr und Ilse von Krakewitz fertigte vermutlich C. Midow. Über einer Tumba mit den annähernd lebensgroßen Liegefiguren der Verstorbenen befindet sich der epitaphähnliche Aufbau mit Reliefdarstellung der Verstorbenen unter dem Kruzifix. Das Epitaph für deren Sohn Christoph von Behr und Hedwig von Ribbeck ist anschließend um 1605 von selbigen Künstlern geschaffen worden. Dieses steht mittig in der Chorsüdwand unter Einbeziehung der Zweifenstergruppe, deren aufwendige Dekoration wiederum ein Alleinstellungsmerkmal darstellt (Bild 3). Hier könnte ein Bezug zur ehemaligen Schlosskirche der Pommerschen Herzöge im Schloss zu Stettin⁶ möglich erscheinen. In den prächtigen architektonischen Aufbau in Renaissanceformen sind die Verstorbenen als vollplastische, lebensgroße Gestalten am Gebetpult kniend einbezogen. Für das Formenvokabular und die Beschlagwerkornamentik dürften graphische Vorlagen aus Antwerpen und Mecheln gedient haben. Die beiden figürlichen Reliefs zeigen schon manieristische Einflüsse und werden auf graphische Vorlagen italienischer Herkunft zurückzuführen sein.⁷ Bemerkenswert ist, dass neben dem Betpult auch der abgelegte Helm (bei Christoph) und die ausge-

zogenen Handschuhe (bei Adam) erhalten geblieben sind. In den folgenden Jahrhunderten beschränkten sich Erhaltungsarbeiten auf partielle Überfassungen und Ausbesserungen. Unter Carl Julius Milde entstand eine polychrome Fensterverglasung, die perspektivisch und farblich im Kontrast zur Renaissancegestaltung steht und im Zusammenhang mit der neuen Farbgebung der Epitaphe zu sehen ist.

Bestand

Die Sandsteinbauteile (grünlicher Gotländer-Sandstein⁸) der Epitaphe Christoph und Adam von Behr sind untereinander und mit der Außenwand durch Eisenanker verbunden, die Fugen mit Hanf verdammt. Die Anker waren innerhalb der Sandsteinbauteile eingeleit und in der Außenwand eingemörtelt. Holzdübel wurden bei Reparaturen und Ergänzungen mit Gips- und Kalkmörtel vorgefunden. Es ließen sich auch ältere Klebungen aus Schellack und jüngere aus Kunstharz feststellen. Die jüngste Fassung, eine ölige Tempera ist vermutlich 1857–59 durch Carl Julius Milde entstanden.⁹ Diese durchgängig stark verschmutzte Fassung war durch einen homogenen, hellen Gesamteindruck (Zinkweißfassung) mit sparsamen Farbakzentuierungen und Vergoldungen im Kont-

rast zu den schwarzen Rücklagen der Schriftplatten mit erhabener goldener Schrift geprägt (Bild 2). Damit präsentieren sich die Renaissanceepitaphe mit einer eigenständigen Farbgestaltung des 19. Jahrhunderts im Zusammenhang der Neuausmalung des Kircheninnenraumes.

Schäden

In allen Bereichen der Epitaphe waren diverse Schäden festzustellen. Im Vordergrund standen hier die Rissbildungen durch die Volumenvergrößerung der Anker (Rostsprengung) und die Gefügeschäden der Sandsteinsubstanz durch Bindemittelverlust (Kalziumcarbonatmangel). Durch korrodierte Eisenanker im Übergangsbereich zum Stein sind neben Rissbildungen auch Aus- und Abbrüche sowie Ablösungen entstanden (Bild 4). Einige Bauteile waren teils in bis zu zehn Teile zerbrochen. Die Zerstörung der Natursteinsubstanz kann durch anhaltenden Feuchte-Tau-Wechsel in Zusammenhang mit bereits vorhandener stärkerer Salzeinlagerung^{10,11} erfolgt sein. Da dieses Phänomen nur einige nicht in Zusammenhang stehende Bauteile betrifft, können die Probleme ggf. in der besonderen Beschaffenheit des Sedimentgesteins (Bindemittelmangel) begründet sein. Im Wesentlichen bemerkenswert war der hohe Gehalt an Eisenmineralen (Limonit) und Glimmer. Beides kann reduzierend auf die Gesteinsfestigkeit wirken. Zwischen »guter« Probe und »schlechter« Probe gab es keinen großen Mineralunterschied (beide mit im Vergleich zu anderen Gotland Sandsteinen hohen Gehalten an Eisenmineralien). Beim kaputten Sandstein gibt es die offenen Risse entlang der Glimmerhorizonte, die es bei den gut erhaltenen Steinbauteilen (noch) nicht gab.¹² Die Sandsteinoberfläche war in Teilbereichen komplett vom Untergrund gelöst. Die Oberfläche zeigte gegenüber dem Untergrund eine Gefügeverdichtung durch eingedrungene Öle, die als Grundierung für die polychrome Erstfassung aufgebracht wurden. Die Natursteinsubstanz war teils gelockert und sandend, schichtparallel aufgespalten bis blätterteigartig in Auflösung begriffen (Bild 5). Die Farbfassungen waren in großen Bereichen durch Ablösungen und Blasenbildung geschädigt und standen partiell schollenartig von der Steinober-



Bild 4
Seitenansicht einer Schriftplatte mit Aufspaltung und Putzschäden am Epitaph Christoph von Behr

fläche ab (Bild 6). Es zeigten sich darüber hinaus Ausbrüche und großflächige Fehlstellen innerhalb geschlossener Malschichtbereiche. Da die Ausbrüche bis auf die Natursteinoberfläche reichten, erschien die Oberfläche unruhig mit gefährdeten aufstehenden und deformierten Malschichtkanten. Es bleibt zu klären, ob die Verluste bereits vor der Überfassung im 19. Jahrhundert bestanden oder durch die Spannung der aufgetragenen Fassungs-

Bild 5
Rückseiten verschiedener Bauteile mit Strukturschädigung des Sandsteins



schicht sowie die mangelnde Haftung zur Natursteinoberfläche entstanden.

Bild 6

Ablösung und Verlust der Farbfassung durch Salzausblühungen an einer Schriftplatte Christoph von Behr

Bild 7

Zwickelplatte vom Epitaph Christoph von Behr, Bruchstücke nach der Demontage

Transportsicherung

Die Vorfestigung der desolaten Oberflächen vor der Demontage erfolgte bei schollenartiger Ablösung durch Injektion mit Klucel E 5 %-ig in Ethanol mittels Spritze und Kanüle hinter die aufgeworfenen Schollen. Fassungsflächen mit pudernden Farbschichten sind durch Sprühfestigung mit Klucel

E 2,5 %-ig in Ethanol gesichert worden. Die Stabilisierung der desolaten Putze und Fassungsgebiete neben dem Giebelndreieck erfolgte durch Festigung mit Klucel E 5 %-ig in Ethanol nach Vornässung mit Ethanol. Nach der Vorfestigung sind die betreffenden Bereiche mit Japanseidenpapier und Tyloseleim MH 1000 4 %-ig in destilliertem Wasser abgeklebt worden. Um fragile Oberflächen bei der Demontage zu schützen erfolgten zudem Kaschierungen mit Cyklododekansmelze und Mull-einlagen (Bild 7). Diese sinnvolle Sicherungsmethode ist derzeit aufgrund der schlechten Verfügbarkeit und der damit verbundenen Kostenentwicklung von Cyklododekan leider kaum noch durchführbar. Nach den Teildemontagen sind die verbliebenen Sandsteinrahmungen der Fensterlaibungen des Epitaphs Christoph von Behr provisorisch durch Eisenhaken, Keile und Holzbalken gesichert worden.¹³

Konservierung

Nach der Teildemontage erfolgte eine trockene Reinigung durch Schmutz- und Staubabnahme mittels Pinsel und Staubsauger sowie die mechanische Abnahme von Mörtelresten mit Ultraschallmeißel, Steinmetzseisen und Skalpell. Die in situ verbliebenen Eisenanker wurden manuell mit Steinmetzwerkzeug freigelegt und anschließend maschinell mit kleinen rotierenden Drahtbürsten (Dremel) gereinigt. Zur Konservierung und Korrosionsverlangsamung ist eine Grundierung mit Oberflächen- und Korrosionsschutzwachs (Elaskonspray Aero 46 Spezial) und eine Beschichtung mit Zinkspray – Protekt ausgeführt worden. Über den Ankern erfolgte eine mehrlagige Abdeckung mit Japanpapier und Tyloseleim um eine Pufferschicht vor den Überkittung zu schaffen.

Aufgrund des desolaten Fassungszustandes fanden die Festigungsmaßnahmen der Fassungsschichten nach Abnahme der Japanpapierabklebungen, aber vor der Feuchtreinigung statt. Hierbei erfolgte die Vorfestigung mit Klucel E (5 %-ig in Ethanol) in mehreren Durchgängen, die Nachreinigung mit Ethanol und Zellstoff. Abstehende Schollen sind anschließend mit Paraloid B 72 (2–3 %-ig in Dowanol PM, schnell verdampfender Glycolether) teilweise in mehreren Durchgängen gefestigt worden. Die Nachreinigung erfolgte hier mit Aceton und Zell-



stoff. Die Fassungsschollen konnten im Rahmen der Hinterspritzungen durch das Lösungsmittelgemisch flexibilisiert und manuell mit speziellen Wattetupfern geglättet werden.

Die feuchte Reinigung erfolgte durch eine Anquellung der fest haftenden Schmutz- und Rußschicht durch Wasserdampf ohne Druck. Zur Anquellung ist Seifenlauge und verdünnter sowie unverdünnter Enzymreiniger (Biozym F) eingesetzt worden. Für die Nachreinigung kamen warmes Wasser und Reinigungsschwämme, Glasfaserradierer und Watte bzw. Zellstoff zum Einsatz. Partiiell ist eine Komresse aus 10T. kurzfasrigem Buchzellstoff (Arbocel), 1T. dest. Wasser, 4T. Enzymreiniger (Biozym F) und 1T. Meerschaumpulver aufgebracht und mit Folie abgedeckt worden. Diese Komresse musste vor der Reinigung mehrere Stunden einwirken. Zur Reinigung der Vergoldungen sind zusätzlich ein Ethanol-Wassergemisch und Enzymreiniger eingesetzt worden. Auch wurden HCL-Kompressen (FEAD-GmbH, Berlin) zur Anquellung von stark verschmutzten Oberflächen erfolgreich getestet.

Salzreduzierung

Einige der ausgebauten Sandsteinstücke mussten vor der notwendigen strukturellen Festigung salzreduzierend behandelt werden. Dies erfolgte im Kompressenverfahren in bis zu drei Durchgängen (je nach Salzgehalt), teils im Wechsel mit den Festigungsmaßnahmen. Die eingesetzte Komresse ist vom Labor Dr. Wendler in München für die Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg entwickelt, modifiziert¹⁴ und mit Erfolg in Güstrow eingesetzt worden.¹⁵ Hier wurden ebenfalls stark strukturgeschädigte Gotländer-Sandsteinwerkstücke am Ulrich- und Borwinmonument behandelt. Für die Kompressen fanden Quarzsande, Buchzellstoffflocken (Arbocel BC200), Bentonit, Poraver-Kugeln, Vulkanasche und Meerschaumpulver (Sepiolite) Verwendung.

Festigung

Nach der Trocknung konnte die Festigung der Werkstücke erfolgen. Vorgesehen war entsprechend des vorliegenden Konzepts und Leistungs-

verzeichnis des leitenden Restaurators Carsten Schneider eine Kieselsäureesterfestigung. Da bei einer Applizierung des Festigungsmittels durch Injektion, bzw. Tränkungen die Eindringtiefe und das Erreichen eines ausgeglichenen Festigkeitsprofils im Steinquerschnitt problematisch erschien, erfolgte eine Tränkung im Kieselsäureesterbad (Remmers 300). Hierfür ist eine entsprechend dimensionierte Wanne erstellt worden. Die Einwirkzeit lag bei etwas über 24 Stunden bei 20 °C und ca. 75 % Luftfeuchte. Die Nachreinigung erfolgte mit Zellstoff und Ethanol. Nach der entsprechenden Reaktionszeit (umlüftete Lagerung, fünf Wochen bei ca. 20 °C und 75–80 % Luftfeuchtigkeit in der Sakristei der Dorfkirche) stellte sich leider eine völlig unzureichende Festigungswirkung ein. Es bestand zum einen die Möglichkeit, den Vorgang mehrfach zu wiederholen, wie es der »Stand der Technik« war, oder alternative Festigungsmethoden zu erproben. Momentan wird für die Festigung verwitterter Sandsteinoberflächen meist nur Kieselsäureester eingesetzt. Dieser dringt in das Porengefüge des Steins ein und hydrolysiert dort unter Reaktion mit der Feuchte im Gestein zu amorpher Kieselsäure. Dieses Kieselgel ersetzt als dünner Film im Porenraum die durch Verwitterung verloren gegangene Bindung und festigt dadurch absandende und leicht abschuppende Gesteinsoberflächen sedimentärer Gesteine. Tiefergehende Schäden wie Rissbildungen, gelockerte sandende Mürbzonen,

Bild 8

Zusammenfügung, Verklebung und Verdübelung einer mehrteiligen Steinplatte vom Epitaph Adam von Behr, Rückseite





schichtparallele Aufspaltungen oder sich von der Oberfläche ablösende Schalen können durch dieses Verfahren nur unzureichend verfestigt werden. Für die »Übergangszonen« zu manuell verfüllbaren Rissen und Hohlstellen bot sich die Nanokalksuspension an. Nach entsprechenden Vorversuchen an abgängigem Natursteinmaterial der rückwärtigen Bauteile und eingehenden Diskussionen mit dem Auftraggeber und den betreuenden kirchlichen und staatlichen Denkmalfachbehörden erfolgte eine zusätzliche Verfüllung der Mikrorisse und Mikroschalen durch eine Tränkung in Nanokalksuspension. Hierfür kam CaLoSil 15g/L in Ethanol mit einer Einwirkungszeit von 22 Stunden im Tauschverfahren zum Einsatz. Die Nanokalksuspension war mit Eisenoxidpigmenten grünlich-grau eingetönt worden, um die Weißschleierbildung zu verringern. Zur Nachreinigung sind Ethanol und Zellstoff eingesetzt worden. Die Vorgehensweise einer vorgeschalteten Kieselsäureestertränkung und der anschließenden Verfüllung mit Nanokalkmaterialien ist in der vorgegebenen Durchführungsplanung begründet. Bislang setzte man Kieselsäureester meist zur Nachfestigung einer vorangegangenen Nanokalkanwendung ein. Die umgekehrte Vorgehensweise konnte für die vorhandene Problematik und Gesteinsart als zielführend bezeichnet werden. Zur Optimierung der Verfestigung und Verfüllung der Risse und Schalen erfolgten eine zusätzliche Tränkung im KSE-Bad (Remmers 300E) über 24 Stunden und eine zusätzliche Tränkung in eingetönter Nanokalksuspension (CaLoSil 15g/L in Ethanol) über 22 Stunden bei 20 °C und ca. 75 % Luftfeuchte. Die Nachreinigung erfolgte

Bild 9

Sandsteinkonsolidierung mit Nanokalk und KSE an einem Kapitell des Epitaphes Adam von Behr, vor der Abnahme der Kalkaustritte

Bild 10

Hinterfüllung von Hohlstellen und Rissen an einem Kapitell des Epitaphes Adam von Behr

Bild 11

Kapitell des Epitaphes Adam von Behr nach Festigung, Kittung und Reinigung

te ebenfalls mit Ethanol und Zellstoff. Zwischen den zwei Festigungszyklen lagerten die Bauteile umlüftet sechs Wochen bei ca. 20 °C und 75–80 % Luftfeuchtigkeit in der Sakristei der Dorfkirche. Im Vergleich zur Nanokalkverfestigung ist ein rückwärtiges Sandsteinstück dreifach entsprechend der beschriebenen Vorgehensweise mit Kieselsäureester gefestigt worden. Zwischen den Festigungszyklen lagerten die Bauteile ebenfalls umlüftet, jeweils fünf Wochen bei ca. 15–20 °C und 70–80 % Luftfeuchtigkeit in der Sakristei der Dorfkirche. Die Auswertung beider Probestücke zeigte eine äußerst zufriedenstellende Festigungswirkung der Kombination von Kieselsäureester und Nanokalkprodukten und eine mangelhafte Festigungswirkung der reinen Kieselsäureester-, bzw. Nanokalktränkung. Die Kombination der beiden Methoden (nass in nass) bietet erhebliche Vorteile in der Strukturfestigung verschiedener Porengefüge und ihrer zeitlichen Abfolge (Bilder 9, 10 bis 11 und 12 bis 14). Ergänzend fanden Versuche zur Optimierung der Festigungswirkung vorwiegend bei stärkeren Natursteingefügen unter Vakuum statt.¹⁶

Diese Vorgehensweise eignet sich, um fragile, sehr poröse und größere Gefüge zu behandeln und stellt eine gute Alternative zur kompletten Tränkung im Bad dar. Der Vorteil einer Vakuuminfiltration ist die schnellere Flüssigkeitsaufnahme im Zusammenhang mit deren Eindringtiefe und dem Schutz fragiler Teile durch die Stabilisierungswirkung der notwendigen Verpackung zur Vakuumanwendung.

Im Anschluss der Tränkungen fand eine Verfüllung der noch vorhanden größeren Risse und Schalen



Bild 12

Pilasterbauteil von Epitaph
Christoph von Behr nach
Festigungen im Tränkverfahren,
im Bruchbereich sind
Kalkablagerungen sichtbar

Bild 13

Pilasterbauteil von Epitaph
Christoph von Behr nach
Replazierung von Relieftteilen
mit Nanokalkmaterialien

Bild 14

Pilasterbauteil von Epitaph
Christoph von Behr nach
Zusammenfügung und Rück-
seitenverstärkung

durch Ledan TB1 und LD3 in CaLoSil 12,5 g/L durch Injektion mittels Spritze und Kanüle statt. Der Vorteil die Hinterfüllmischung, nicht wässrig zu injizieren, sondern hier im »System« zu bleiben, bedeutete eine bessere Flankenbindung und erhebliche Zeitersparnis gegenüber einer herkömmlichen Vorgehensweise.

Bild 15
Zwickelplatte der rechten Fensterlaibung am Epitaph
Christoph von Behr, mit diversen Schäden

Bild 16 Zwickelplatte der rechten Fensterlaibung am Epitaph Christoph von Behr, nach Festigung, Reinigung, Kittung und Retusche

Restaurierung
Unabhängig von den umfassenden Konsolidierungen des Gefüges und der Fassungsschichten



erfolgten weitere Arbeiten, die zur Wiederherstellung des Gesamterscheinungsbildes notwendig waren. Hierzu zählten die Klebungen von Bruchstücken und Dübeln punktuell mit Epoxidharzkleber Akepox 2010 (Vornässung und Nachreinigung mit Aceton). Die Verdübelung von Bruchstücken erfolgte mit GFK-Stäben unterschiedlicher Dimensionierung und Länge (Bild 8). Die Klammerung von Sandsteinbauteilen erfolgte mit Edlerund- bzw. Flachstahl entsprechend Bestand. Einige Sandsteinteile sind nach Demontage, Reinigung und Festigung vor der Neumontage zusammengefügt und verstärkt worden. Die Positionierung, Montage und Verklebung der Einzelteile fand jeweils im Sandbett statt. Die verwölbten Hohlstellen sind durch Injektionen mit Ledan TB1 in dest. Wasser verfüllt worden. Für die Schließung der Risse und die Stabilisierung der Rückseite wurde ein Acryldispersionsmörtel (Wesutex und dest. Wasser 1:1) sowie Sand (FEAD, Korngröße unter 0,09 mm 44 %, unter 0,25 mm 55 %, bis 0,4 mm 1 %) nach mehrfacher Grundierung eingesetzt.

Des Weiteren folgten Kittungen von Aus- und Abbrüchen mit eingefärbtem Steinersatzmörtel (Mineros 2000 PZF, Körnung 0,5 mm, Farbton D293/295) nach Vornässung auf einer Grundierung aus Acrylatdispersion (Primal SF016, 1:10 in dest. Wasser). Für Feinstkittungen wurde dieser Mörtel extra ausgesiebt (Körnung unter 0,25 mm) verwendet. Die Oberflächen sind nach Aushärtung mit Nassschleifpapieren (Körnung 100, 150, 200, 500) bearbeitet worden. In diesem Zusammenhang führten die Restauratoren auch rekonstruktive Modellierungen von fehlenden Ornament- und Schriftbereichen aus, soweit diese zweifelsfrei möglich waren.

Die Kittungen und Antragungen erfolgten nur an Ab- und Ausbrüchen sowie Rissen, soweit diese nicht von der bestehenden Fassung aus dem 19. Jahrhundert überdeckt waren. Auf Maßdifferenzen, die durch die Schädigung der Natursteinbauteile entstanden sind und nicht reversibel waren, ist bei den Verfugungen und Kittungen Bezug genommen worden. Der Versatz wurde nicht verzogen, es wurden klare Kanten ausgebildet.

Partiell ist anschließend bei Ausbrüchen im Anschluss an die Fassungsschichten eine absperrende Kittmasse (aus Reinacrylat, Paraloid B72, 5 %-ig

in Dowanol PM, Kreide, Hinterfüllmörtel Ledan TB1, Pigmente in fetter Öltempera) im Farbton der gereinigten Sichtfassung aufgebracht und nach Aushärtung partiell mit Schleifpapieren (Körnung 500, 1000, 1500) bearbeitet sowie die Randbereiche mit Terpentinersatz nachgereinigt worden. Diese Anböschungen oder Auskittungen der Farbfassungen erfolgten in Bereichen, die durch dicke, mehrlagige und teils aufstehende Fassungskpakete trotz Fassungsfestigungen einen Angriffspunkt für Feuchte-Tauwechsel darstellen. Des Weiteren umfassen sie auch kleine Ab- und Ausbrüche im profilierten Steinbereich mit Fassung (z. B. erhabene Schriftbereiche), die durch die oben genannten Kittmassen nicht hätten gesichert werden können.

Retusche

Die Retusche störender Fehlstellen innerhalb der Farbfassung, von Kittungen und Verfugungen erfolgte im Farbton der Umgebung in lasierendem, partiell mehrlagigem Auftrag. Es kam hierfür mit Terpentinöl verdünnte Künstlerölfarbe zum Einsatz. Diese Materialwahl hat den Vorteil, dass sie aufgrund des Bindemittels mit der Malschichtkantenanböschung kompatibel ist und zudem eine optimale Festigungswirkung von kleineren Malschichtkanten aufweist. Ergänzend erfolgte eine partielle Regenerierung der Öltemperafassung in geschädigten Bereichen durch Auftrag und Injizierung von Terpentinöl und behutsame Verteilung mittels Lappen zur Verbesserung der Flexibilitäts- und Haftungseigenschaften. Die Neuverfugungen sind ebenfalls entsprechend behandelt worden, da diese ursprünglich sowie bei späteren Restaurierungen nicht als Fugen behandelt, sondern als durchgehende Fläche betrachtet wurden (Bilder 15 und 16). Die Retusche der Putzflächen innerhalb der Fensterlaibungen erfolgte mit dünnen Temperalasuren in Anlehnung an den Befund und die Umgebungsfarbigkeit.

Montage

Die Neumontage der abgebauten Werkstücke erfolgte unter Verwendung der vorhandenen Ankerlöcher. Die zur Montage verwendeten Anker sind individuell an die Bauteile vor Ort angepasst wor-

den. Sie bestehen aus Edelstahl in den Abmessungen von 4–14 mm Kantenlänge, bzw. 8–12 mm Durchmesser. Außerdem fanden Winkelprofile von 30 × 30 × 4 mm Verwendung. Teilweise sind die Stücke miteinander kombiniert und vor Ort verschweißt worden. Da die konservierten und restaurierten Bauteile in ihrer Haltbarkeit mit Neumaterial nicht vergleichbar und zudem teils zu dünn dimensioniert sind, bieten sie keine ausreichende Strukturfestigkeit zur notwendigen Verankerung, um die darüber befindlichen Natursteinbauteile halten zu können. Für die Montage sind deshalb zum Teil einzelne maßgenaue Edelstahlkonstruktionen geschweißt worden, um eine ausreichende Lastableitung herzustellen. Die Feinjustierung der Steinbauteile erfolgte mit Walzbleistreifen. Beim Wiederaufbau der beiden Epitaphien wurde sich an den vorhandenen Farbschichtkanten und Abdrücken orientiert und die Bauteile diesbezüglich nach Bestand ausgerichtet. Da die einzelnen Sandsteinbauteile teils etwas verformt und unwinkelig hergestellt waren ergeben sich partiell unterschiedliche Kantenstärken und Fugenbreiten.¹⁷

Eine erneute Schließung der Wandanschlüsse war aufgrund der Salzbelastung des Wandbereiches nicht vorgesehen. Die Neuverfugungen sind bei breiteren Fugen mit Otterbein-Histocal-Mörtel (NHL, grob und fein) und einer Deckschicht aus Mineros 2000 PZF, bei schmalen Fugen nur mit Mineros 2000 PZF bündig ausgeführt worden.

Die Rekonstruktion der Putzflächen im Wand- und Tumbabereich erfolgte mit Weber Kalkgrundputz 174 und einer glatt geriebenen Oberfläche.

Zur Reparatur des Bestandsputzes und die Schließung von Rissen und Fugen im Anschluss der geputzten Fensterlaibungen an die Natursteinbauteile ist Otterbein-Histocal-Mörtel (fein 1–2 mm und grob 3–4 mm) nach Vornässung mit dest. Wasser verwendet worden.

Skulptur des Christoph von Behr

Die konservatorische Bearbeitung der Skulptur des Christoph von Behr mit ihrem individuellen, äußerst problematischen und eventuell auch einzigartigem Schadbild ist aufgrund der Höhe der momentan zur Verfügung stehenden Mittel zurückgestellt worden.

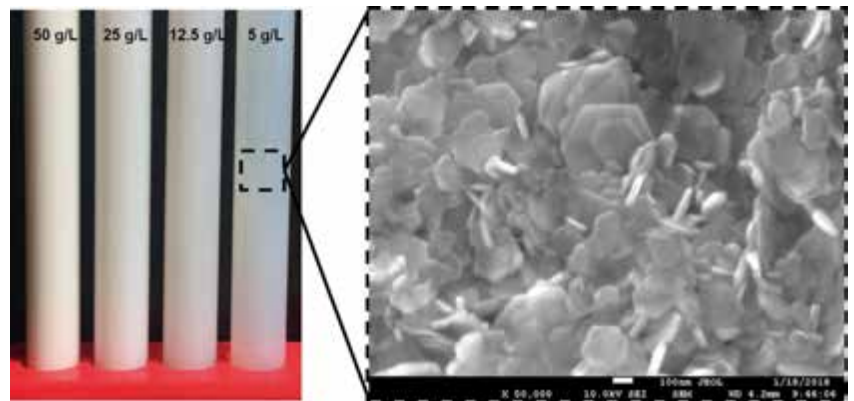
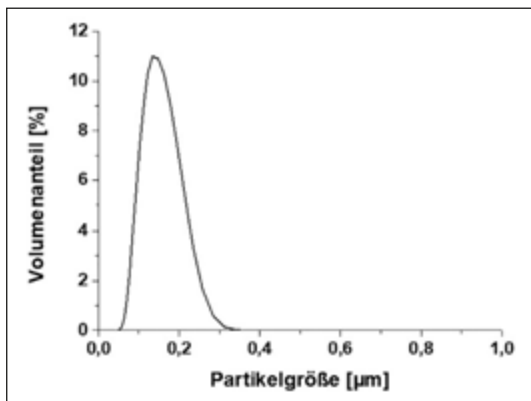


Bild 17
Vorzustand der Skulptur
Christoph von Behr

Die Skulptur besteht teils aus einer nur wenige Millimeter starken Schale. Das innenliegende Steinmaterial ist durch seine starke Schädigung äußerst desolat bzw. in Auflösung begriffen. Es sind Deformationen, Risse, Brüche und Ablösungen zu erkennen (Bild 17). Die bis zur Selbstzerstörung der Natursteinsubstanz reichende Schädigung der Skulptur aus Gotländer-Sandstein kann durch anhaltenden Feuchte-Tau-Wechsel in der Positionierung unterhalb eines Fensters begründet sein. Da dieses Phänomen nur einige nicht in Zusammenhang stehende Bauteile betrifft, können die Probleme in der besonderen Beschaffenheit und der mangelhaften Verbindung der Sedimente begründet sein. Die ursprünglich übliche Grundierung von Natursteinoberflächen für den Fassungsaufrag, mit heißem Leinöl oder eine frühere Konservierungsmaßnahme kann ebenfalls für die dünne Schalenbildung verantwortlich sein. Die Skulptur wurde aus dem Restaurierungsprojekt ausgegliedert, befindet sich derzeit als Forschungsobjekt an der FH-Potsdam und wird durch den Studiengang Steinrestaurierung unter Leitung von Frau Prof. Dr. Meinhardt bis 2021 bearbeitet. Für den Fall eines Transportschadens wurde ein 3-D-Scan im Vorfeld (vor der Transportsicherung) erstellt.



Bild 18
Chorbereich der Dorfkirche
während der Restaurierung
im August 2019



Teil 2: Grundlagen zu Nanokalk Dispersionen

Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ist ein Material mit vielen Bezeichnungen wie Kalk, Löschkalk, Weißkalkhydrat oder Luftkalk, um nur einige Beispiele zu nennen. Der mineralogische Name ist Portlandit. Eingesetzt wird Kalk seit mehr als 2000 Jahren als Bindemittel in Mörteln oder Putzen. In allen Fällen basieren die Binde- und Verfestigungseffekte auf der Reaktion mit Kohlenstoffdioxid (CO_2), die zur Bildung von Calciumcarbonat (CaCO_3) führt. Die sehr komplexe Reaktion lässt sich formal mit der Gleichung $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ zusammenfassen. Konventioneller Kalk, der als Bindemittel in verschiedenen Schlämmen verwendet wird, zeichnet sich durch eine breite Korngrößenverteilung aus, die von wenigen Mikrometern bis zu Aggregaten/Agglomeraten mit Größen bis zu mehreren µm reicht. Im Gegensatz dazu sind Nanokalkprodukte durch Partikel mit Größen im Bereich von 50 nm bis 250 nm charakterisiert, die etwa hundertmal kleiner sind als die von konventionellem Kalk (Bild 19). Im Gegensatz zu herkömmlichen Kalkbindemitteln sind die Nanokalkpartikel in verschiedenen Alkoholen (Ethanol, iso-Propanol, n-Propanol) stabil dispergiert. Dadurch ist gewährleistet, dass keine Agglomeration und Aggregatbildung stattfindet bzw. stark reduziert wird. Die Partikel bleiben lange Zeit (mindestens 6 Monate) in ihrer ursprünglichen mineralogischen Plattenform (Bild 20). Typische Produkte haben Konzentrationen zwischen 5 g/L und 50 g/L, die Haupteigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die geringe Partikelgröße in Verbindung mit einem ausgezeichneten Benetzungsverhalten garantieren

ein gutes Eindringen auch in dichte Strukturen. Nach dem Verdampfen des Alkohols befindet sich in den behandelten Strukturen Calciumhydroxid, das durch Carbonatisierung die gewünschte Festigkeit erhält. Abhängig von der Anzahl der Anwendungen und den verwendeten Konzentrationen können mehrere Grade der Porenraumfüllung erreicht werden. Die gebildeten CaCO_3 -Kristalle überbrücken lockere Zonen, was zu deutlich erhöhten mechanischen Festigkeiten führt (Bild 21). Wenn eine signifikante Erhöhung der mechanischen Festigkeit erforderlich ist, bietet die Kombination von Nanokalk und Kieselsäureestern ein breites Anwendungsspektrum, auch zur Behandlung von Substraten, die normalerweise mit Kieselsäureestern schwierig zu festigen sind. Alle Nanokalk-Produkte sind vollständig mischbar mit Tetraethylorthosilikat (TEOS) oder kommerziell erhältlichen Kieselsäureestern. Aufgrund des alkalischen Charakters der Nanokalk-Produkte kommt es beim Mischen der beiden Komponenten zur

Bild 19

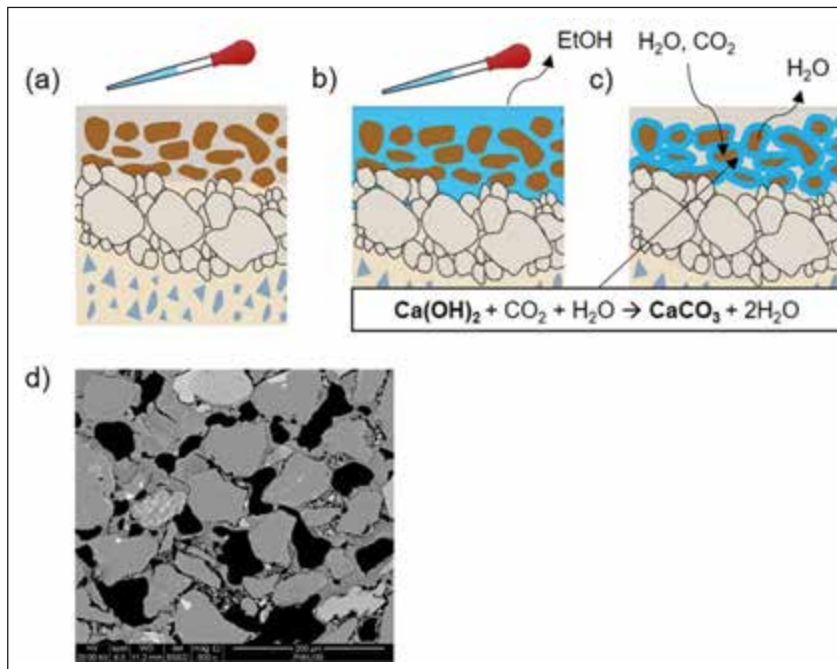
Partikelgrößenverteilung von CaLoSil E25 gemessen mittels Laserbeugung

Bild 20

verschieden konzentrierte Nanokalk-Pprodukte 5 bis 50 g je L mit typischer REM-Aufnahme von CaLoSil® E25

Tabelle 1 Eigenschaften ausgewählter CaLoSil® Nanokalk-Produkte

CaLoSil®	Lösungsmittel	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gehalt [g/L]	Dichte [g/cm³]	Dyn. Viskosität [mPas]
E50	Ethanol	50	0,83	1,8
E25	Ethanol	25	0,81	1,6
E5	Ethanol	5	0,79	1,3
IP25	iso-Propanol/Ethanol	25	0,81	1,9
IP5	iso-Propanol/Ethanol	5	0,79	2,3
NP25	n-Propanol/Ethanol	25	0,82	1,9
NP5	n-Propanol/Ethanol	5	0,80	2,1

**Bild 21**

a)–c) Schematische Darstellung der Festigung poröser Substrate mit CaLoSil-Nanokalk
d) REM-Aufnahme einer Probe gefestigt mit CaLoSil E25

Hydrolyse, die zur Bildung von Kieselsäuregelen führt. Homogene Mischungen aus Kieselsäureestern und alkoholischen Nanokalkdispersionen sind nur vorübergehend stabil. Je höher der Anteil an Nanokalk in der Mischung ist, desto schneller erfolgt die Gelbildung. Eine signifikante Verfestigung von Stein, Mörtel und Putz kann bei einer sukzessiven Anwendung erreicht werden. Unter diesen Bedingungen wirken die gebildeten Calciumhydroxidschichten sowohl als Katalysator als auch als Haftvermittler zwischen der ursprünglichen Oberfläche und dem gebildeten Kieselgel. Der Einsatz der kombinierten Anwendung erfolgte bereits bei mehreren Arbeiten, wobei sich bislang zeigte, dass die Anwendung des Kieselsäureesters ca. 24 Stunden nach der Behandlung mit Nanokalk am erfolgreichsten ist. Möglich ist auch die Nanokalk-Behandlung mehrmals zu wiederholen, bevor die Anwendung des Kieselsäureesters beginnt. Generell gilt: je höher die Anzahl der Sättigungen mit Nanokalk, desto höher ist die Festigung nach dem Einsatz der Kieselsäureester. Umfassende Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Unterbrechung der Behandlungen für 24 Stunden nach der

letzten Anwendung des Nanosols die günstigste Verstärkung ergibt. Sowohl längere als auch kürzere Pausen ergeben geringere Festigkeiten. Wahrscheinlich wird eine signifikante Carbonatisierung einsetzen, wenn die mit Nanokalk behandelten Materialien länger als 24 Stunden der Atmosphäre ausgesetzt sind. Andererseits werden kürzere Zeiten nicht ausreichen, um die Alkohole vollständig zu verdampfen.

Zusammenfassung

Die umfassenden Konsolidierungs- und Konservierungs- sowie Restaurierungsarbeiten der beiden Wandepitaphe aus der Renaissancezeit stellen einen wichtigen Schritt zur Erhaltung der wertvollen Ausstattung in der Dorfkirche Semlow dar. Die in den Jahren 2018–2019 reliefartig bzw. bildplastisch bearbeiteten Epitaphbauteile zeigten ein sehr differenziertes Schadbild. Bei einigen Bauteilen war die Sandsteinoberfläche vom Untergrund gelöst und die Natursteinsubstanz teils gelockert und sandend, schichtparallel aufgespalten bis blätterartig in Auflösung begriffen. Für diese Problematik konnten entsprechend bekannte Möglichkeiten der Konsolidierung weiterentwickelt werden. In der Kombination von Tränkungen mit Kieselsäureestern und Nanokalkprodukten sind technisch umsetzbare Verfahren entwickelt worden. Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten sowie der Neumontage am originalen Standort und der Beobachtung der gefestigten Bauteile über zwei Jahre können die Ergebnisse als vielversprechend für den Umgang mit ähnlichen Problemen im Natursteinbereich bezeichnet werden. Die im Rahmen der Restaurierung wiederhergestellte Farbgebung des 19. Jahrhunderts kann als künstlerische Eigenständigkeit im Zusammenhang mit den Farbglasfenstern betrachtet werden. Weitere Fragestellungen zur Strukturkonsolidierung der bislang unearbeiteten Skulptur Christoph von Behr bleiben bestehen.

Anmerkungen

- 1 Lisch, Georg Christian Friedrich: Die Kirche zu Semlow, erschienen in: Jahrbücher des Vereins für Mecklenburgische Geschichte und Altertumskunde, Bd. 23, 1858, S. 318–320
- 2 Kuhnert, Elke (98): Diplomarbeit HfBK Dresden, Praktischer Teil: Die Untersuchung und Dokumentati-on der spätnazarenischen Raumausmalung von Carl Julius Milde 1861 in der Dorfkirche zu Semlow und Erstellung einer Konservierungs- und Restaurierungs-konzeption. Erstellen einer Probe- und Musterachse an der Darstellung des Erzengels Jophiels, des 1. Engels von Westen und der dazwischen liegenden Wandfondflächen und Architekturrahmung. Theoretischer Teil: Das Schaffen des Lübecker Denkmalpflegers Carl Julius Milde als Wandmaler und Raumgestalter am Beispiel der Dorfkirche zu Semlow.
- 3 Anna Jolly: Philipp Brandin, ein niederländischer Bildhauer des 16. Jahrhunderts im Dienst der Herzöge Mecklenburgs, in: Oud Holland, 113/1999, S. 30
- 4 Dr. Carten Neumann: Die Renaissancekunst am Hofe Ulrichs zu Mecklenburg, Schleswig-Holsteinische Schriften zur Kunstgeschichte, Band 15, Kiel 2009, S. 121 ff.
- 5 Robert Hedicke: Cornelius Floris und die Florisdekoration, Studien zur niederländischen Kunst im XVI. Jahrhundert, Berlin 1913, S. 225
- 6 Die Aussage beruht auf den Anmerkungen von Dr. Dieter Pocher, Güstrow 2019.
- 7 Die Aussage beruht auf den Anmerkungen von Dr. Dieter Pocher, Güstrow 2019.
- 8 Michael-Christian Krempler: Petrographisches Schadensgutachten, 2018, unveröffentlicht
- 9 Carsten Schneider: Kirche Semlow, Untersuchung der Epitaphien am Südwand-Chor, Adam von Behr, Christoph von Behr, 2016, S. 84 ff., unveröffentlicht
- 10 Carsten Schneider: Kirche Semlow, Untersuchung der Epitaphien am Südwand-Chor, Adam von Behr, Christoph von Behr, 2016, S. 57 ff, unveröffentlicht
- 11 Carsten Schneider: Dorfkirche zu Semlow, Epitaphien Adam und Christoph von Behr, Stellung-nahme zur erweiterten Untersuchung des Schadsalz-vorkommens, Juni 2018, unveröffentlicht
- 12 Michael-Christian Krempler: Petrographisches Schadensgutachten, 2018, unveröffentlicht
- 13 Die Demontagearbeiten sind durch die Restaurierung am Oberbaum GmbH Berlin ausgeführt worden.
- 14 Die Rezeptur wurde durch Hendrik Seipt, Werkart GbR Wittstock 2010 modifiziert.
- 15 Boris Froberg, vertiefende restauratorische Untersuchungen, Monument des Borwin im Güstrower Dom, 2011, unveröffentlicht
- 16 Dr. Claudia Dietze: Steinproben aus Semlow, Bericht des IBZ Salzchemie GmbH & Co. KG, Juni 2019
- 17 Die Montagearbeiten sind durch die Restaurierung am Oberbaum GmbH Berlin ausgeführt worden.

Bildnachweis

- Bilder 1, 3: Fabio Froberg, Berlin
 Bilder 2, 4–7, 9–18: Boris Froberg, Berlin
 Bild 8: Jan Hamann, RAO GmbH Berlin
 Bilder 19–20: Dr. Claudia Dietze,
 IBZ- Salzchemie GmbH & Co. KG Halsbrücke
 Bild 21: Eleni Mascha,
 Universität für angewandte Kunst Wien,
 Inst. f. Kunst und Technologie

Hoppenlau-Friedhof Stuttgart

1.600 Grabsteine – Schadens Erfassung, Konzeption und Planung der Konservierung



Im Jahr 2010 – zwanzig Jahre nach einer umfangreichen Restaurierung – war trotz ständiger Kontrollen und zügiger Durchführung notwendiger Reparaturen festzustellen, dass der Zerfall der historischen Sandsteine auf dem Hoppenlau-Friedhof Stuttgart rapide voranschritt. Der übliche jährliche Erhaltungsaufwand reichte bei Weitem nicht mehr aus, um alle neuen und wiederaufgetretenen Schäden an den Grabdenkmälern in den Griff zu bekommen. Befördert durch politischen und öffentlichen Druck war zügig die Konzeption einer Konservierung des gesamten Grabmalinventars zu planen. In konsequenter Abstimmung zwischen der Stadt Stuttgart und den Denkmalbehörden gelang es in den Jahren 2012–2019 auf Grundlage einer eingehenden Schadensanalyse rund 860 Einzeldenkmale zu konsolidieren.

Maurus Baldermann
Juliane Weigele
Judit Zöldföldi

1 Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung

Im Sommer 1986 wurde der Hoppenlau-Friedhof, in seinem 360. Jahr, in Stuttgart-Mitte unweit der Liederhalle, zwischen Holzgartenstraße, Forststraße und Rosenbergstraße gelegen, durch das Regierungspräsidium Stuttgart als Kulturdenkmal in das Denkmalbuch eingetragen (Bild 2). Die Sachgesamtheit betrifft den Friedhof innerhalb der Friedhofsmauer einschließlich des jüdischen Teils. Die anlässlich der Bundesgartenschau 1961 aufgestellten Muster-Grabmale im nördlichen Teil des Friedhofs sind nicht Teil der Sachgesamtheit. Im Hoppenlau-Friedhof befinden sich über 1.600 Grabdenkmale aus dem 18. und 19. Jahrhundert, wenige noch ältere (Bild 1). Eigentümerin ist die Landeshauptstadt Stuttgart sowie die Israelitische Religionsgemeinschaft Württembergs für den jüdischen Friedhofsteil.

Auszüge aus der Eintragungsbegründung

»Der Hoppenlau-Friedhof ist der älteste noch erhaltene Alt-Stuttgarter Friedhof. Er wurde 1626 vor den Toren der Stadt angelegt und erst 1880 aufgelassen. Die besondere Bedeutung liegt in seiner überregionalen stadt- und landesgeschichtlichen Qualität. Der Friedhof wurde von der Südostmauer ausgehend auf annähernd quadratischer Grundfläche eingerichtet. Teile der Umfassungsmauern mit Bogen-Nischen an der Innenseite mögen noch aus der Frühzeit des Friedhofs stammen, dessen Renaissancetor (1629 vom Schickardt-Schüler Kaspar Kretzmayer errichtet) sich heute im Lapidarium der Stadt befindet. Die weitere Geschichte ist wie vielfach bei Friedhöfen eine der Erweiterungen: 1749/53 wurde er bis auf Höhe des späteren israelitischen Friedhofs verlängert; 1811/13 bis zum Rondell-Querweg um ein weiteres Feld erweitert und ab 1840 bis zur Rosenbergstraße auf eine unregelmäßige Fläche von fast 3 ha gebracht.

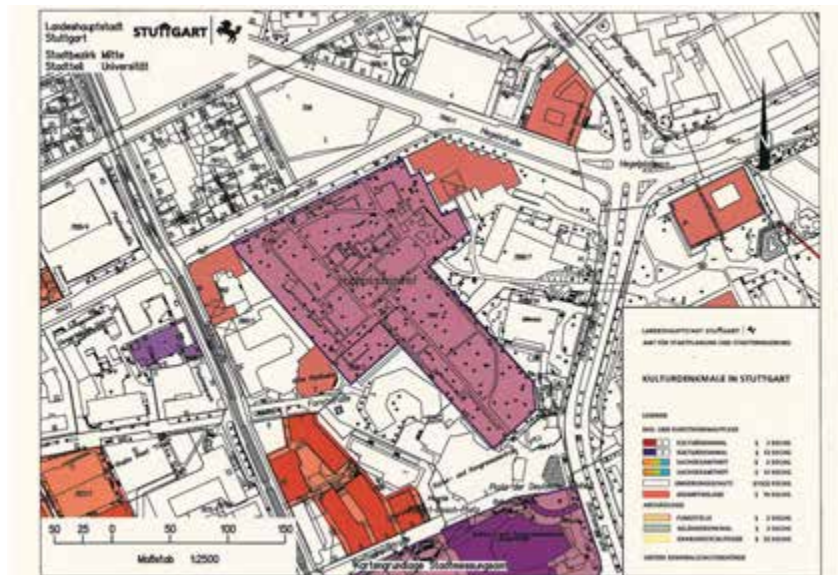
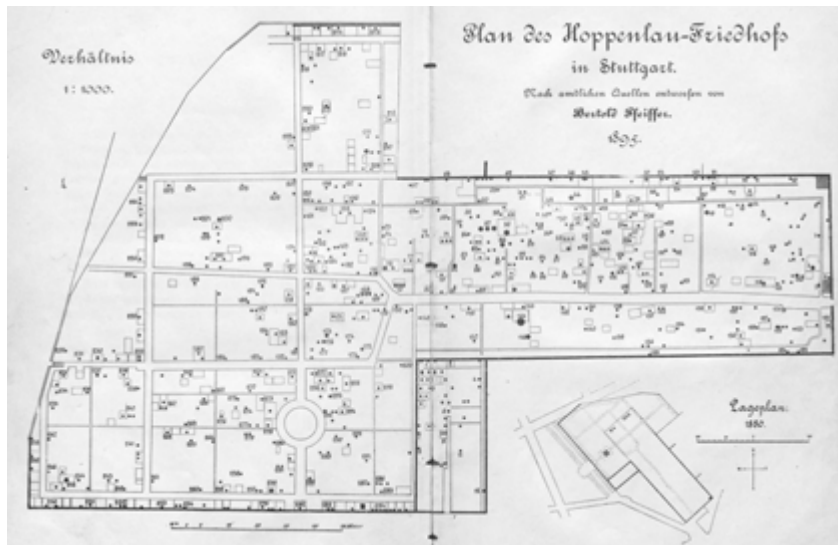


Bild 1
Plan des Hoppenlau-
Friedhofs [1]

Bild 2
Kulturdenkmal, Karten-
grundlage Stadtmessungsamt
Stuttgart, Stand 2019

Im südwestlichen Winkel war ab 1834 der eigens ummauerte israelitische Friedhof angelegt worden. Die nur im Nordwesten aufgebrochene Um-mauerung weist noch deutlich auf den verschleiß-baren, einst »heiligen« Bezirk.

Die einzelnen Grabdenkmale, von denen viele aufgrund ihrer zusätzlichen künstlerischen Be-deutung für sich alleine Denkmalwert haben, stammen überwiegend aus dem 18. und 19. Jahr-hundert. Der Schwerpunkt der Grabdenkmäler liegt im frühen 19. Jahrhundert. Mit der vielfäl-tigen Ikonografie zum Thema Tod und Jenseits und der Verewigung des Verstorbenen sind die Grabsteine kulturgeschichtliche Zeugnisse ersten Ranges. Der Kunsthistoriker kann an ihnen die

unterschiedlichen Grabmaltypen und deren Iko-nologie studieren, die eine überwiegend protes-tantische Bevölkerung als Erinnerungsmaile ihrer Toten schuf. Nicht zuletzt aus diesen Gründen wurden 1963 bereits 546 Grabdenkmale, als Kul-turdenkmale von besonderer Bedeutung, in das Landesverzeichnis der Baudenkmale nach Artikel 97/ VII der württembergischen Bauordnung ein-getragen. (...)

Der »Hoppenlau-Friedhof« gehört nicht nur zu den bedeutendsten historischen Friedhöfen der Bun-desrepublik Deutschland, sondern er wurde zum Spiegel einer 250jährigen Familien- und Stadt-geschichte. Durch seine zahlreichen Grabmäler prominenter Württemberger hat er im Bewusst-sein der Stuttgarter Bevölkerung nichts an Bedeu-tung eingebüßt und ist somit auch von erheb-licher heimatgeschichtlicher Bedeutung. Nicht nur bekannte Dichter wie Wilhelm Hauff, Gustav Schwab und Christian Friedrich Daniel Schubart haben hier ihre Gräber, auch eine große Anzahl all derer, die während des 18. und 19. Jahrhun-derts in Württemberg und Stuttgart eine Rolle spielten – Politiker, Militärs, Beamte, Industrielle und Kaufleute, Theologen und Professoren, Ärzte und Künstler. [Weiterführende Literatur 2, 3, 4, 7]

Einen eigenen Charakter hat der Begräbnisplatz der Israeliten mit enger und regelmäßiger gereihten Grabmälern, bei denen die hebräischen In-schriften charakteristisch sind. Die gleichförmiger erscheinenden Grabmäler sind dennoch variabel im Stelen-Typus und in den Verzierungen. Dieser 1872 gering erweiterte Friedhofsteil wurde erst 1882 geschlossen. Er bildet bis heute einen deutlich ablesbaren eigenen Bereich und spiegelt so ein Stück Sozial- und Religionsgeschichte der Stadt wider. (...) [9]

Trotz dieser nicht unerheblichen Eingriffe sind noch wesentliche Teile der ursprünglichen Sub-stanz des historischen Friedhofs erhalten. Mit der Eintragung des Hoppenlau-Friedhofs als Sachge-samtheit in das Denkmalsbuch soll erreicht wer-den, dass die Einheit und Geschlossenheit des alten Begräbnisplatzes erhalten werden kann und vor weiteren störenden Eingriffen geschützt ist.» (Bild 3) [5, 6].



Bild 3
Grabmal-Bestandsplan, Karten-
grundlage Friedhofsamt Stadt
Stuttgart, Stand 1987 [7]

2 Restaurierungsgeschichte

Von 1982 bis 1990 erfolgten erstmals steinmetzmäßige und restauratorische Maßnahmen an zahlreichen Grabmalen des Hoppenlau-Friedhofs. Die durchgeführten Arbeiten wurden in einem Kartei-kartensystem festgehalten. Im Wesentlichen waren es Festigungen, Hydrophobierungen, Kittungen und Antragungen, Schaleninjektionen, Einbau von Bleifolien und Lagerung von liegenden Platten auf Kiesel-schüttungen.

Im damaligen Abschlussbericht heißt es:

»Die Grabmale im Hoppenlau-Friedhof beste-hen – bis auf wenige Ausnahmen – aus Sand-stein, überwiegend mit tonig-kalkigem Bindemit-tel, d. h. sie sind nicht säurebeständig. Die im Prinzip ganz natürliche Verwitterung auf physika-lische, chemische oder biologische Art wird durch Umwelteinflüsse zunehmend beschleunigt und führt zu fortschreitendem Zerfall. Die Scha-densbilder zeigen Absandungen durch zerstörte Bindemittel, Risse- und Schalenbildungen durch Wasser-, Frost- und Salzeinwirkungen in allen möglichen Stadien bis zur Zerstörung.

Hauptzweck aller Maßnahmen war es, vorhan-dene Schäden zu reparieren und den Zerfall sichtbar zu bremsen. Um die Grabmale gegen zerstörende, salzhaltige, aufsteigende Grund-feuchte abzuschirmen, wurden deshalb die ste-henden Steine – soweit möglich – durch Einbrin-

gen einer Bleifolie an der Standfuge isoliert. Die liegenden Steine wurden auch auf der Unterseite (wasserabweisend) hydrophobiert und auf ein Schotterbett neu verlegt. Dabei wurden insge-samt ca. 260 t Steine bewegt.

Gegen die chemische Verwitterung der Bindemit-tel wurden die Steine nach vorsichtiger Reinigung mit Kieselsäureester zweimal bis zur Sättigung geflutet; es entstehen neue kieselige Bindemittel und damit wird eine Verfestigung der Sandsteine bewirkt. Nachfolgend wurden die Steine ringsum wasserabweisend hydrophobiert. Bis auf einige Grabmale aus Granit, Marmor oder Kalkstein und einige bereits zu stark verwitterte Sandsteine wurden alle Grabmale behandelt und dafür 3.300 Liter Kieselsäureester zur Verfestigung und 1.380 Liter hydrophobierende Silanlösung verarbeitet.

Die Schäden durch Risse- und Schalenbildungen waren sehr häufig, teilweise sind größere Flächen abgeblättert. Durch Schließen der Risse und Kle-ben der noch vorhandenen Teile wurde der wei-tere Zerfall gestoppt. Mit verschiedenen dünn-flüssigen Epoxidharzen, teilweise durch Injekti-onen über kleine Bohrlöcher, wurden erkennbare Schäden auch vorbeugend gesichert und ver-klebt. Steinmetzmäßige Ergänzungen wurden in Ausnahmefällen zur Wiederherstellung von Ge-simsen, Profilen, Wassernasen und wasserab-leitenden Teilen sowie an einigen Schriftflächen vorgenommen. Für diese Sicherungsmaßnahmen

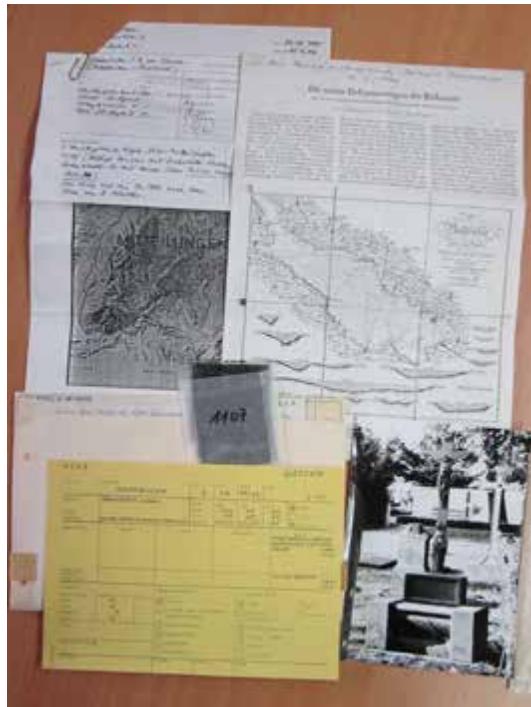


Bild 4

Inhalt einer Karteitasche,
Dokumentation aus den
1980er Jahre

an circa 570 Grabmalen sind über 10.000 Arbeitsstunden von Bildhauern und Steinmetzen geleistet worden.

Entsprechend der Empfehlung des Landesdenkmalamts wurde versuchsweise an fünf ausgesuchten Einzelteilen eine Acrylharz-Volltränkung durchgeführt. Das Ergebnis entspricht voll den Erwartungen, aber infolge der hohen Kosten kann diese Behandlung nur bei ganz besonders wertvollen Stücken angewendet werden. Einige bedeutende Grabmale wurden in Abstimmung mit dem Landesdenkmalamt und dem Kulturamt ganz oder teilweise neu angefertigt (z. B. General von Scheler oder Luise Duttenhofer), andere zum Teil durch objektgebundene Spenden umfassend steinmetzmäßig restauriert (z. B. von Sick, Etzel, Frau Pistorius u. a.). Alle gusseisernen Grabzeichen, 224 Kreuze, circa 70 Schriftplatten und 4 große mehrteilige Grabmale wurden entrostet, verzinkt und wetterfest gestrichen. Die meisten konnten vor Ort behandelt werden. Der schwierigste Bereich war das Schweißen von ca. 30 Stück zum Teil mutwillig abgebrochenen gusseisernen Kreuzen.

Zur Dokumentation wurde eine Kartei angelegt. In einer für jedes Grabzeichen vorhandenen Tasche befindet sich eine Karteikarte mit An-

gaben über Grab-Lage, Material, Größe, noch lesbare oder bekannte Inschriften, ferner Schadensbefund, geplante und durchgeführte Maßnahmen, wann und von wem sowie der jeweilige Aufwand. Fotos mit den Negativen, eventuell Zeichnungen und vorhandener Schriftverkehr befinden sich ebenfalls in dem entsprechenden Fach. Jedes Grabmal hat eine Arbeitsnummer, fortlaufend nach Grabfolge und in die angefertigten Lagepläne übertragen. Für jede Abteilung wurde ein Lageplan mit Namensliste nach Arbeitsnummern erstellt, außerdem eine alphabetische Namensliste für den Gesamtfriedhof mit der jeweiligen Grab-Lage und Kurzbezeichnung über die Grabmalart. In der Kartei befinden sich insgesamt 2.550 Fotos.» [8] (Bild 4)

2.1 Beurteilung der früheren Restaurierungsmaßnahmen

Zu einem großen Teil haben sich die im Zuge der Restaurierung in den 1980er Jahren ausgeführten Maßnahmen bewährt und einen wesentlichen Beitrag zur Substanzerhaltung geleistet. Die überwiegend im Sinne einer konservierenden Kittung angebrachten Anböschungen an Abbruch- und Schalenkanten konnten bei der erneuten Konservierung beibehalten werden, auch wenn sie farblich teilweise von der Steinfarbe abweichen. Dagegen hat die für das Verschließen von Rissen gewählte Methode der Überschlämmung keinen nachhaltigen Rissverschluss ermöglicht. Auch haben die für das Sichern von Schalenbildungen verwendeten Epoxidharz-Injektionen keine flächige und dauerhafte Anbindung der Schalen bewirkt. Diese wurden bisher vielmehr durch die vorgenommenen Anböschungen gestützt und gesichert.

Die Lagerung auf Kiesschüttungen hatte wesentlich zur guten Erhaltung zahlreicher Bodenplatten beigetragen. Dagegen waren bei den Stelen und mehrteiligen Grabmalen die unteren Sockelsteine vielfach teilweise von Erdreich bedeckt und so schädigenden Einflüssen ausgesetzt. Bleifolien zur Unterbrechung kapillar aufsteigender Feuchtigkeit wurden über den Sockelsteinen eingebaut, so dass sich an Aufbauten wenige Schäden zeigten, die Sockel jedoch fortschreitendem Zerfall preisgegeben waren.

Das auffällige Schadensbild der teilweise großflächigen, sehr dünnen und häufig deformierten Steinschalen bestand in den 1980er Jahren offensichtlich noch nicht, da sie keine Behandlungsspuren aufweisen. Sie sind demnach eine neue Schadensentwicklung seither und vermutlich auf die Hydrophobierung zurückzuführen. Damals wurden alle Sandsteine auf dem Friedhof hydrophobiert, so dass heute an sehr vielen Grabsteinen die flächigen Schalenbildungen anzutreffen sind. An der Planung und Ausführung der Maßnahmen war der Fachbereich Steinrestaurierung im Landesamt für Denkmalpflege, der in dieser Zeit erst eingerichtet wurde, nicht beteiligt.

An den mit einer Acrylharz-Volltränkung behandelten Grabsteinen bzw. Grabsteinteilen sind heute vor allem Risse festzustellen, vereinzelt Schalenbildungen bzw. abgelöste Anstrichungen, in einem Fall Salzbelastung in rückgewitterten Bereichen. Alle erneuten Eingriffe zur Rissfüllung und Schalenanbindung können nur mit den vom Anwender empfohlenen Kunstharzen ausgeführt werden.

Maßnahmen zur Salzreduzierung wurden in der damaligen Kampagne nicht durchgeführt. Bei der aktuellen Konservierung behindert die Hydrophobierung die Salzextraktionen durch Kompressen maßgeblich.

Farbfassungen wurden bei den damaligen Maßnahmen nicht berücksichtigt. Dabei handelt es sich vorwiegend um farbig gefasste oder mit Metallauflagen (Gold) versehene Inschriften, an einzelnen Grabsteinen um Fassungen der gesamten Ansichtsfläche. Die Farbfassungen auf den Metallkreuzen gingen durch das Entrosten und Verzinken vollständig verloren.

2.2 Notwendigkeit der Steinkonservierung

Im Jahr 2010 musste trotz ständiger Kontrollen und zügiger Durchführung notwendiger Reparaturen festgestellt werden, dass der Zerfall der Sandsteine im Hoppenlau-Friedhof rapide voranschritt. Der übliche jährliche Unterhaltungsaufwand reichte bei Weitem nicht mehr aus, um alle neuen und wieder aufgetretenen Schäden an den Grabdenkmälern in den Griff zu bekommen. Befördert durch den poli-

tischen und öffentlichen Druck musste kurzfristig über erneute Konservierungsmaßnahmen des gesamten Grabmalinventars beraten werden. In Abstimmung zwischen der Stadt Stuttgart und den Denkmalbehörden mit den dort tätigen Fachleuten gelang es, die Finanzierung einer notwendigen Schadensanalyse zu ermöglichen.

Als Grundlage für die Maßnahmenkonzeption und Kostenermittlung an den Grabdenkmälern im Hoppenlau-Friedhof beauftragte das Garten-, Friedhofs- und Forstamt Stuttgart im August 2012 eine restauratorische Erfassung der insgesamt 1.675 Grabmale im allgemeinen und im jüdischen Friedhofteil. Diese umfasste eine kurze Bestands- und Schadensbewertung für jeden Grabstein sowie die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse in Tabellen mit Fotos. Das Garten-, Friedhofs- und Forstamt stellte Lage- und Bestandspläne und die im Zuge der früheren Erhaltungsmaßnahmen für jeden Grabstein angelegten Karteikarten mit den Fotos zur Verfügung. Diese Unterlagen wurden zur Lokalisierung und Identifizierung der Grabmale genutzt.

3 Schadensanalyse 2012

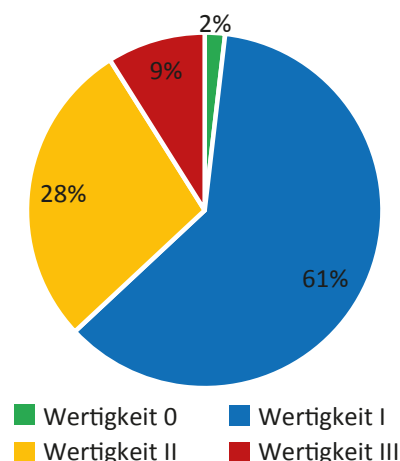
Zielsetzung der Analyse im August 2012 war die Erfassung der Grabmale auf dem Hoppenlau-Friedhof hinsichtlich ihrer Schädigung und des erforderlichen Erhaltungsaufwands. Das Ergebnis der Analyse lag Ende September 2012 vor. Die Grabmale wurden unter den Gesichtspunkten Erhaltungszustand, Wertigkeit, Schadensausmaß, Erhaltungsaufwand und Dringlichkeit konservierender Eingriffe aufgenommen. Eine weitere Auswertung vorliegender Informationen zu früher bereits erfolgten konservierenden Behandlungen konnte aufgrund des engen Zeitrahmens nicht erfolgen.

Schadenserfassung

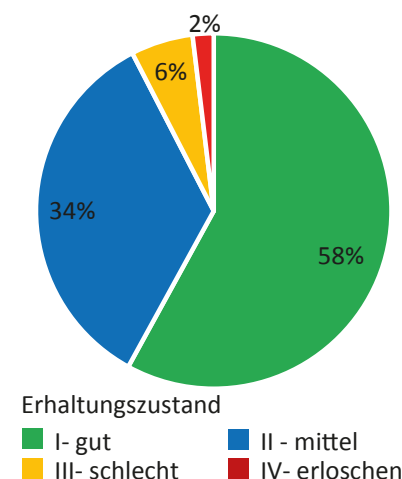
Der Bestand an Grabmalen wurde zahlenmäßig erfasst: 1.464 Grabmale auf dem christlichen und 211 auf dem jüdischen Friedhof. Acht Grabmale wurden an den in den Plänen vermerkten Standorten nicht aufgefunden. Eine zeitliche oder stilis-

Tabelle 1 Wertigkeit der Grabmale auf Grundlage folgender Definitionen

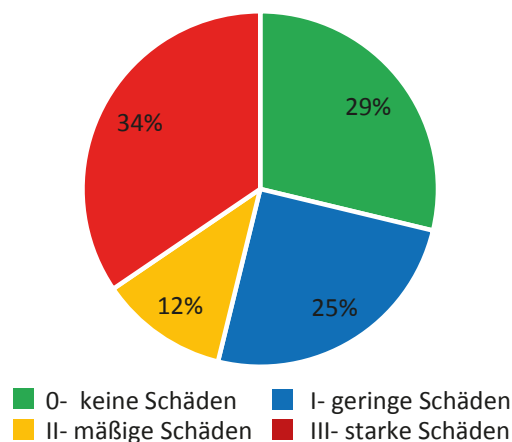
Wertigkeit	Beschreibung	Anzahl der Objekte
Wertigkeit 0	Erlrochenes Grabmal; Informationsverluste von Text und Form; nur Sockel, ohne Inschrift; allgemeiner Bestandteil des Friedhofs	27
Wertigkeit I	einfache Bodenplatte, auch mit vollständiger gut erhaltener Inschrift und/oder Marmorplatte; einfaches Metallkreuz; Informationsverluste Form; Schrift (weitestgehend) verloren	896
Wertigkeit II	Beispiel einer Gattung, gute Qualität bei gutem Erhaltungszustand; Inschrift erhalten/lesbar; ornamentales Schmuckrelief; erhaben ausgeführte Inschrift, aufwändig ornamentiertes, durchbrochenes Metallkreuz	410
Wertigkeit III	herausragender künstlerischer Wert und guter Erhaltungszustand, Fassung (Malschicht, Metallauflage); bedeutende Persönlichkeit	131

**Tabelle 2** Kategorien der Erhaltungszustände der Grabmale

Erhaltungszustand	Beschreibung	Anzahl der Objekte
I - gut	Grundformen ablesbar; Inschrift ablesbar; Fragmentierungen unter 20 % der Gesamtoberfläche; Reduzierungen unter 50 % der Gesamtoberfläche	849
II - mittel	Teilverlust, Grundform und Aussage rekonstruierbar; Teilverlust Inschrift, Aussage bedingt rekonstruierbar; Fragmentierungen zwischen 20 % bis 50 % der Gesamtoberfläche; Reduzierungen mehr als 50 % der Gesamtoberfläche	504
III - schlecht	Verlust wesentlicher Teile der Grundform, Aussage teilweise verloren; Verlust wesentlicher Teile der Inschrift, Aussage teilweise verloren; Fragmentierungen über 50 % der Gesamtoberfläche; Reduzierungen über 50 % der Gesamtoberfläche	83
IV - erloschenes Dokument	Verlust wesentlicher Teile der Grundform, Verlust der Inschrift bzw. keine Inschrift vorhanden, Aussage verloren	28

**Tabelle 3** Differenzierung der Schäden und des Schadensumfangs

Schadens-kategorie	Beschreibung	Anzahl der Objekte
0 - keine Schäden	keine akut fortschreitenden Schäden; durchschnittliche Dichte biogener Beläge durch Algen, Flechten etc.; übliche Wartung/Pflegemaßnahmen (Pflanzenrückschnitt) sind ausreichend;	425
I - geringe Schäden	expositionsbedingtes partielles Absanden unter 20 % der Gesamtoberfläche; vereinzelte kurze Risse, die nicht zu Verlusten führen; partielles Abschalen ist auf die Sockelzonen begrenzt; durchschnittliche Dichte biogener Beläge durch Algen, Flechten etc.	366
II - mäßige Schäden	partielles Absanden und Zermürbungen über 20 % der Gesamtoberfläche; Risse, die unbehandelt zu Formverlusten führen werden; Schalenbildungen, die unbehandelt zu Verlusten führen werden; starke biogene Beläge und Pflanzenwachstum, z. B. Efeu am Sockel, wobei keine unmittelbare Substanzgefährdung besteht	176
III - starke Schäden	Schadensprozesse in inhaltlich relevanten Partien, z. B. Inschriften; partielles Absanden und Zermürbungen über 50 % der Gesamtoberfläche; Risse, die unbehandelt kurzfristig zu wesentlichen Formverlusten führen werden, z. B. kompletter Zierelemente; Abschalen, das unbehandelt kurzfristig zu Verlusten führen wird, z. B. Abspaltungen oberflächenparalleler Schalen; starke biogene Beläge und Substanzgefährdung durch Pflanzenwachstum	498



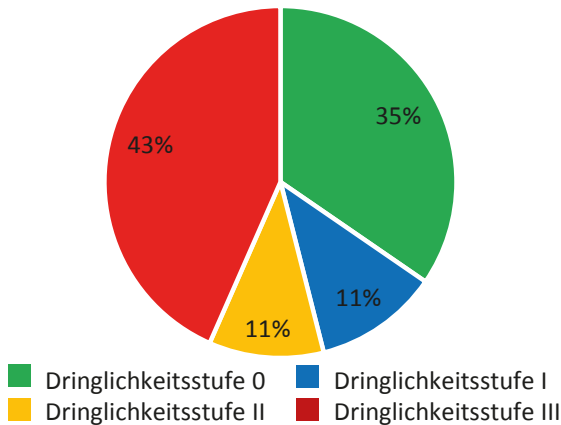


Tabelle 4 Einteilung in Dringlichkeitsstufen

Dringlichkeit	Beschreibung	Anzahl der Objekte
Dringlichkeitsstufe 0	keine Dringlichkeit; Erhaltungsmaßnahmen im Rahmen regelmäßiger Wartung und Pflege	498
Dringlichkeitsstufe I	Erhaltungsmaßnahmen/Konservierung langfristig erforderlich; langfristig werden Substanz-Verluste eintreten; partielle Substanz-Verluste führen nicht unmittelbar zu Informations- und Wertigkeitsverlust, z. B. Schäden außerhalb Inschrift und Relief	165
Dringlichkeitsstufe II	konservierende Maßnahmen sind zum Substanzerhalt erforderlich; akut fortschreitende Schadensprozesse führen zu Minderung der Information und Wertigkeit	152
Dringlichkeitsstufe III	sofortiger Handlungsbedarf; akute Gefährdung, drohender Verlust relevanter Informationen	625



Bild 5
Grabmal von Albert Friedrich Lempp, Geheimer Rath (Nr. 223). Zustand 1984

Bild 6
Schäden am Grabmal von Albert Friedrich Lempp, Geheimer Rath (Nr. 223). Zustand 2012

tische Einteilung erfolgte nicht. Materialbestand und -qualität blieben bei der Erfassung unberücksichtigt, da sie in der bestehenden Kartei vermerkt sind. Lediglich Stein- und Metallobjekte wurden differenziert, da Erhaltungsmaßnahmen von verschiedenen Fachrestauratoren auszuführen sind. Bei der tabellarischen Erfassung wurden die Grabmale in vier Wertigkeitsgruppen und vier Erhaltungsstufen eingeordnet, deren Definitionen in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst sind. Die Differenzierung des Schadensumfangs und die Bewertung der Dringlichkeit von Maßnahmen erfolgte

ebenso anhand festgelegter Definitionen (Tabellen 3 und 4). Die Erhaltungszustände der Grabmale waren sehr unterschiedlich. Zahlreiche Grabmale zeigten sich als gut erhalten und wiesen nur geringe partielle Verluste auf, andere dagegen stark geschädigt, wenige in ihrem Aussagewert weitgehend verloren. Die Mehrzahl wurde als partiell geschädigt mit vollständig oder weitgehend erhaltener Information eingestuft. Viele der Grabsteine wiesen akute Schadensprozesse auf, die dringend einer konservierenden Behandlung bedurften (Bilder 5 bis 12).



Bild 7 Grabmal von Friedrich Karl Kapff, Handlungsvorsteher (Nr. 8), Zustand 1984



Bild 8 Grabmal von Friedrich Karl Kapff, Handlungsvorsteher (Nr. 8), Zustand 2012 mit großflächiger Schalenbildung als Folge der Hydrophobierung



Bild 9 Grabmal von Friedrich Karl Kapff, Handlungsvorsteher (Nr. 8). Zustand 2018



Bild 10 Grabmal von Wilhelm Hauff (Nr. 508), Zustand 1983



Bild 11 Grabmal von Wilhelm Hauff (Nr. 508) Aufnahme vor der Restaurierung 2012



Bild 12 Grabmal von Wilhelm Hauff (Nr. 508) Aufnahme nach der Restaurierung 2018

4 Konzeption und Planung der Konservierung

Nach verbindlicher Zusage einer großzügigen finanziellen Förderung dieses besonderen Projektes durch die Bundesregierung, das Land Baden-Württemberg, die Denkmalstiftung Baden-Württemberg und den Schwäbischen Heimatbund mit privaten Spenden fasste der Gemeinderat der Landeshauptstadt Stuttgart im Frühjahr 2014 den entsprechenden Baubeschluss und leistete ebenfalls seinen finanziellen Beitrag zum Erhalt des historischen Grabmalbestands im Hoppenlau-Friedhof.

Auf Grundlage der Schadensanalyse von 2012 erarbeiteten die Verantwortlichen bei Stadt und Land gemeinsam die wichtige Konzeption, die organisatorisch, finanziell und praktisch ein plan- und sinnvolles Vorgehen in den kommenden Jahren gewährleisten sollte. Die Maßnahme wurde projektiert auf den Zeitraum 2014 bis 2019. Entsprechend der baugeschichtlichen Entwicklung unterteilt das Konzept den Friedhof in zwei Bauabschnitte BA 1 und BA 2 (Bild 13) mit je vier Baufeldern im ersten Bauabschnitt und fünf Baufeldern im zweiten Bauabschnitt mit dem jüdischen Friedhofsteil. Die seit 2010 geführten regelmäßigen Abstimmungsgespräche der Fachleute wurden zu monatlichen Jour-Fixe-Terminen vor Ort. Sie boten die Gelegenheit, alle anstehenden Arbeitsschritte, auftretende Fragen und Probleme zu besprechen sowie die Ergebnisse begleitender Untersuchungen zu erörtern und über das weitere Vorgehen zu entscheiden.

Das Friedhofsgelände ist seit Jahrzehnten eine städtische Grünanlage. Das jeweils zu bearbeitende Baufeld wurde deshalb aus Sicherheitsgründen mit entsprechenden Bauzäunen abgeriegelt. Blickdichte Folien mit Schaulöchern für interessierte Besucher und entsprechende Bauinformationstafeln wurden angebracht (Bild 14).

Ausschreibungsverfahren

Eine beschränkte Ausschreibung zum Baufeld 1 im ersten Bauabschnitt erfolgte im Jahr 2014. Der Auftrag zur Konservierung der ersten rund 200 Grabmale wurde im gleichen Jahr vergeben. Da zuerst eine grundlegende naturwissenschaftliche Begut-

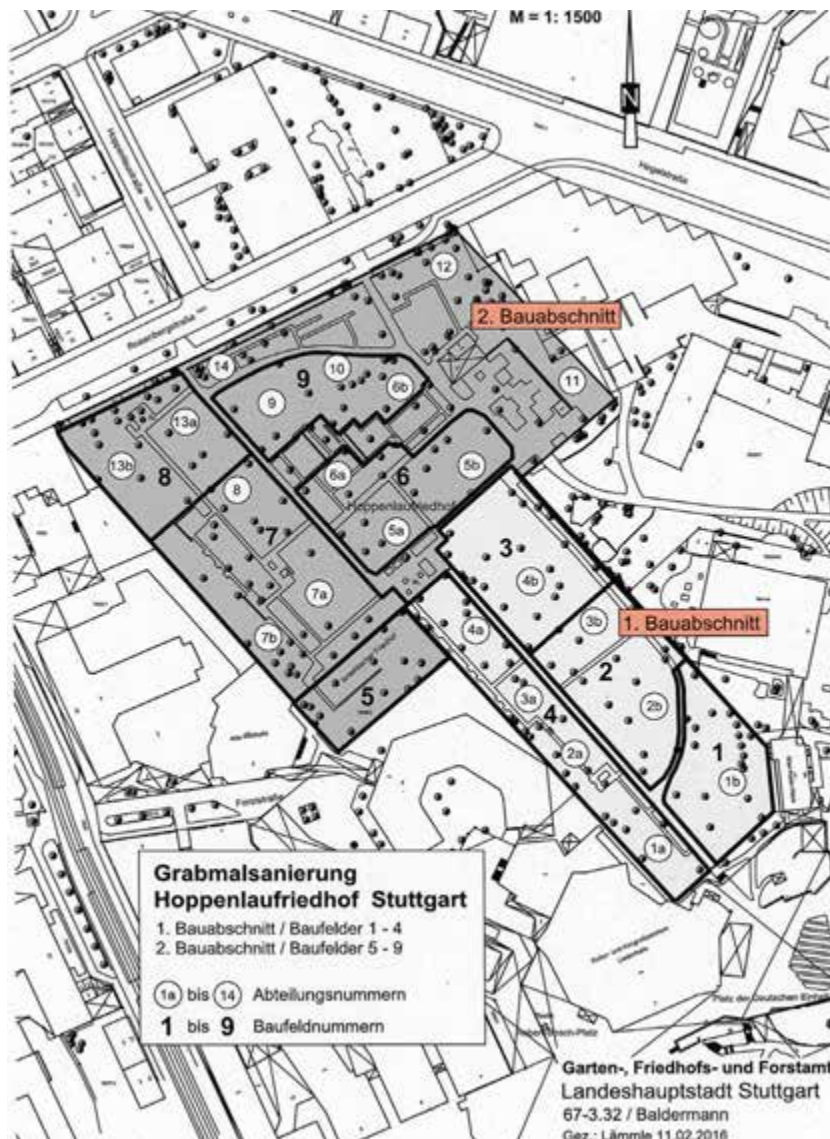


Bild 13 Baufelder, Kartengrundlage Garten-, Friedhofs- und Forstamt Stadt Stuttgart, Stand 2016



Bild 14 Sichtschutz mit Informationstafeln während der Restaurierungsmaßnahmen 2018



achtung erfolgen musste (Bild 15), konnte das beauftragte Restaurierungsunternehmen erst im Herbst 2014 mit den Konservierungsarbeiten an den Sandsteinen beginnen und diese im Herbst 2015 abschließen.

In den folgenden Jahren wurden nach bewährtem Konzept die Baufelder 2 (2016), 3 (2017) und 4 (2018) in Losen beschränkt ausgeschrieben und die Arbeiten laut der Denkmalschutzrechtlichen Genehmigung an qualifizierte Restauratorinnen und Restauratoren mit entsprechenden Referenzen vergeben. Für die Erarbeitung der umfangreichen Maßnahmen sind verstärkt Arbeitsgemeinschaften gebildet worden, da aufgrund der Anzahl an Grabsteinen (circa 90 Stück pro Los) die Fertigstellung in einem jahreszeitlich bedingt kurzen Ausführungszeitraum gefährdet gewesen wäre (Bild 16).

Seit Ende 2019 sind die Arbeiten im ersten Bauabschnitt (BA 1), Baufelder 1 bis 4 erfolgreich abgeschlossen und somit rund 860 historische Grabmale vor dem weiteren Zerfall bewahrt (Bild 17). Die Planungen der kommenden Arbeiten im zweiten Bauabschnitt (BA 2) haben im Jahr 2020 mit dem jüdischen Friedhofsteil begonnen.



5 Konservierung 2014–2018

5.1 Vorgaben und Zielsetzungen

Die grundsätzlichen Zielsetzungen der Konservierungsmaßnahmen waren:

- die Erhaltung der Steinsubstanz, wobei rein konservierende und keine restauratorischen Maßnahmen im Sinne von Wiederherstellungen oder Ergänzungen angewendet werden sollten



Bild 15

Bohrwiderstandsmessung im Jahr 2014, durchgeführt von der HFT Stuttgart

Bild 16

Arbeitsgerüste mit Wetterschutz der Arge Dieruff Alber 2018

Bild 17

restaurierte Grabmale, Zustand 2017

- der überkommene Zustand der ehemaligen Friedhofsanlage sollte beibehalten werden, indem die Grabsteine heute auf einer Wiese ohne Grabeinfassungen stehen.

Daraus resultierte unter anderem, dass keine Freilegung und Drainagierung der Sockel erfolgte, nachdem verschiedene Ausführungen erprobt und verworfen wurden, da sie den Gesamteindruck stark veränderten (Bild 18).

5.2 Schäden

Bereits bei der Schadenerfassung 2012 zeigte sich, dass rund 30 Jahre nach den Erhaltungsmaßnahmen der 1980er Jahre die Mehrzahl der Grabsteine Schäden aufwiesen, die dringend behandelt werden mussten, um Substanzverluste zu vermeiden. Die Dringlichkeit konservierender Maßnahmen bestätigte sich 2014 zu Beginn der Konservierungskampagne. Nur zwei Jahre nach der Erfassung wiesen einige Grabsteine eine deutliche Zunahme des Schadensumfangs auf (Bilder 2 bis 12). Es traten umfangreiche gravierende Verluste ein, eine seither weiterhin stetig fortschreitende Entwicklung an den noch nicht konservierten Grabsteinen (Bilder 19 bis 21).

Anzutreffende Schäden waren Verschmutzungen, überwiegend biogener Bewuchs, Rissbildungen, Zermürbungen – häufig einhergehend mit Salzbelastungen und Schalenbildungen. Dabei ist zwischen den nur wenige Millimeter dicken Steinschalen, die häufig Deformierungen aufwiesen und im Zusammenhang mit der Hydrophobierung zu sehen sind, und mehrere Zentimeter dicken Ablösungen, die sich wesentlich an der Steinschichtung orientieren, zu unterscheiden (Bild 22). Da in den 1980er Jahren keine Maßnahmen zur Salzreduzierung ergriffen wurden, ist davon auszugehen, dass sich die bestehende Salzbelastung seit Aufstellung der Grabsteine angereichert hat.

5.3 Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Voruntersuchungen

Naturwissenschaftliche Untersuchungen zu Beginn der Maßnahmen im Herbst 2014 an einer repräsentativen Auswahl von Grabsteinen [10, 11, 12, 13,



Bild 18
Mustereinfassungen; links ohne Einfassung, mittig Einfassung mit Steinsplittler, rechts Einfassung mit Plastersteine

14] sollten zur Beantwortung der Fragen nach der Wirksamkeit der Althydrophobierung, nach Art und Ausmaß der Salzbelastungen sowie den Chancen ihrer Reduzierung, der Tiefe der Zermürbungen und Kohäsionsverluste und der Möglichkeiten der Steinfestigung beitragen. Für die Untersuchungen wurden Grabsteine unterschiedlicher Qualität, die die auf dem Friedhof vorherrschenden Gesteinsvarietäten repräsentierten, ausgewählt. Ein als Erloschen eingestufter Grabstein ist für die Versuche ausgewählt und in die temporäre Werkstatt vor Ort gebracht worden, so dass die Wintermonate für die Beprobungen genutzt werden konnten. Die



Bild 19
Grabstein von Jacobine Heinlein, Kommerziensratswitwe, (Nr. 146) Zustand 1984

Bild 20

Grabstein von Jacobine Heinlein, Kommerziensratswitwe, (Nr. 146) Zustand 2012



Bild 21

Grabstein von Jacobine Heinlein, Kommerziensratswitwe, (Nr. 146) Zustand 2014



vom Labor der Hochschule für Technik in Stuttgart durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

In der Praxis war die Benetzbarkeit der Oberfläche in zu behandelnden Schadensbereichen – reduzierte, zerklüftete Steinoberflächen – gegeben. Die Tatsache, dass ausgeprägte Algenbesiedlung vorlag, sagte aus, dass die Steinoberfläche ausreichend Feuchtigkeit aufnehmen konnte und wies darauf hin, dass zurzeit keine hydrophobierende Wirkung vorhanden war. Dagegen zeigte sich an dem für die weitergehenden Beprobungen ausgewählten Stein eine deutliche Feuchtigkeitsgrenze, die die anhal-

tende Wirksamkeit der Hydrophobierung verdeutlichte (Bild 23).

Weiterführende Untersuchungen an Musterflächen erfolgten zur Reduzierung der Salzbelastung, zur Steinfestigung mit unterschiedlichen Kieselsäureester-Typen und Applikationsmethoden. Die Ergebnisse der Analysen waren positiv: Eine Salzreduzierung war möglich, z. T. wurden durch Messungen der Leitfähigkeit im Eluat hohe Konzentrationen im Kompressenmaterial mittels Ionenchromatographie nachgewiesen. Eine Festigkeitszunahme wurde erreicht, wobei die durch das übliche Fluten behandelte Probefläche die besten Ergebnisse aufwies.

Bild 22 a+b

Ablösung sehr dünner, deformierter Steinschalen am Grabmal von Albert Friedrich Lempp, Geheimer Rath (Nr. 223).



Auf der Grundlage der Ergebnisse der Voruntersuchungen konnten konservierende Maßnahmen geplant werden. Sie umfassten die Steinfestigung mit zwei unterschiedlichen Kieselsäureester-Typen, Rissverfüllungen und konservierende Kittungen mit Massen aus Quarz- und Steinmehlen gebunden mit Kieselöl. Die Salzreduzierung mit Kompressen erwies sich in der Umsetzung als unzureichend, wie die begleitenden Untersuchungen zur Erfolgskontrolle ergaben [10, 11, 12, 16, 17]. Weitergehende Versuche mit einer veränderten Benetzungsdauer, gezieltem Vornetzen etc. erbrachten keine nennenswerte Verbesserung. Als Ursachen wurden durch die Hydrophobierung der 1980er Jahre gestörter Kapillarttransport und für die hohen Extraktionsmengen während der ersten Versuche eine Aktivierung im Steinkern konzentrierter Salze infolge tiefgehender Durchfeuchtung nach langer Befeuchtungsphase vermutet (mündl. Mitteilung Frau Prof. Grassegger).

Als Alternative zur Behandlung salzbelasteter Steine bzw. Steinbereiche bot sich in Einzelfällen auf Grund des Schadensbilds die Antragung einer Opferschicht, die entsprechend den Kittmassen aus kieselölgebundenen Steinmehlen bestand, in den salzbelasteten Zonen an (Bild 24).

Tabelle 5 Naturwissenschaftliche Voruntersuchungen [10, 11, 12]

Fragestellung	Untersuchungsmethode	Ergebnisse
Wasseraufnahme (HFT)	Bestimmung Wasserdampf-diffusionswiderstandszahl WDD Probematerial: Steinschalen	Diffusionswiderstandszahl μ [-] zwischen 18 und 30 (Vergleichswert intakter Stein: 20 bis max. 80)
Salzbelastung (HFT)	Quantitative und qualitative Bestimmung der Salze im Tiefenprofil Probenmaterial: Kratzproben, Bohrkern	vorwiegend hohe Belastung mit Chloriden und Sulfaten im oberflächennahen Bereich 0–1 cm, z. T. bis zu 2 cm
Festigkeit (HFT)	Bohrwiderstandsmessungen	Überprüfung des Festigungserfolgs
Nachweis der Hydrophobierung (Labor ATU)	Massenspektrometrie, GC-MS Probenmaterial: Steinschuppen	Styrol, Methylstyrol



Bild 23

Erloschener Grabstein von Carl Friedrich Hezer (Nr. 138) nach Entnahme einer Steinprobe



Bild 24

Grabstein von Christoph Ludwig Adelman, Architekt (Nr. 608), links: Vorzustand, rechts: nach Antragung der Opferschicht in der salzbelasteten Zone über dem Sockel



Bild 25 Reinigungs- und Entsalzungsmaßnahmen mit dem Gregomatic® Sprüh-Sauggerät

Bild 26 Reinigungs- und Entsalzungsmaßnahmen mit dem Gregomatic® Sprüh-Sauggerät auf einer Sandstein Oberfläche

6 Naturwissenschaftliche Begleitung

Die Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart MPA begleitete die Salzreduzierungsmaßnahmen mittels Gregomatic-Vakuum-Wasch-Verfahren ab dem Jahr 2018. Die Erfolge wurden durch die Analyse der zurückgewonnenen Waschwasserproben geprüft. Die ersten Salzreduzierungsversuche erfolgten mit Leitungswasser. Die Leitfähigkeit des Leitungswassers am Hoppenlauer-Friedhof ist erhöht ($520\text{--}540\text{ }\mu\text{S/cm}$), ebenso die Anionen- und Kationenkonzentration. Bei dieser relativ hohen Konzentration konnte kein gravierender Austrag an bauschädlichen Salzen stattfinden. Lediglich vereinzelt wurde ein regelmäßiger Rückgang von Sulfat- und eine geringfügige Reduzierung der Chlorid- bzw. Kalziumkonzentrationen zwischen den 1. und 2. Waschzyklen festgestellt [18].

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden und werden auch in der Zukunft die weiteren Salzreduzierungsmaßnahmen mit deionisiertem Wasser durchgeführt. Weiterhin ist eine engmaschige vor-Ort-Kontrolle geplant. Generell wird die Leitfähigkeit nach jedem Waschgang ermittelt, begleitet durch die Überprüfung der bauschädlichen Sulfat-, Nitrat- und Chloridkonzentrationen durch verschiedene Schnelltests (Messstäbchen, kolorimetrische Test-Kits und Photometer). Damit wird gewährleistet, die optimale Anzahl der Waschgänge festlegen zu können – die Salzreduzierungsmaßnahmen werden so lange fortgeführt wie ein Austrag nachweisbar ist. Die unterschiedlich belasteten Bereiche bezüglich Art und Konzentration der Salze können differenziert behandelt werden [19, 20].

Bereits während der Voruntersuchungen werden an der Oberfläche der Grabsteine mobile und zerstörungsfreie Raman- und Nahinfrarot-spektroskopische Untersuchungen durchgeführt, um die Belastung zu erfassen. Messungen an der gleichen Stelle vor und nach den Salzreduzierungsmaßnahmen (Bild 27) geben weitere Auskunft über den Erfolg [21].

Schadens- und Maßnahmendokumentation

Bei der Dokumentation wurde eine einheitliche Ausführung für das Gesamtprojekt angestrebt. Sie besteht aus einem Datenblatt für jeden Grabstein, das alle relevanten Angaben zum Objekt, zu den angetroffenen Schäden und ausgeführten Maßnahmen unter Nennung von verwendeten Materialien, Rezepturen und Verbrauchsmengen sowie der Anwendungsbereiche enthält (Bild 28). Auf aktuellen

Vorzustandsfotos wurden sämtliche Schäden und Maßnahmen grafisch dargestellt.

Ein einleitender Text enthält Angaben zum Umfang des Arbeitsbereichs mit den Grabmalnummern und zusammenfassende Beschreibungen von Schäden und Maßnahmen sowie die Namen der Ausführenden. Bestandteil der Berichte sind Vorschläge für ein späteres Monitoring an ausgewählten Grabsteinen unter Nennung der Auswahlkriterien, die

Tabelle 6 Vorteile des Vakuum-Wasch-Verfahrens im Vergleich zur Kompressenbehandlung

Kompressen	Vakuum-Wasch-Verfahren
Anwendung über den belasteten Bereich hinaus erforderlich	Anwendung auf die nachweislich belasteten Zonen mit Effloreszenzen beschränkt
lange Behandlungsdauer, Verbleib der Komresse über mindestens zwei Wochen, Befeuchtung- und Mobilisierungsphase, anschließend Abtrocknungsphase Gefahr der Schimmelbildung teilweise mangelnde Anhaftung	Salze, die an der Steinoberfläche angereichert sind, werden unmittelbar gelöst und abgesaugt
hoher Arbeits- und Zeitaufwand	kurze Anwendungszeit
unkontrollierbare Befeuchtung tiefer Steinbereiche und Gefahr der Migration der Salze in tiefere Schichten	Befeuchtung beschränkt sich auf den oberflächennahen Bereich und wird sofort wieder abgesaugt, keine tiefgehende Befeuchtung des Steins
hoher Materialaufwand Entsorgung des verbrauchten Kompressenmaterials	Materialaufwand ca. 10–20 Ltr. Wasser pro qm keine Abfälle außer dem salzbelasteten Wasser, das in der hohen Verdünnung nicht gesondert entsorgt werden musste
Nachreinigung zur Abnahme restlichen Kompressenmaterials	kein Nachbehandlung erforderlich
Bei ungünstigen Wetterbedingungen sind Schutzmaßnahmen erforderlich	Witterungsunabhängig, ressourcenschonend

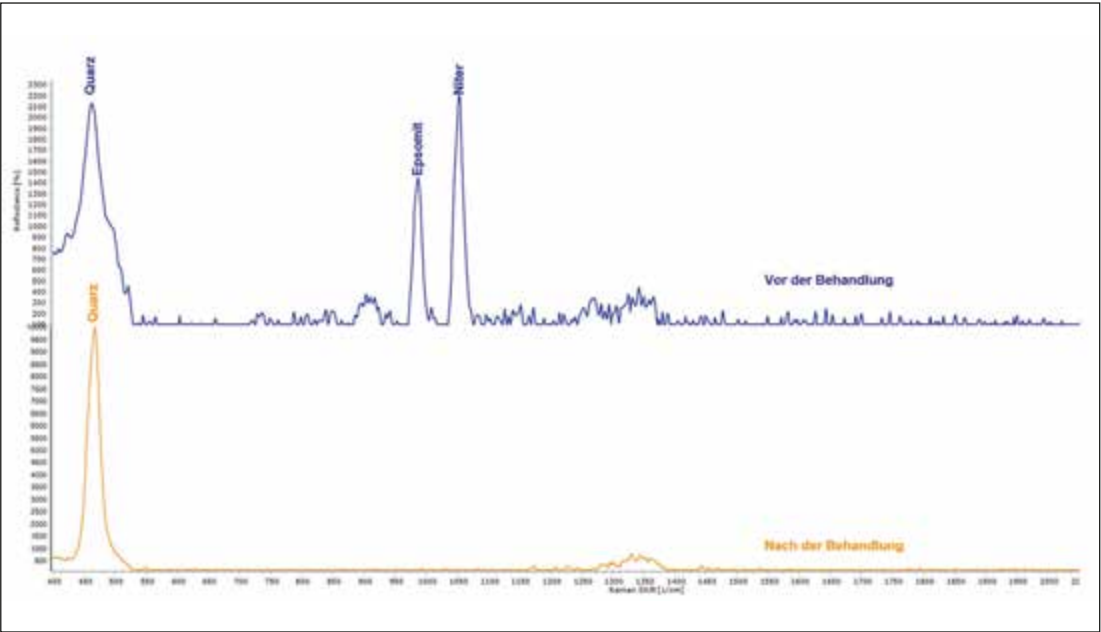



Bild 27
Raman-Spektren vor und nach den Salzreduzierungsmaßnahmen am Grabstein Nr. 184. Die Messungen wurden mit dem Raman-Spektroskop MIRA1 von der Firma Metrohm unter Verwendung einer Laserquelle mit einer Wellenlänge von 785 nm und einer Laserleistung von 100 mW durchgeführt. Die Messzeit betrug jeweils weniger als 3 Sekunden.

Ort: Stuttgart Objekt: Hoppenaufriedhof BA1 LAD-Objektnr.: 594		Dipl.-Rest. Silke Böttcher Dipl.-Rest. Silke Günther Bearbeitungszeitraum: 2017					
Typus	Sockel, Postament, Urne		Name Charlotte v. Roeder, geb. Frein v. Hopfer, 1761-1825				
Werkstücke	3		Maße (cm)	Höhe	Breite	Tiefe	Steinnr.:
Gesteinsvarietät	Sandstein grünl.-gelbl.		Sockelplatte	mind. 20,5	101	103	0745
Besonderheiten			Postament				
			Mitte	85,5	60	56,5	
			Oberteil	70,5	36	36	
Zustand/Schäden	Siehe Schadenskartierung, folgende Seite		 <p style="text-align: center;">Übersichtsaufnahme</p>				
Risse	stark × mittel schwach keine						
Ausbrüche	stark × mittel schwach keine						
Schalenbildung	stark × mittel schwach keine						
Rückwitterung	stark × mittel schwach keine						
Schadssalze	stark mittel schwach × keine						
biogener Bewuchs	stark × mittel schwach keine						
Mürbzone	stark mittel schwach × keine						
Maßnahmen s. Maßnahmenkartierung	Materialien		Bemerkungen				
× Reinigung	Hochdruckreiniger auf Dampfstufe		Geräteparameter: ca. 140 °C, max. 30 bar (Einstellung Pumpe)				
Salzreduzierung							
× Rissverfüllung	Bm.: Ludox HSA, Füllst.: Remmers A/B (KSE-ModulSystem)		Füllst.: 2 GT A : 1 GT B (Zugabe Eisenoxidpigmente max. 5 Gew%) (ca. 60 ml) Steinsilikatdeber (ca. 66 ml)				
× Schalenverfüllung							
× Kitten	Bm.: Ludox HSA, Zuschlag: Natursteinsande, Sieblinie 0-0,35 mm, Quarzmehl-sand W12/F36, Feinabstimmung mit schwarzem Marmor/Basalt		feine Haarrisse entlang der Steinschichtung am Inschrifttragenden Sockel (auf Spalt gearbeitet) wurden geschlämmt				
× Schlämmen							
× Festigung	KSE 300 (760 ml)		alle gekitteten und geschlämmten Bereiche, 25-32°C, 55-76 % rF (mind. 5 Tage Witterungsschutz)				
Vernadelung							
Klebung							
Kiesbett							
Metalbeschichtung							
× Sonstiges	Mörtelergänzung an der Urne mit Remmers SK						

Blatt-Nr.:

Bild 28

Datenblatt, ARGE Böttcher
Günther 2017



Bild 29
Schadenkartierung, ARGE
Böttcher Günther 2017



Bild 30
Maßnahmenkartierung, ARGE
Böttcher Günther 2017

entweder exemplarisch für die angetroffenen Schäden und durchgeführten Maßnahmen stehen oder besondere Phänomene bzw. Behandlungen dokumentieren und mit entsprechenden Detailfotos dargestellt sind.

Ergänzend sind der Dokumentation Digitalaufnahmen vom Vorzustand und deckungsgleiche Ansichten nach Abschluss der Konservierung beigelegt sowie weitere Aufnahmen von Besonderheiten oder Arbeitsaufnahmen zur Erläuterung der Vorgehensweise. Sämtliche Dokumentationsunterlagen liegen in zwei Exemplaren vor (in gedruckter Form auf archivbeständigem Papier und digital auf einem Datenträger), wovon eines im Garten-, Friedhofs- und Forstamt und ein weiteres im Landesamt für Denkmalpflege archiviert ist (Bilder 29 und 30).

7 Ausblick

Zukünftig ist eine regelmäßige Wartung vorgesehen. Fünf Jahre nach Abschluss des 1. Baufeldes wird die erste Wartung stattfinden. Eine Evaluierung der durchgeführten Maßnahmen hinsichtlich Material und Verarbeitung erfolgt während der ersten Wartung: Was hat sich an welcher Steinqualität und an welchen Schadensbildern bewährt? Werden Schäden festgestellt, werden sie im Rahmen der Wartung behandelt.

Ab dem Jahr 2020 sind die Konservierungsmaßnahmen im Bauabschnitt 2 fortzuführen. Geplant ist, nach der restauratorischen Zustandserfassung die Salzbelastung mit zerstörungsfreien mobilen Messgeräten wie Raman- und Nah-Infrarot-Spektroskopie zu ermitteln, um die Salzreduzierungsmaßnahmen auf die tatsächliche lokale Belastung abzustimmen. Salzreduzierungsmaßnahmen mittels Wasch-Saug-Verfahren sind weiterhin vorgesehen. Diese werden mit vor-Ort-Tests begleitet, damit die optimale Anzahl der Waschzyklen ermittelt werden kann.

Geplant ist weiterhin die Digitalisierung der Inhalte der Dokumentation aus den 1980er Jahren. Eine systematische wissenschaftliche Aufarbeitung der Schäden durch die Hydrophobierung der 1980er Jahre ist vorgesehen.

Danksagung

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung von der Bundesregierung Deutschland, Landesdenkmalpflege Baden-Württemberg, Denkmalstiftung Baden-Württemberg, Landeshauptstadt Stuttgart und Schwäbischer Heimatbund e.V. Stuttgart. Besonderer Dank gebührt allen Projektbeteiligten und allen bisher tätigen Restauratoren.

Projektbeteiligte

Garten-, Friedhofs- und Forstamt Landeshauptstadt Stuttgart (Bauherrin); Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart; Referat Bau- und Kunstdenkmalpflege; Amt für Stadtplanung und Wohnen Landeshauptstadt Stuttgart, Untere Denkmalschutzbehörde und Amt für Umweltschutz Landeshauptstadt Stuttgart, Naturschutzbehörde, Hochschule für Technik HfT Stuttgart, Bauchemie, Baustoffkunde-Bauingenieurwesen, ATU GmbH Analytik für Technik und Umwelt Herrenberg; BioPhil Mikrobiologie & Restaurierung Dr. Stefanie Scheerer Stuttgart; Mikroanalytisches Labor Dr. Jägers und Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart MPA, Referat Denkmalschutz, Juliane Weigele; AeDis AG, Restaurierung und Denkmalpflege Ebersbach; ARGE Bärbel Dieruff / Karl-Heinz Alber Stuttgart; ARGE Silke Böttcher Sinsheim-Rohrbach / Silke Günther Karlsruhe, Daniel Friedrich Restaurator Bildhauer Bietigheim-Bissingen, Labrini Labropoulou-Blumer, Schwäbisch Gmünd

Bildnachweis

Bild 1: aus [1]

Bilder 4, 6, 11–17: Maurus Baldermann

Bilder 8, 9, 20–22, 24: Juliane Weigele

Bild 18: ARGE Dieruff-Alber

Bild 23: AeDis

Bilder 25, 26: Karl-Heinz Alber

Bilder 27: Judit Zöldföldi

Bilder 28–30: ARGE Böttcher-Günther

Bilder 5, 7, 10, 19: unbekannt, Dokumentation aus den 1980er Jahren.

Quellenverzeichnis

- [1] Bertold Pfeiffer: Der Hoppenlau-Friedhof in Stuttgart. zum Heimatschutz. Stuttgart, Kohlhammer, 1912
- [2] Udo Dickenberger, Waltraut Pfäfflin, Friedrich Pfäfflin: Der Stuttgarter Hoppenlau-Friedhof als literarisches Denkmal, Marbacher Magazin 59, Marbach am Neckar, 1991
- [3] Waltraut Pfäfflin, Friedrich Pfäfflin: Die Gräber der Dichter auf dem Stuttgarter Hoppenlau Friedhof, Edition Vincent Klink, 2015
- [4] Friedrich Pfäfflin: Hoppenlau-Friedhof Stuttgart – Wo sie ruhen: Berühmte Grabstätten auf historischen Friedhöfen in Deutschland, www.wo-sie-ruhen.de
- [5] Regierungspräsidium Stuttgart, Eintragungsverfügung. Unveröffentlichtes Dokument; 31.07.1986
- [6] Norbert Bongartz: Umgang mit historischen Friedhöfen, S.45–56, Kassel 1984
- [7] Karl Klöpping: Historische Friedhöfe Alt-Stuttgarts, Beitrag zur Stadtgeschichte, Wegweiser zu den Grabstätten des Hoppenlau-Friedhofs, Stuttgart, Klett-Cotta Verlag, 1991
- [8] Gartenbauamt Stuttgart, Abschlussbericht 1991, Heinrich Kirchner Grabmalberater
- [9] Joachim Hahn: Friedhöfe in Stuttgart. 2. Band: Hoppenlau-Friedhof, Israelitischer Teil. Stuttgart, Klett-Cotta Verlag, 1988
- [10] Gabriele Grassegger-Schön, Ute Dettmann: Hochschule für Technik Stuttgart, Bauchemielabor, Untersuchungsbericht Hoppenlaufriedhof Stuttgart »Bauchemische Untersuchungen an verschiedenen Grabmalen des historischen Friedhofs«, unveröffentlichter Bericht vom 15.12.2014
- [11] Gabriele Grassegger-Schön, Ute Dettmann: Hochschule für Technik Stuttgart, Bauchemielabor, Untersuchungsbericht Hoppenlaufriedhof Stuttgart »Bauchemische Untersuchungen an verschiedenen Grabmalen des historischen Friedhofs«, als Vorarbeiten und Begleitung einer Steinkonservierung, unveröffentlichter Bericht vom 29.07.2015
- [12] ATU GmbH, Analytik für Technik und Umwelt, Nachweis der Aldehydphobierungen auf Steinproben vom Hoppenlaufriedhof in Stuttgart mittels GC-MS, unveröffentlichter Bericht, 25.10.2016
- [13] Stefanie Scheerer: Mikrobiologische Untersuchungen von Grabsteinen des Hoppenlau-Friedhofs in Stuttgart. Unveröffentlichter Bericht, 20.11.2014
- [14] Erhard Jägers, Elisabeth Jägers: Stuttgart-Mitte, Hoppenlau-Friedhof. Konservierung historischer Grabmale. Naturwissenschaftliche Untersuchung an einer Materialprobe. Unveröffentlichter Bericht, 18.08.2015
- [15] Jürgen Frick, Judit Zöldföldi: Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator (Schwäbisch Gmünd) in Verbindung mit der Ermittlung eines neuen Steinkonservierungsmittels zur Anwendung in nassem Umfeld. Stuttgart, IRB Verlag. https://www.dbu.de/projekt_28983/01_db_2848.html
- [16] Gabriele Grassegger-Schön, Ute Dettmann: Untersuchungsbericht Hoppenlaufriedhof Stuttgart, BF3, Bauchemische Untersuchungen an verschiedenen Grabmalen im Baufeld 3. Unveröffentlichter Bericht, HFT Stuttgart, 19.06.2016
- [17] Gabriele Grassegger-Schön, Ute Dettmann: Untersuchungsbericht Hoppenlaufriedhof Stuttgart, BF3, Bauchemische Untersuchungen an verschiedenen Grabmalen im Baufeld 3 auf dem Hoppenlaufriedhof. Unveröffentlichter Bericht, HFT Stuttgart, 06.10.2017
- [18] Judit Zöldföldi, Friedrich Grüner: Hoppenlau-Friedhof in Stuttgart: Untersuchung von Wasserproben der Gregomatic-Reinigung- und von Materialproben. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht der MPA Stuttgart, 2019
- [19] Lena Holzkamp: Salzminderung an Sandsteinen mit Hilfe des Wasch-Saug-Verfahrens. Semesterarbeit an der ABK Stuttgart und MPA Stuttgart im Wintersemester 2018/2019. Unveröffentlichter Bericht
- [20] Judit Zöldföldi, Lena Holzkamp, Roland Lenz, Annalisa Krautheimer, Friedrich Grüner: On-site tests to assess wet vacuum cleaning technology for salt reduction on sandstones. Beitrag Stone 2020 in Göttingen 7.9–12.9.2020; eingereicht
- [21] Judit Zöldföldi, Tillmann Viehhaus, Dana Ulmann: Möglichkeiten und Grenzen mobiler schwingungsspektroskopischer Methoden in der Schadensanalytik am Bauwerk, Tagungsband zur IFS-Tagung am 6. Dezember 2018 im Landesmuseum Mainz, IFS-Bericht Nr. 55 – 2018, S. 43–52, 2018

Gipshaltiges Mauerwerk

Bewertung des langfristigen Sanierungserfolges auf der Basis von Nachuntersuchungen



In einigen Bereichen Deutschlands wurde bedingt durch die regionale Rohstofflage traditionell viel mit Gips gebaut. Insbesondere im Umland des Harzes, im Thüringer Becken, in Franken und in Norddeutschland ist Gips teilweise flächendeckend für Bauzwecke eingesetzt worden. Ab dem späten 19. Jahrhundert ging mit der breiten Verwendung von Portlandzement viel Wissen über den Baustoff Gips verloren. Moderne Sanierungen verlaufen auf Grund dessen nicht immer positiv. Ein Projekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) zu diesem Themenbereich möchte Sanierungen katalogisieren, positiv verlaufene Maßnahmen modellhaft hervorheben und anthropogene Einflüsse beschreiben.

Toralf Burkert
Angela Eckart

1 Gips und Gipsmörtel

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff »Gips« sowohl für den natürlichen Ausgangsstoff als auch für das gebrannte, verarbeitungsfertige Bindemittel und das abgebundene Produkt verwendet. Daraus ergibt sich, dass mineralogisch unterschiedliche Calciumsulfatphasen, welche ein sehr unterschiedliches Reaktionsvermögen aufweisen, mit demselben Begriff bezeichnet werden:

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Rohstoff oder abgebundener Gips, Dihydrat (DH),
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$	Halbhydrat, reaktionsfähiges Bindemittel (HH),
CaSO_4	Anhydrit, sehr reaktives bis gar nicht reaktionsfähiges Bindemittel in Abhängigkeit von der Brenntemperatur (HH entwässert bzw. AIII, AII, AI).

Je nach regionaler Verfügbarkeit wurde Gips bis Ende des 19. Jahrhunderts als Baumaterial für Objekte vom Sakralbau bis zum Stall genutzt. Dabei kam der Gips bzw. Anhydrit sowohl als Steinmaterial als auch als Mörtelgrundlage zur Anwen-

dung. So wurde die historische Bausubstanz von Bad Windsheim noch in den 1980er Jahren mit über 50% aus Gips bestehend angegeben (Stein und Mörtel). Bis heute sind viele historische Bauwerke auf Gipsbasis gut erhalten. Die Basis für dauerhafte Mauer- und Putzmörtel sowie Estrichgipse war Hochbrandgips. Mit diesem Begriff wird in der Regel ein historischer oder ein nach historischem Vorbild bei hohen Temperaturen gebrannter Gips bezeichnet. Die Brennprodukte sind deutliche

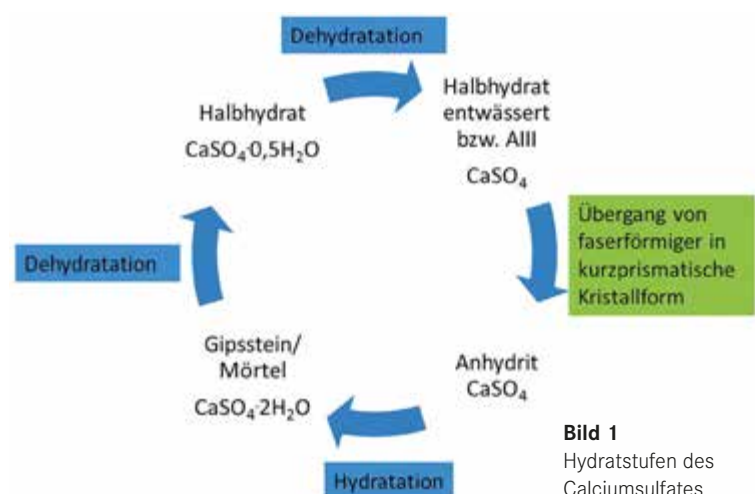


Bild 1
Hydratstufen des
Calciumsulfates

Mehrphasengemische aus Halbhydrat und Anhydrit (Bild 1). Meist enthalten diese Gipse einen gewissen Anteil an freiem Kalk (CaO). Der Hochbrandgips zeichnet sich durch eine geringe Mahlfeinheit und einem damit verbundenen extrem niedrigen Wasseranspruch (ca. $W/B = 0,4$) aus. Der äußerst dauerhafte historische Hochbrandgips für die Mörtelherstellung ist in relativ kleinen Öfen bei hohen Temperaturen gebrannt worden.

Im Mittelalter wurde gipshaltiges Gestein in Steinbrüchen oder bergmännisch abgebaut, sortiert und in Brechmühlen weiter zerkleinert, so dass es dem Brennprozess zugeführt werden konnte. Die Gipsbrennereien betrieben Meiler- oder Grubenöfen, später auch Schachtöfen. Diese wurden von der unteren Ofenmitte aus mit Holz oder Torf befeuert. Ein anderes Verfahren bestand darin, im Stollen ein Feuer anzufachen und anschließend den gebrannten Gips herauszuschlagen.

Für die im Raum Jena typischen Brenngruben (1,2–1,5 m lang und breit sowie 2,4–3,0 m tief) werden Brenntemperaturen von 400–500 °C (bis zur »Rotglut«) über 3–4 Tage angegeben [53]. Meist werden noch deutlich höhere Temperaturen erwähnt. Brände nach historischem Vorbild lehnen sich an diese hohen Brenntemperaturen an. Größtenteils werden Ofentemperaturen von 750 °C bis 900 °C angestrebt.

Nach dem historischen Brand wurde der Gips grob zerkleinert und anschließend in einer Gipsmühle

fein gemahlen (maximale Korngröße ca. 6 mm). Größere Bestandteile sind als stoffidentischer Zuschlag verwendet worden. Infolge der vielen wesentlichen Einflüsse auf den Brennprozess waren die Brennprodukte sehr inhomogen. Der Phasenbestand im Hochbrandgips ist abhängig von:

- dem Brennstoff,
- den Brenntemperaturen,
- der Zusammensetzung des Rohmaterials (Gipsgestein),
- der Größe der Rohstoffbrocken,
- der Lage der Rohstoffbrocken im Ofen,
- dem sich einstellenden Wasserdampfpartialdruck auf der Materialoberfläche,
- der Brenndauer,
- der Abkühlung und
- der Aufbereitung.

Die ältesten heute noch erhaltenen Objekte in Deutschland, welche mit gipshaltigen Materialien errichtet wurden, waren Sakralbauten (zum Beispiel Kloster Ilseburg). Ab dem Mittelalter kam Hochbrandgips, je nach regionaler Verfügbarkeit der Rohstoffe, für vielfältige Bauaufgaben zur Anwendung. Nach der flächendeckenden Verbreitung des Portlandzementes war die Verwendung von Gips stark rückläufig. Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich der Portlandzement flächendeckend für neue Bauaufgaben durch. Damit ging auch das praktische Wissen um die Herstellung und Anwendung von Hochbrandgips zum großen Teil verloren.



Bild 2

Historischer Gipsmörtel am Schloss Gehren, die Gipssteine sind zurückgewittert und der Gipsmörtel steht trotz Dauerdurchfeuchtung (s. Eiszapfen)

Abgebundene historische Gipsmörtel aus Hochbrandgips sind sehr inhomogene Materialgemische. Dies resultiert aus verschiedenen Ursachen:

- Inhomogenitäten im Rohmaterial (Steinbruch),
- Unterschiede beim Brand,
- händischen Mischungen und
- unterschiedlichen Vorgaben des jeweiligen Meisters (Wasserzugabe, Verarbeitung, Zusätze).

Heute noch existierende mit Gipsmörtel errichtete Objekte aus romanischer Zeit zeigen oft eine hohe Beständigkeit (Bild 2). Bei der Analyse dieser Mörtel wird sichtbar, dass keine Gesteinskörnungen (außer Anhydrit) verwendet wurden. Später ist Gipsmörtel oft mit Gesteinskörnungen (Sand) »abgemagert« worden. Die so hergestellten Mörtel sind meist weniger resistent gegenüber Umwelteinflüssen.

2 Verträglichkeitsprobleme

Seit den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts sind Unverträglichkeiten zwischen gipshaltiger Bausubstanz historisch bedeutsamer Bauwerke und modernen hydraulischen Instandsetzungsmaterialien bekannt [48]. Gravierende Probleme treten aber erst mit dem Fortschritt der Injektionstechnik zur statischen Ertüchtigung auf. Bei Anwendung dieser Technik werden in gipshal-

tiges Mauerwerk große Mengen von Wasser und hydraulischem Material mit Reaktionspotential hinsichtlich einer Ettringit- und Thaumasitbildung (Bilder 3 und 4) eingebracht.

In den ostdeutschen Bundesländern fallen die Schäden der Altrestaurierungen besonders auf, da nach jahrelangem Investitionsstau in der DDR in den 1990er Jahren viele historisch wertvolle Gebäude mit dieser Technik saniert wurden und die Schäden, je nach Injektionsmaterial, in einer Zeit von einem Jahr bis zu fünfzehn Jahren nach der Injektion auftraten (besonders in Thüringen und Sachsen-Anhalt). In den westlichen Bundesländern ist die Problematik insbesondere an den Vicelin-kirchen in Norddeutschland bekannt. Der Kirchturm St. Urbani aus dem 12. Jahrhundert in Munster oder das bekannte Schloss Wiehe in Thüringen konnten nur mit sehr großen finanziellen Aufwand nach folgenschweren Schäden auf Grund von Treibmineralbildungen saniert werden. Letztes trauriges Beispiel in Thüringen ist der Abtrag und Neuaufbau eines Teils der Stadtmauer Mühlhausens (Bild 5). Infolge von Treiberscheinungen wurde in den letzten Jahrzehnten in Deutschland viel kulturhistorisch wertvolle Bausubstanz unwiederbringlich zerstört.

Seit Beginn des 21. Jahrhunderts wird auf Grund vieler Fehler bei der Sanierung eines derartigen Mauerwerks auf Unverträglichkeitsreaktionen (Ettringit- und Thaumasitbildung mit Treiberscheinungen) in der Fachöffentlichkeit hingewiesen (Publikationen, Fachvorträge, WTA-Merkblatt [1], [2]).

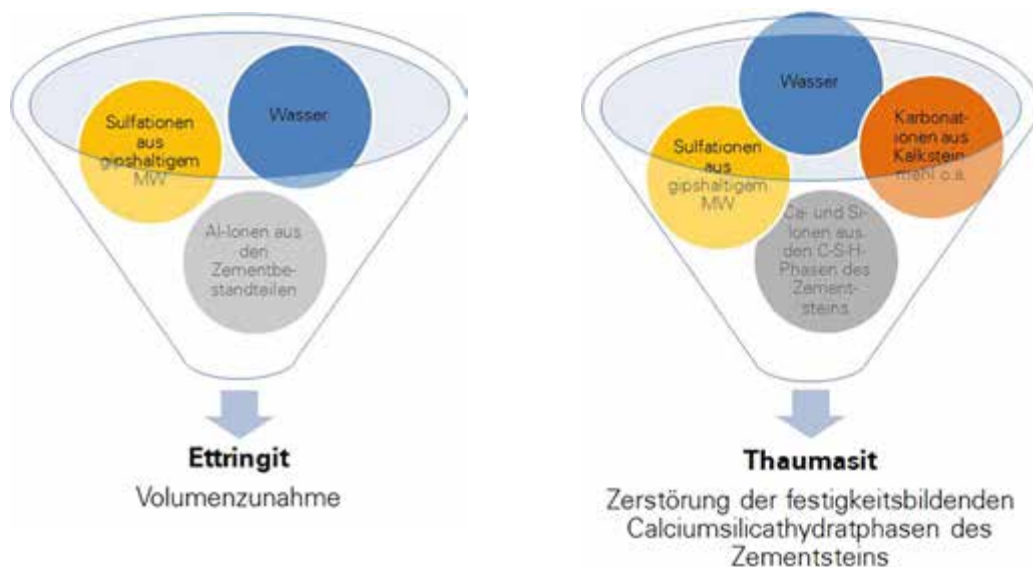


Bild 3
Ettringitbildung – Ausgangsstoffe und Wirkung

Bild 4
Thaumasitbildung – Ausgangsstoffe und Auswirkung



Bild 5
Abrissmaßnahme an der
Stadtmauer Mühlhausen
im Jahr 2018

Auch wurden seit dieser Zeit mehrere Forschungsvorhaben mit der Absicht einer Materialentwicklung für gipshaltiges Mauerwerk gefördert. Mit diesen Materialentwicklungen liegt eine große Palette an möglichen Sanierungsmaterialien vor. Diese Produkte wurden mehr oder weniger erfolgreich zur Sanierung eingesetzt. Zusätzlich gibt es viele Fertigprodukte, die mit dem Slogan »für sulfathaltiges Mauerwerk geeignet« oder »sulfatbeständig« werben. Durch Unkenntnis der Planer oder mangelnde Voruntersuchungen werden immer noch HS-Zemente für Injektionen verwendet. Bis heute treten gravierende Schäden bis hin zur vollständigen Zerstörung des Mauerwerks auf.

Parallel gibt es Sanierungen, die im Rahmen der Möglichkeiten als gelungen bezeichnet werden können. Hier setzt das DBU-Projekt an.

3 Einfluss von anthropogenen Immissionen und von Klimaveränderungen

Infolge des Klimawandels sind stärkere Temperaturspitzen, extreme Niederschläge [40], [43] und erhöhte Jahresdurchschnittstemperaturen (ca. 2–4 K bis ins Jahr 2100) mit den damit verbundenen höheren Luftfeuchten zu erwarten [39]. Die absolute Feuchtigkeit in der Atmosphäre ist in Deutschland von 1951 bis 2006 bereits um 4 % gestiegen [38]. Infolgedessen stellen sich höhere Spannungen und Ausgleichsfeuchten im Mauerwerk ein. Insbesondere bereits geschädigtes Mauerwerk reagiert sensibel auf derartige Veränderungen (feuchteabhängiges Verhalten von Ettringit und Thaumasit)(Bild 6). Innerhalb des Projektes sollen Strategien zur Vermeidung einer weiteren Schädigung des Mauerwerkes erarbeitet werden. Dabei sind die Prozesse infolge der Veränderung der Umgebungsbedingungen mit zu beobachten.

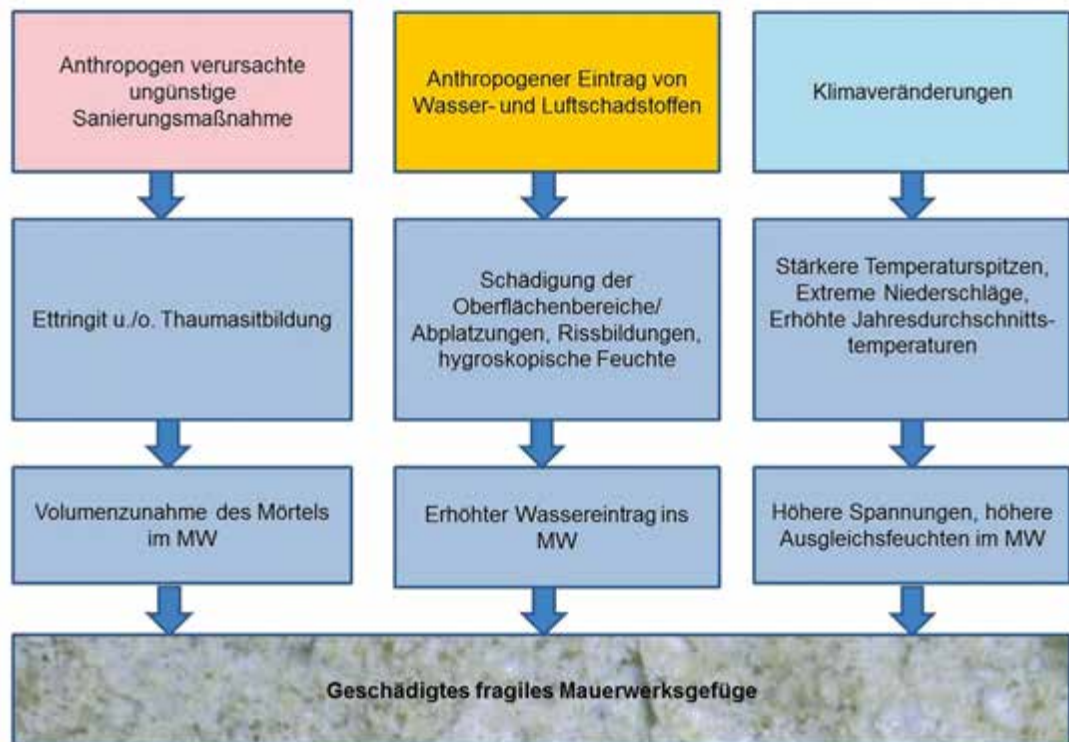


Bild 6
Einwirkungen auf das
Mauerwerksgefüge

Während der Begutachtung der Objekte soll Wert auf die Anwesenheit und Herkunft bauschädlicher Salze gelegt werden (vorwiegend Alkali- und Erdalkalisulfate, -nitrate und -chloride):

Anionen

- *Sulfationen* sind im gipshaltigen Mauerwerk in großen Mengen vorhanden, können aber auch anthropogen durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (saurer Regen) ins Mauerwerk gelangen. Blanco-Varela [44] untersuchte die Bildung von Thaumasit aus hydraulischen Mörtelbestandteilen unter Einwirkung von atmosphärischem SO_2 . Dabei zeigte sich, dass bei verschiedenen Ausgangsmaterialien wie Portlandzement, Weißzement, hydraulischer Kalk, Kalk/Puzzolan das erste bauschädliche Salz immer Gips war. In einem späteren Stadium reagierte dieser Gips dann mit Calciumcarbonat und den C-S-H-Phasen zu Thaumasit. Dies erforderte allerdings lange Reaktionszeiträume.
- *Nitrationen* können durch landwirtschaftliche Nutzung historisch oder aktuell durch Fäkalien über das Grundwasser oder das Oberflächenwasser eingebracht werden. Die Nitratbelastung deutscher Böden steht seit mehreren Jahren im Fokus der Öffentlichkeit, da die Nitratgehalte im Grundwasser den Schwellen-

wert von 50 mg/l in einem beachtlichen Teil der Fälle (ca. 18%) überschritten [41], [42]. Weiterhin ist im städtischen Bereich der NO_2 bzw. NO_x -Ausstoß durch den Verkehr rückläufig aber immer noch hoch. Diese Stickstoffoxide können mit Luftsauerstoff und Wasser zu Salpetersäure reagieren und negativ auf Gebäude einwirken. Insbesondere ist die Herkunft der Nitrationen an den zu untersuchenden Bauwerken zu klären.

- *Chloridionen* werden meist durch Streumaßnahmen im Winter in das angrenzende Mauerwerk eingebracht und stellen somit ebenfalls anthropogene Immissionen dar.

Kationen

- Sulfatisch, carbonatisch und zementgebundenes Mauerwerk enthält immer *Calciumionen*. Diese können mit den genannten Anionen bauschädliche Salze wie Gips und Calciumnitrat bilden. Weiterhin kann Calciumchlorid aus Streusalz in das Mauerwerk eingetragen werden.
- *Magnesiumionen* stammen häufig aus dolomitischen Mörtelausgangsstoffen oder ebenfalls auch anthropogen eingebracht aus Streusalzen.
- *Natrium- und Kaliumionen* entstammen meist portlandzement- und/oder trasshaltigen Bau-

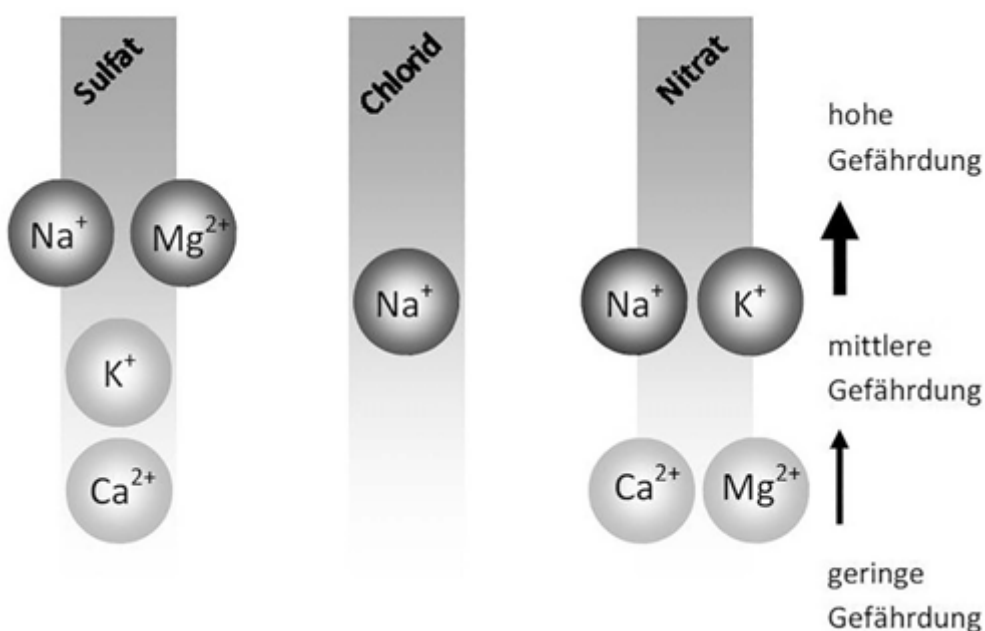


Bild 7

Einschätzung der Gefährdung durch die Salzbelastung in Abhängigkeit vom dominierenden Anion und dem jeweiligen Kation und Bewertung der Gefährdung durch unterschiedliche Konzentrationen von Anionen aus bauschädlichen Salzen aus unterschiedlichen Quellen, aus [45]

stoffen. Seltener sind alkaliaktivierte Bindemittel Ursache für eine Alkalifreisetzung im Mauerwerk.

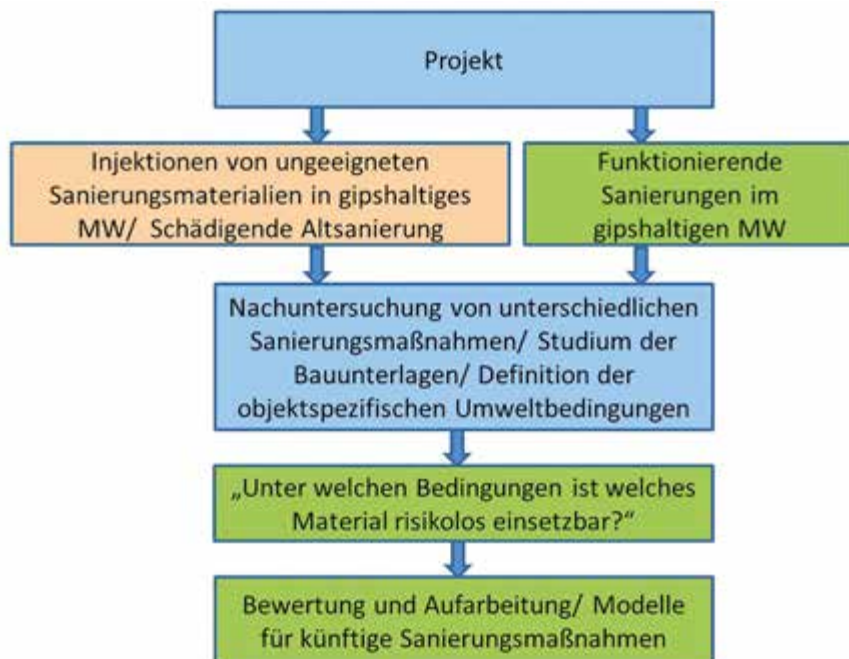
- *Ammoniumionen* entstehen bei der Zersetzung (Mineralisation) organischer Stoffe. Ein anthropogener Eintrag in Boden und Grundwasser erfolgt durch die Aufbringung ammoniumhaltiger Düngemittel, Einträge über die Luft (Deposition, besonders in Regionen mit intensiver Viehhaltung) sowie durch Abfälle und Abwässer.

Das Gefährdungspotential verschiedener bauschädlichen Salze wird unterschiedlich bewertet (Bild 7). Der aktuelle Stand wurde im WTA-Merkblattentwurf 3-13-18/D erarbeitet [45].

4 Das DBU-Projekt

Das innovative Ziel des geplanten Projektes ist, konkrete Aussagen darüber zu erzielen, welche Materialien und welche konstruktiven, materialtechnischen Rand- und Umweltbedingungen eine schadensfreie Sanierung zulassen (Erstellung eines Schadenskataloges), wobei die anthropogen verursachten Phänomene mit berücksichtigt werden.

Bild 8
Zielsetzung des Vorhabens



Es werden jahrelange praktische und laborteknische Erfahrungen im Bereich dieser Problematik gekoppelt und mit den anthropogen verursachten Veränderungen (Klimaänderungen, Schadstoffeintrag in das Mauerwerk) in Beziehung gesetzt (Bild 8). Die Ergebnisse sollen der Fachöffentlichkeit nachdrücklich bekannt gemacht werden, um zukünftig planerische Schadpotentiale auszuschließen. Infolgedessen werden bei einer kompetenten Planung, Vorbereitung und Durchführung weiterer Sanierungen von gipshaltigem Mauerwerk natürliche Ressourcen für Neuaufbau bzw. weitere Sanierungen geschont und national wertvolle Kulturgüter nachhaltig vor einer anthropogenen Zerstörung infolge unzureichenden Wissens bewahrt.

Folgende Fragestellungen sollen im Projekt beantwortet werden:

- Unter welchen Bedingungen ist welches Material risikolos nach schädigenden Altrestaurierungen im gipshaltigen Mauerwerk einsetzbar?
- Welches Material kann unter welchen Bedingungen im gipshaltigen Mauerwerk (ohne schädigende Sanierungen) eingesetzt werden, um die statischen Anforderungen zu erfüllen, ohne Treib- und Zersetzungserscheinungen hervorzurufen?
- Welchen Einfluss haben anthropogene Schadstoffe auf bereits geschädigtes Mauerwerk?

Mit dem DBU-Projekt wird eine Dokumentation angestrebt, die die Bedingungen (Baumaterial, konstruktive Bedingungen, Nutzung, Belastungen, vorangegangene Sanierungen) für den Einsatz eines bestimmten Materials klar definiert. Dafür werden die Modellobjekte Bergfried der Oberburg Kyffhausen sowie Schloss und Rathaus Heringen umfassend behandelt. Daneben sollen möglichst viele Objekte in ganz Deutschland begutachtet werden (Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Harz-umland, Thüringer Becken, Windsheimer Bucht).

In das Projekt ist ein Fachbeirat aus anerkannten Experten implementiert. Die Mitglieder besitzen über zwei Jahrzehnte Erfahrungen im Bereich gelungener und weniger erfolgreicher Sanierungen [3], [4], [5], [56].

Während der Projektbearbeitung ist die Herkunft der verschiedenen Ionen zu berücksichtigen und der Einfluss auf die Schädigungen zu beschreiben. Bauschädliche Salze führen zu Kristallisations- und Hydratationsschäden bei alternierenden Feuchtebedingungen. Im Projekt soll das gesamte Mauerwerk betrachtet werden. Letztendlich wird die Widerstandsfähigkeit eines Mauerwerks gegenüber anthropogenen Schadstoffen in der Luft und im Grundwasser durch das Porensystem seiner Baustoffe bestimmt (Mörtel, Steine). Innerhalb des Projektes soll besonderer Wert auf die Frage gelegt werden, ob die bauschädlichen Salze einen verstärkenden Einfluss auf die Ettringit- und Thaumasitbildung im gipshaltigen Mauerwerk haben. Wird durch die hygroskopische Feuchte und eindringendes Wasser nach Abplatzungen und Rissbildungen Wasser für die Schadreaktionen bereitgestellt? Entscheidend für die Volumenexpansion infolge einer Ettringitbildung sind immer das anthropogen eingebrachte Aluminat und Wasser. Für eine Gefügestörung infolge Thaumasitbildung sind das anthropogen eingebrachte reaktive Carbonat und ebenfalls Wasser entscheidend. Wasser wirkt als Transportmedium und Reaktionspartner. Mit einem erhöhten Wasserangebot im Bauteil existiert ein deutlich verstärktes Schadenspotenzial.

5 Materialien

In dem DBU-Projekt soll dokumentiert werden, welche Materialien und welche konstruktiven, materialtechnischen Rand- und Umweltbedingungen eine schadensfreie Sanierung zulassen. Besonderes Augenmerk muss auf das Austrocknungsverhalten des jeweiligen Mauerwerks gelegt werden. In der Dokumentation soll ein großes Spektrum der Sanierungsergebnisse aufgenommen werden. Deshalb wird innerhalb des Projektes angestrebt, möglichst viele Kombinationen (Material, Konstruktion, Umgebungsbedingungen) einzubeziehen um ein weites, umfassendes Bild zu bekommen. Infolgedessen ist die Begutachtung relativ vieler sanierter Objekte notwendig. Es werden Materialien aufgeführt, welche als Sanierungsmaterial eingesetzt worden sein könnten.

5.1 Sulfatische Materialien

Seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts gab es verschiedene Entwicklungen im Bereich der optimierten Bindemittel auf Sulfatbasis (–Halbhydrat, β -Halbhydrat, Anhydrit, Gipsstein, optimierte Mörtel aus industriell verfügbaren Ausgangsstoffen). Hier sind insbesondere die Arbeiten von Tesch/Middenorf, Kothe, Mielke/Keitz, Kulke/Binnewies, Steinbrecher, Zier/Huschenbeth und dem ZMK von Bedeutung ([16] bis [29]). In den Jahren 2016–2018 wurde von einem Konsortium innerhalb des SUL-FOAM-Projektes ein Schaummörtel auf Sulfatbasis entwickelt, welcher unter anderem für die Verfüllung von Hohlräumen im sulfathaltigen Mauerwerk geeignet ist [54], [55]. Parallel wurde im Jahre 2018 an der TU Dresden innerhalb eines Forschungsprojektes ein zementfreier Injektionsmörtel für gipshaltiges Mauerwerk entwickelt und die entsprechenden Injektionstechnologie ausgearbeitet ([35] bis [37]). Die Grenzen für den Einsatz optimierter gipshaltiger Mörtel sind durch Feuchte und/oder Salzbelastung gegeben. Bei der Anwendung dieser Mörtel liegt kein Korrosionsschutz für den Bewehrungsstahl vor.

5.2 Hydraulische Materialien

Innerhalb des Projektes wird recherchiert, ob in den zu untersuchenden Objekten eine Spezialmischung zur Anwendung kam oder ob ein »normales Bindemittel« eingesetzt wurde. Hierzu zählen:

- Portlandzement,
- Hochofenzement/Erzzement (bei RÜth teilweise Zusatz von Mikrosilica [48]),
- Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand RS (ehemals HS),
- Hydraulischer Kalk,
- Natürlich hydraulischer Kalk,
- Trasskalk,
- Hochbrandgips,
- u. U. Hochofenanhydritzement.

5.3 Spezielle Entwicklungen

- 1986 wurde in Aachen von Ludwig und Mehr ([6], [7]) ein Material auf der Basis von Portlandzementklinker, Hüttensand und Puzzolanen entwickelt, welches von einem Marktführer der Mörtelindustrie nun seit 20 Jahren angewendet wird. Die Wirkungsweise beruht auf einem Austausch von Zementklinker durch ein Puzzolan (Trass, Hüttensand oder Si-Stoff), wodurch sich ein abgesenktes Ca/Si-Verhältnis in den C-S-H-Phasen einstellt, welches den pH-Wert im Mörtel senkt.
- Ab Anfang der 1990er Jahre ist am F. A. Fingerinstitut für Baustoffkunde in Weimar ein Injektionsschaummörtelsystem entwickelt worden ([8] bis [15]). Dieses System stellte Stürmer 1997 auch für sulfathaltiges Mauerwerk vor, welches auf der Basis eines sulfatbeständigen Zementes und einem hohen Porenraum für auskristallisierende Salze basiert. Dabei zeigt die Zugabe eines Schaums vielfältige Vorteile. Der damit hergestellte Bindemittelstein weist eine reduzierte Rohdichte und Festigkeit auf und ist dadurch mit dem Altmauerwerk kompatibel. Durch die Poren wird der Kapillartранsport von Wasser reduziert und eventuell entstehende Treibminerale können in gewissen Grenzen schadlos in den Poren kristallisieren.
- 2010 wurde innerhalb eines DFG-Forschungsvorhabens von Bellmann an der Bauhaus-Universität Weimar ein hydraulisches Bindemittel entwickelt, welches sowohl mit hydraulischen als auch mit sulfatischen Materialien verträglich ist. Dieses Bindemittel besteht aus Hüttensand und einem Anreger. Eine Ettringitbildung wird unterbunden. Parallel stellt sich ein niedriger pH-Wert in der Porenlösung ein, wodurch die Dauerhaftigkeit des Materials deutlich erhöht wird [30].
- Im Zeitraum von 2014–2017 ist im Rahmen eines VIP-Projektes aus dem Bindemittel ein Mörtelsystem für verschiedene Anwendungen entwickelt worden. Dieses stellt insbesondere für notwendige Injektionen eine gute Alternative dar ([31] bis [33]).

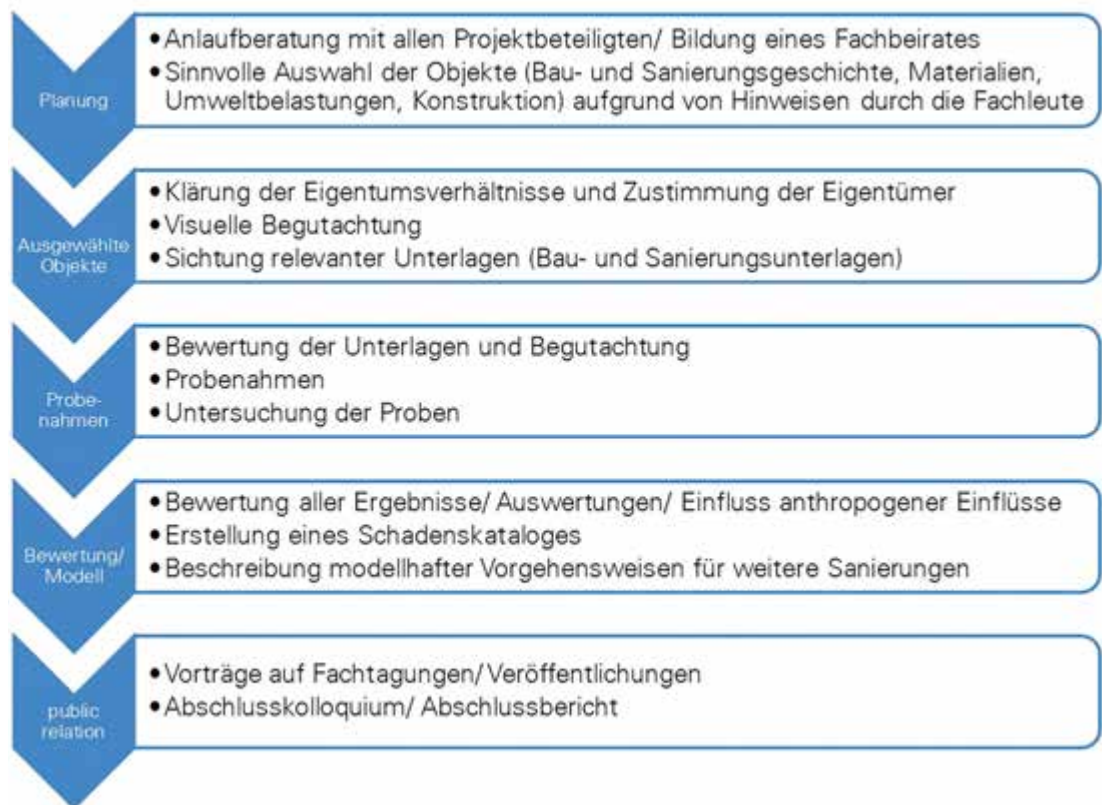


Bild 9
Vorgehen innerhalb
des Projektes

6 Methodik

Innerhalb des Projektes wird nach dem im Bild 9 dargestellten Schema vorgegangen.

Für jedes ausgewählte Objekt ist ein fester Fragenkatalog abzuarbeiten. Dies soll die Vergleichbarkeit der Angaben sicherstellen. Die Angaben können auch anonym erfolgen. Für gesicherte Aussagen zu den unterschiedlichen Bedingungen sind ca. 25–30 Objektbegutachtungen, teilweise mit Probenahmen, und Bewertungen geplant. Die Ergebnisse der an den Objekten zusammengetragenen Erfahrungen sollen modellhaft für weitere Sanierungsmaßnahmen genutzt werden können. Erstmals soll im Rahmen eines größeren Projektes ein Schadenskatalog zu dieser Problematik erstellt und den Akteuren in der Praxis eine Handreichung für das Vorgehen im »Sanierungsfall gipshaltiges Mauerwerk« gegeben werden.

Eine vorläufige Liste der vorgeschlagenen Objekte wurde zu Beginn des Projektes mit dem Fachbeirat diskutiert. Auf dieser Basis und auf Grundlage weiterer Hinweise von Fachleuten wird die Liste ständig erweitert. Kriterien für die Auswahl der Objekte aus der Liste sollen die verschiedenen Bedingungen und der unterschiedliche Sanierungserfolg differenter Methoden sein. Im Ergebnis sollten

modellhaft Sanierungsempfehlungen (Verfahren, Materialkombinationen) für Objekte mit unterschiedlichen Randbedingungen (Umwelt, Konstruktion, Material, Belastungen) stehen. Innerhalb des Projektes wird angestrebt, möglichst zahlreiche Kombinationen (Material, Konstruktion, Umgebungsbedingungen) einzubeziehen um ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten. Infolgedessen ist die Begutachtung relativ vieler sanierter Objekte notwendig. Innerhalb von drei Monaten Projektbearbeitungszeit hat sich die Liste auf der Basis von Hinweisen von Fachleuten auf über 50 Objekte erweitert.

7 Beispiel Modellobjekt Bergfried der Oberburg Kyffhausen

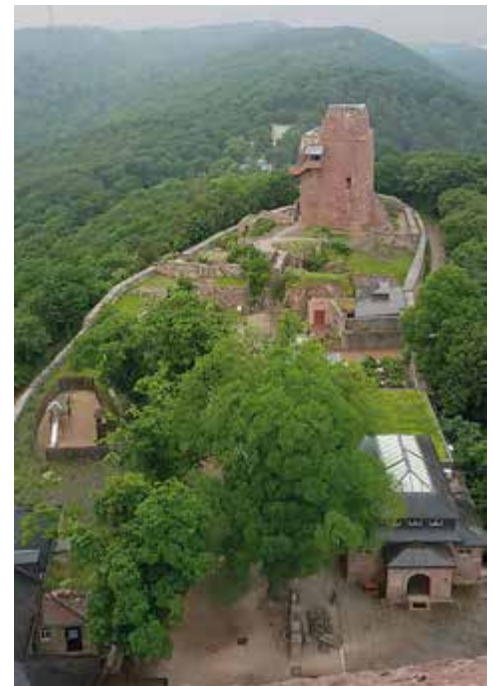
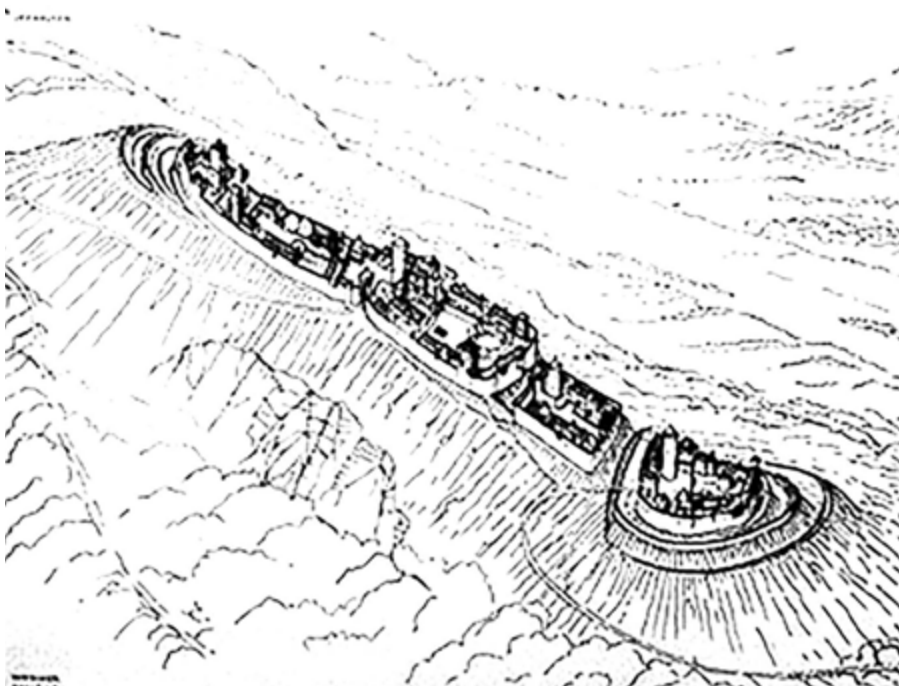
Als wichtiges Modellobjekt wurde der Mitte der 1990er Jahre sanierte Bergfried der Oberburg Kyffhausen ausgewählt. Mit ca. 600 m Länge war die Burg Kyffhausen eine der größten deutschen Burganlagen des Hochmittelalters. Die Dreiteilung der Veste in Unter-, Mittel- und Oberburg (Bild 10) ist auch in der heutigen Zeit noch deutlich erkennbar. Von der Oberburg und der Unterburg sind noch einige Strukturen gut erhalten. Die Mittelburg wurde während des Baus des Kyffhäuserdenkmals

Bild 10

Die Reichsburg Kyffhausen im 12. Jh. nach Hermann Wäscher (Quelle: Müller, Horst; Der Kyffhäuser, Leipzig 1992)

Bild 11

Oberburg der Burg Kyffhausen heute



1892 bis 1896 weitestgehend geschleift bzw. überformt. Die heute erhaltenen Baureste an der Oberburg zeigen die typischen Elemente einer hochmittelalterlichen Feudalburg. Dazu gehört der freistehend Bergfried (Barbarossaturm der Oberburg), an den Ringmauern angelegte Wohn- und Wirtschaftsgebäude und die Ringmauer mit ihren als Kammertor gestalteten Eingängen (Ober- und Unterburg).

Die Oberburg war in ihrer Ausdehnung von ca. 220 m Länge der größte Teil der Burganlage. Hier sind entsprechend ihrer Funktion als Kernburg die große Kirche, Pallas und Wohngebäude zu vermuten. Der mächtige, einst 30 m hohe Bergfried gilt seit Jahrhunderten als Wahrzeichen des Berges (Bild 11). Er ist in mehrere Geschosse untergliedert. Der originale Eingang befand sich in 10 m Höhe. Heute sind noch circa 15 m des imposanten »Barbarossaturmes« erhalten. Der Turm ist durch seine Lage in extremer Weise der erodierenden Wirkung von Wind, Niederschlägen, Frost und Temperaturspannungen ausgesetzt. Eine fehlende Bauwerkspflege über Jahrhunderte verursachte in der Vergangenheit den fast vollständigen Verfall der Oberburg. Im Zeitraum von 1993 bis 1997 wurde der Bergfried grundlegend saniert. Der rötlich gefärbte Sandstein bzw. das Kyffhäuserkonglomerat waren ursprünglich mit Gipsmörtel (mit Gipsstein als Zuschlag) verbunden. Die Belastung durch bauschädliche Salze war vor der Sanierung sehr gering. Hohe Sulfatgehalte im ehemals zerstörten Mauerwerk resultieren aus dem verwendeten Gipsmörtel. Die Schäden vor der Sanierung wurden durch die Struktur und materialbedingte Schwächen des Mauerwerks (2-Schaligkeit des Mauerwerks, überwiegend kurze Steinquader in den Außenschalen, unterschiedliche Steinqualitäten, Mörtelzusammensetzung mit Gipsanteilen) verursacht. Hinzu kommen nicht mehr wirksame ältere Restaurierungs- und Bausicherungsmaßnahmen (weitgehend zerstörte Verfugungen, zerstörte großflächige Steinverfugungen des offenliegenden Füllmauerwerks in den oberen Bereichen, gerissene

oder nicht mehr kraftschlüssige Spannanker) sowie fehlende Mauerwerksverbindungen im Sinne einer Ringankerwirkung vor allem in den oberen Turmbereichen (zerstörte Mauerwerksecken, fehlende Mauerwerksaußen- und innenschalen, fehlende Fenstersturzverbindungen, durchgehende Vertikalrisse – Pfeilerbildung usw.). Vor Beginn der letzten Sanierungsarbeiten wurden ausführliche Gutachten zur Materialbeschaffenheit des Bauwerks erstellt und entsprechende Sanierungsempfehlungen formuliert. Diese sind vom Architekten und von einer Fachfirma entsprechend in die Sanierungsausführung einbezogen worden. Eindrucksvoll wurden instabile Mauerwerkspartien statisch gesichert und in die richtige Position gekippt [34]. Nach visueller Beurteilung konnte der Zustand des Bauwerks zunächst als gut eingestuft werden. Geringe Probleme in den Fugenbereichen und steinmaterialbedingte Abwitterungen sind unter den extremen Witterungsbedingungen (Exposition) als normal einzustufen. Seit einigen Jahren beeinträchtigen starke Ausblühungen und offensichtliche Materialveränderungen sowie Rissbildungen das Erscheinungsbild dieses Baudenkmals und die innere Struktur. Die in den letzten Jahrzehnten veränderten Klimabedingungen, die durch sich abzeichnende stärkere Extrema gekennzeichnet sind, tragen wahrscheinlich zu einer Verstärkung der Schäden bei. In einer stichprobenartigen Prüfung der Ausblühungen wurde vorwiegend Natriumsulfat (Thenardit, Natrium stammt aus dem Zement) nachgewiesen (Bilder 12 und 13). Problematischer erscheint der Nachweis von Thaumasil (Gefüge zerstörend) im Kontaktbereich Ankermörtel-Mauerwerk (Bilder 14 und 15).

Anfang Dezember 2019 erfolgte eine Drohnenbefliegung des Barbarossaturms. Dabei konnte eine augenscheinlich intakte Dachkonstruktion beobachtet werden. Im oberen Bereich der Wände zeigten sich dagegen starke Risse und Ablösungen des Spritzbetons (Bilder 16 und 17). Die Befunde werden derzeit in Bezug zu den Bauunterlagen gesetzt und ausgewertet.



Bild 12 Ausblühungen im Ausstellungsraum des Bergfrieds im Jahr 2017

Bild 14 Ausblühungen in der Kontaktzone eines Injektionsmörtels zum Mauerwerk im Ausgangsbereich des Bergfrieds; Taumasit mittels Röntgenbeugung nachgewiesen

Bild 16 augenscheinlich intakte Dachkonstruktion

Bild 13 Detail aus Bild 12, Thenardit und teilweise Ettringit mittels Röntgenbeugung nachgewiesen

Bild 15 Zerbröckelnder Anker- und Mörtelmauerwerk im Ausgangsbereich des Bergfrieds

Bild 17 Risse im Spritzbeton und Abplatzungen im oberen Bereich des Babarossaturmes

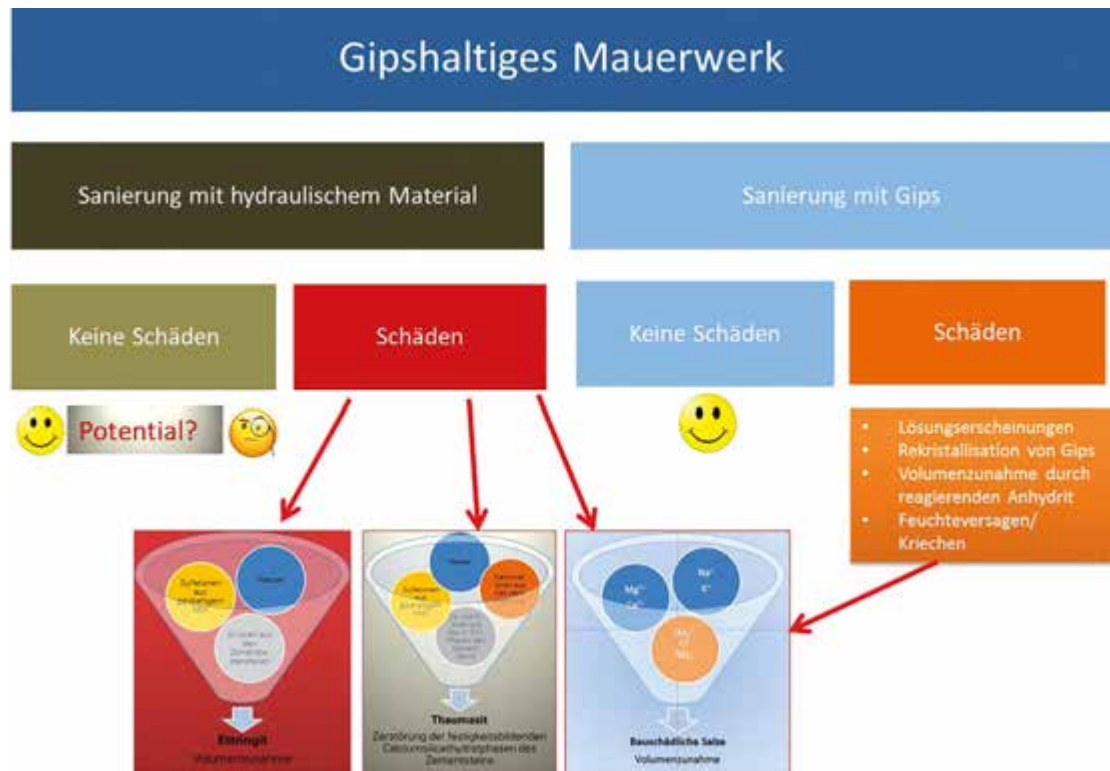


Bild 18

Sanierung von gipshaltigem Mauerwerk

8 Zusammenfassung

Im September 2019 wurde ein Forschungsprojekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt zur Bewertung des langfristigen Sanierungserfolges von gipshaltigem Mauerwerk begonnen. Innerhalb von zwei Jahren werden erfolgreiche und weniger erfolgreiche Sanierungsmaßnahmen nachuntersucht

und bewertet (Bild 18). Auf der Basis dessen wird ein Schadkatalog angefertigt. Die als sehr erfolgreich bewerteten Maßnahmen sollen für Planer als Modelle für weitere Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden.

Literatur und weitere Literaturhinweise

- [1] Autorenkollektiv: Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden, WTA-Merkblatt 08.2017/D; Fraunhofer IRB Verlag
- [2] Autorenkollektiv: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an Fassaden, hrsg. von M. Auras und H.-W. Zier, WTA-Schriftenreihe, 2008, 30
- [3] Sobott, R., Schuh, H.: Untersuchungen zu Thaumasil-Schäden an historischen Bauwerken im Labor und vor Ort, in Stein: Zerfall und Konservierung, hrsg. von S. Siegmund, M. Auras und R. Snethlage, 2005, S. 275–282, Edition Leipzig
- [4] Sobott, R., Meinhardt-Degen, J.: Chemisch-mineralogische Untersuchungen an Mörtelproben im Rahmen des Turmrückbaus der Kirche St. Nikolai in Eilenstedt, Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an den Fassaden, hrsg. von M. Auras und H.-W. Zier, WTA-Schriftenreihe, Heft 30, 2008, S. 85–98
- [5] Lenz, R., Sobott, R.: Beobachtungen zu Gefügen historischer Gipsmörtel.- in Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an den Fassaden, hrsg. von M. Auras und H.-W. Zier, WTA-Schriftenreihe, Heft 30, 2008, S. 23–34
- [6] Mehr, S.: Entwicklung von sulfatbeständigen Mörteln auf Zement-Hüttensand-Puzzolan-Basis. 1986, Rheinisch-Westfälische technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften: Aachen, S. 135
- [7] Ludwig, U., Mehr, S. and Moldan, D.: Causes of Damages to Historical Buildings and Proposals for a Conception of Mortars for Restoration Work,

- Ursachen von Schäden an historischen Bauwerken und Vorschläge für eine Konzeption von Mörteln für Sanierungsarbeiten, BMT Baumaschine + Bautechnik, 1984. 31(10)
- [8] Stark, J., Mielke, I., Innovationspreis Heidelberger Zement 1991
- [9] Stark, J., Mielke, I.: Injektionsschaummörtel. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1993. 39(3), S. 163–168
- [10] Stark, J., Mielke, I.: Injektionsschaummörtel in der Mauerwerkssanierung, Bauwerkserhaltung Sonderausgabe Oktober 1994
- [11] Stark, J.: Injektionsschaummörtel, in »Mörtel in der Denkmalpflege« BMFT-Workshop, 1993, Künzler 27./28.4.1993
- [12] Mielke, I., Stürmer, S., Stark, J.: Hohlraumverfüllung mit Injektionsschaummörtelmauerwerksinjektion, Bausanierung, 1994, S. 71–76.
- [13] Stark, J., Mielke, I.: Praktische Erfahrungen beim Einsatz des Injektionsschaummörtels, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1995, 41(6/7), S. 111–118
- [14] Stark, J., Mielke, I., Stürmer, S.: Sulfatbeständige Injektionsmörtel, 13. Ibausil 1997, Weimar
- [15] Stark, J., Mielke, I.: Injektionsschaummörtel, Mauerwerkskalender 2008, Verlag Ernst Sohn Berlin, S. 269–279
- [16] Arens, P.: Untersuchung und Entwicklung von Gipsmörteln für den Außenbereich unter besonderer Berücksichtigung der Wasserresistenz, Diss. an der Universität-Gesamthochschule Siegen, FB 8, 2002
- [17] Kulke, H., Binnewies, W.: Gipsbrennen nach historischer Art für Restaurierungszwecke – der Gipsofen bei Osterode am Harz und seine Produkte, DenkMal!, 1998 (5), S. 75–78
- [18] Keitz, R.: Erst geliebt, dann gefürchtet, B+B, 2002, S. 3
- [19] Kulke, H., et al.: Gips, ein bedeutender historischer Baustoff, nach alter Art neu gebrannt. Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 2003, S. 61–66
- [20] Steinbrecher, M.: Historischer Gipsmörtel in Mitteleuropa, 2006, Fraunhofer IRB Verlag
- [21] Weichmann, J.: Historische Gipsmörtel in Deutschland: Mineralogische, chemische und physikalische Eigenschaften, Ableitung der Brennprozesse und Rezepturen, Wechselwirkungen mit Werksteinen, 1997, Diss. an der Technische Universität Claustal, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, S. 221
- [22] Visser, H.: Optimierung und Erprobung dauerhafter Gipsmörtel für die Instandsetzung umweltgeschädigter historischer Bauwerke – DBU Abschlussbericht 2005
- [23] Visser, H.: Neue Mörtel für historische, mit Gips errichtete Bauwerke, Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 2003, S. 66–68
- [24] Middendorf, B.: Charakterisierung historischer Mörtel aus Ziegelmauerwerk und Entwicklung von wasserresistenten Fugenmörteln auf Gipsbasis, 1994, Universität Gesamthochschule Siegen, Fachbereich 8, Siegen
- [25] Tesch, V.: Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis für die Anwendung im Außenbereich, 2006, Universität Kassel, FB Bauingenieurwesen, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens, Kassel
- [26] Steinbrecher, M.: Gipsestrich und -mörtel: Alte Techniken wiederbeleben- verlorenes Wissen erschwert Instandsetzung. Bausubstanz, 1992, 10(8), S. 59–61
- [27] Steinbrecher, M.: Historische Gipsmörtel und Gipsestriche, Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt, 1994 (2), S. 127–133
- [28] Kothe, H.-U.: Erfahrungen beim Einsatz von industriell hergestellten Gipsmörteln zur Sanierung historischer Bauwerke, 1. Weimarer Gipstagung 2011, Weimar.
- [29] Srocke, G.: Die Traditionelle Hochbandgipstechnologie in der Wiederbelebung und Anwendung. in 1. Weimarer Gipstagung 2011, Weimar
- [30] Bellmann, F., Stark, J.: Activation of blast furnace slag by a new method, Cement and Concrete Research, 2009, 39(8), S. 644–650
- [31] Eckart, A., Ludwig, H.-M.: Entwicklung eines Mörtelsystems für sulfathaltiges und hydraulisches Mauerwerk, Tagungsband der 19. Internationalen Baustofftagung ibausil, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Band 2, S. 1477–1481
- [32] Eckart, A.: Sulfathaltiges Mauerwerk falsch saniert – was dann? 3. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, 30.11. – 01.12.2016 in Weimar
- [33] Eckart, A.: Instandsetzungsmaterial für sulfatisch und hydraulisch gebundenes Mauerwerk, 3. Weimarer Gipstagung 2017, S. 125–131
- [34] Nehring, C., Eckart, A.: Nachuntersuchung von konstruktiven Sicherungsmaßnahmen mit zementhaltigen Injektionsmaterialien an gipshaltigen Mauerwerksbauten in Thüringen; 2004, Abschluss-

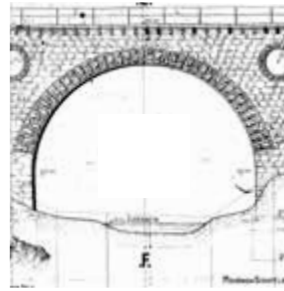
- bericht zu einem Projekt des Institut für Steinkonservierung Mainz e. V.
- [35] Jäger, W., Burkert, T., Eckart, A.: Sanierung des westlichen Iwans vom Tahkt-e Soleyman im Iran, Jahresbericht 2017, TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung, erarbeitet i. A. des AA der BRD im Rahmen des Kulturerhaltprogramms, 2018
- [36] Jäger, W., Boekhoff, B., Köberle, T., Hohl, M.: Verpressen von historischem Mauerwerk, Mauerwerk Kalender 2016 (41), S. 163–209, Verlag Wilhelm Ernst Sohn, Berlin
- [37] Jäger, W., Köberle, T., Eckart, A.: IngiMa – Entwicklung einer zementfreien Injektionstechnologie auf Kalkbasis für sulfathaltiges Mauerwerk wertvoller historischer Bauwerke, TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung, Abschlussbericht erarbeitet im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« des BBSR, 2018
- [38] Hattermann, F.F. et al.: Climatological Drivers of Changes in Flood Hazard in Germany, *Acta Geophysica* 61, 2013, 463–477
- [39] Potsdam-Institut für Klimaforschung: Klimafolgen für Deutschland, Potsdam 2. Auflage 2013
- [40] Deutscher Bundestag: Sachstand WD 8-3000-058/18 – Umgang mit den Folgen des Klimawandels, insbesondere Starkregen, 2018
- [41] BMU, Referat Öffentlichkeitsarbeit: Grundwasser in Deutschland, 2008
- [42] BMUB Referat WR I 3 und BMEL Referat 523: Nitratbericht 2016, 2017
- [43] Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K.: Rekordbrechende Niederschlagsereignisse unter der globalen Erwärmung erhöht, *Climatic Change*, 2015/10, S. 501–515,
- [44] Blanco-Varela, M. T., u. a.: Thaumasite formation due to atmospheric SO₂-hydraulic mortar interaction; *Cement & Concrete Composites* 25, 2003, S. 983–900
- [45] Autorenkollektiv: WTA-Merkblatt 3-13-18/D: Salzreduzierung an porösen mineralischen Baustoffen mittels Kompressen, 2018
- [46] Arendt, C., Seele J.: Feuchte und Salze in Gebäuden«, 2000, Verlagsanstalt Alexander Koch
- [47] Ö-Norm B 3355: 2017-03 (2017) Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk – Bauwerksdiagnostik, Planungsgrundlagen, Ausführungen und Überwachung. Österreichisches Normungsinstitut (ON), A-1021 Wien.
- [48] Rüh, G.: Schäden, Schutz- und Sicherungsmaßnahmen bei Bauwerken mit Gipsmörtel, *Der Bautenschutz* (1), Januar 1932 und (3) März 1932
- [49] Dreuse, H., Nehring, C.: »Nachuntersuchung von konstruktiven Sicherungsmaßnahmen mit zementhaltigen Injektionsmaterialien an gipshaltigen Mauerwerksbauten in Thüringen« unveröffentlichter Bericht an der FH Erfurt 2005, gefördert durch das IFS Mainz
- [50] Garrecht, H., Nehring, C., Wigger, H.: Untersuchung und Reduzierung der Treibmineralschäden an gipshaltigen Baudenkmalen, Abschlussbericht eines FH3-Projektes 2009, gefördert durch das BMBF
- [51] Neubauer, J., F. Bernhardt, and F. Götz-Neunhoeffer. Auswirkung von Calciumsulfaten auf das Hydratationsverhalten der Ferratphase, in 1. Weimarer Gipstagung. 2011. Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde.
- [52] Bollmann, K., Ettringitbildung in nichtwärmebehandelten Betonen. 2000, Bauhaus Universität Weimar: Weimar.
- [53] Weise, G., Schilling, W., Von Alabaster bis Zement – Bodenschätze und ihre Nutzung im Raum Jena, Heinrich-Jung-Verlagsgesellschaft mbH Zella-Mehlis/Meiningen 1997
- [54] Nowak, S.; Dovgun, M.; Dreuse, H. Fischer, H.-Bert-ram: Calciumsulfat-Bindemittel für Schaumbaustoffe zur Verwendung als Dämmstoff oder zur Mauerwerksverfüllung 2018, ibausil. 20. Internationale Baustofftagung, 12.–14. September 2018, Weimar, Bundesrepublik Deutschland. Tagungband 1
- [55] Dreuse, H., Zier, H.-W., Bonitz, F.: Ein Baustoff mit Potenzial. *Bautenschutz und Bausanierung*, 6, 2019
- [56] Zier, H.-W., Dreuse, H.: Unkenntnis schützt vor Schäden nicht. *Bautenschutz und Bausanierung*, 3, 2017

Bildnachweis

Falls nicht anders angegeben: Angela Eckart



Experimentell gestützter Nachweis einer mit Naturstein verkleideten Eisenbahn-Stampfbetonbrücke



Gewölbebrücken sind Tragwerke mit teilweise enormen Tragreserven, die rechnerisch nur schwer zutreffend zu beschreiben sind – insbesondere, wenn die Struktur vorgeschädigt ist. Ein Lösungsweg ist, ein hybrides Verfahren anzuwenden: wesentliche Bauwerksreaktionen werden unter Betriebslasten gemessen, um Rechenmodelle auf der Grundlage der Ergebnisse anzupassen und den aktuellen Lastabtrag abzubilden. An dem validierten Modell werden anschließend alle weiteren Nachweise zur Ermittlung der zulässigen Einwirkungen durchgeführt. Ein Nachteil gegenüber Probelastungen ist, dass bei der rechnerischen Extrapolation der Ergebnisse bis zur Traglast Unsicherheiten verbleiben. Diese werden in der Regel durch Parametervariationen abgeschätzt, um die Tragfähigkeit nicht zu überschätzen.

Marc Gutermann
Andreas Wasjuta
Konstantin Tiefenthaler

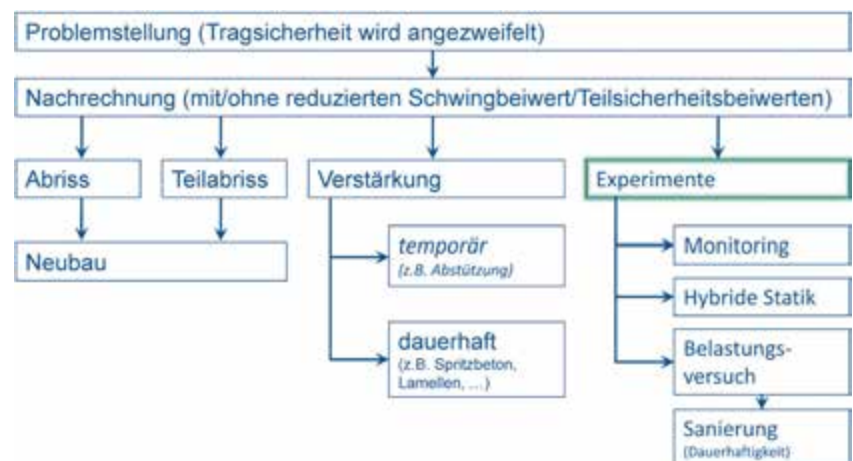
1 Tragsicherheitsnachweis für Bestandsbauten

Mehr als 60 % der Bauaufträge werden heute in Deutschland im Bestand umgesetzt [1]. Eine wesentliche Voraussetzung für Nutzungs- und Investitionsentscheidungen ist der Nachweis ausreichender Tragsicherheit für die gewünschten Lastansätze, oftmals eine Herausforderung für den Tragwerksplaner, wenn zuverlässige Daten über Baustoffe und -konstruktion fehlen oder Bauwerksmängel die Tragfähigkeit abmindern. Wenn der rechnerische Nachweis nicht gelingt, wird meist konventionell verstärkt oder abgerissen und neu gebaut. Das sind jedoch nicht immer wirtschaftliche und denkmalverträgliche Varianten. Eine alternative Vorgehensweise ist der experimentell gestützte Nachweis, bei dem entweder wesentliche Parameter für einen rechnerischen Nachweis durch Versuche ermittelt werden oder Belastungsversuche direkt nach Beendigung Sicherheit für die weiteren Planungen bringen.

Die letzten Jahrzehnte waren gekennzeichnet durch einen eindrucksvollen Einzug der elektronischen

Datenverarbeitung in alle Bereiche des Bauwesens. In der Statik ließ sich jedes Problem in immer besseren und umfangreicheren Rechenprogrammen modellieren und lösen. Je detaillierter die Software, umso mehr Parameter müssen jedoch eingegeben und damit Annahmen getroffen werden. Oftmals führt gerade beim Bauen im Bestand ein rechnerischer Nachweis zu einem unbefriedigenden Ergebnis, da wesentliche Informationen fehlen oder Schäden eine zuverlässige Bewertung erschweren. Als alternativen Lösungsansatz bieten sich experi-

Bild 1
Lösungsstrategien zum Tragsicherheitsnachweis für Bestandsbauten



mentell gestützte Verfahren an (Bild 1), wenn alle anderen Ansätze zuvor nicht erfolgreich waren. Grundsätzlich empfiehlt sich ein abgestuftes Verfahren:

1. Abschätzung der Tragsicherheit, z. B. aufgrund vorhandener Unterlagen
2. Überschlägige Berechnung der Tragsicherheit, z. B. mit einfachen Berechnungsmodellen
3. Genaue Berechnung der Tragsicherheit, z. B. mit komplexen Finite-Element (FE) Berechnungsansätzen und Modellen
4. Messwertgestützte Ermittlung der Tragsicherheit

Die Bandbreite der möglichen Einsatzgebiete experimenteller Methoden ist schier unbegrenzt (Tabelle 1). Einige Fallbeispiele anderer Projekte können der Fachliteratur entnommen werden ([2] bis [5]).

Experimente sind Teil unserer Ingenieurgeschichte. Sie dienen der Absicherung neuer Bauweisen und helfen, theoretische Ansätze zu verstehen. Schon Ende des 19. Jahrhunderts wurde erkannt, dass nur durch Versuche und Erfahrung die komplexen Zusammenhänge der Werkstoffgesetze und Mechanik verständlich werden und Konstruktionsempfehlungen abgesichert werden können. Die ersten deutschen Stahlbetonvorschriften DIN 1045 von 1925 enthielten daher Hinweise über Probelastungen im Stahlbetonbau [3].

Das grundsätzliche Prinzip experimenteller Untersuchungen ist einfach und bewährt: Es wird ein Bauteil belastet und seine Reaktionen gemessen. Je nach Zielrichtung werden drei prinzipielle

Versuchsarten unterschieden [6]:

- Tragsicherheitsbewertung,
- Systemmessungen,
- Tragfähigkeitsmessungen (Bruchversuche).

Die Tragsicherheitsbewertung hat den Nachweis einer ausreichenden Tragsicherheit von bestehenden Bauteilen zum Ziel und beinhaltet die Belastung eines Bauteils bis zur Versuchsziellast F_{Ziel} . Dabei wird das Tragwerk oberhalb der Gebrauchslast, inkl. dem Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten, getestet. Das Tragverhalten wird bis zur Ziellast analysiert, das Ergebnis ausreichender Tragsicherheit liegt sofort nach Beendigung der Versuche vor. Der Aufwand für Belastungs- und Messtechnik ist jedoch vergleichsweise hoch.

Der Aufwand von Systemmessungen ist moderat. Sie überprüfen das aktuelle Tragverhalten eines Bauwerks etwa im Gebrauchslastniveau, um zum Beispiel bekannte Schäden zu überwachen oder Berechnungsannahmen zu verifizieren. Die Ergebnisse werden mit Berechnungsmodellen verglichen, so dass diese überprüft und daran kalibriert werden können. Die Belastung muss dabei einerseits so hoch gewählt werden, dass das Tragverhalten der Konstruktion unter den planmäßig auftretenden Nutzlasten angemessen beurteilt werden kann, darf aber andererseits nicht so hoch sein, dass kritische Bauwerksreaktionen eintreten.

In Ausnahmefällen werden Tragfähigkeitsmessungen (Bruchversuche) durchgeführt. Die Belastung von Bauteilen bis zum Versagen hat das Ziel, die reale Tragfähigkeit zu bestimmen, um Erkenntnisse für die Grundgesamtheit vergleichbarer Bauteile zu erhalten.

Bei allen drei Verfahren müssen die charakteristischen Daten eines Versuchsablaufs durch elektrische Messsysteme aufgenommen und gegebenenfalls zeitgleich angezeigt werden, wie zum Beispiel Lastgrößen, Verformungen, Dehnungen etc. Dabei ist bei der Planung Vorsicht geboten. »Wer viel misst, misst Mist« ist ein geflügeltes Sprichwort und umschreibt zutreffend den Umstand, dass die gewonnenen Daten – oft zeitgleich – auf Plausibilität geprüft sowie analysiert werden müssen. Dies setzt geschultes Personal und eine gewisse Erfahrung voraus.

Tabelle 1 Anwendungsbreite und Beispiele erfolgreicher experimenteller Untersuchungen

	Belastungsversuche	Systemmessungen	
		Hybride Statik	Überwachung
Gebäude	Decken, Unterzüge, Stützen, Fassaden, Treppen, Balkone, Dächer	Austausch eines Kämpfersteines	Erschütterungen (aus Zugverkehr)
Ingenieurbau	Abwassersysteme Gründungen Spundwände Durchlässe	Faltwerke, Fundamente von Windenergieanlagen	Hubbrücke, Karussell
Wasserbau	Haltekreuze in Schleusen Anker von Spundwänden	Kragstützwand	Segmentwehr, Tordichtung
Brücken	Gewölbe Steinbogen Stahlbeton (Straße u. Schiene)	Gewölbe Stahlfachwerk (Schiene)	Koppelfugen, Seilschwingungen, Freischneidetechnik

Die experimentelle Tragsicherheitsbewertung ersetzt den rechnerischen Nachweis der Standsicherheit und wird nach Erfahrung sowohl von den Prüfingenieuren als auch der Bauaufsicht der Länder akzeptiert. In Einzelfällen wurde eine Zulassung im Einzelfall verlangt. Es ist daher sinnvoll, alle Beteiligten schon in den Planungsprozess zu involvieren.

Die grundsätzliche Eignung und Zulässigkeit des die Rechnung begleitenden experimentellen Tragfähigkeitsnachweises auf der Grundlage der Regelungen der DAfStb-Richtlinie [6] wurde von der Fachkommission »Bautechnik« der ARGEBAU bestätigt [7]. Die versuchsgestützte Bemessung ist auch im aktuellen Normenwerk der Eurocodes enthalten, z. B. in den Grundlagen der Tragwerksplanung [8] oder in der Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken [9].

2 Bestandsaufnahme Loisachviadukt

2.1 Bauwerksbeschreibung

Mitte des 19. Jahrhunderts strebte Bayern danach, eine neue leistungsstarke Alpenquerung zum Anschluss des Güterverkehrs nach Italien zu schaffen. Durch den Eisenbahnboom beflügelt, wurde ein Ausbau des Schienennetzes bevorzugt. Nachdem Österreich (Brennerbahn) und Schweiz (Gothardbahn) parallel bereits Strecken ausgebaut hatten wurde die Idee einer »Fernbahn« über den Fernpass (Imst-Fernpass-Reutte) aufgegeben und der Anschluss des Schienennetzes an bestehende Trassierungen bevorzugt. Die Vision ist jedoch nie aufgegeben worden und führte dazu, dass Anfang des 20. Jahrhunderts das bis dato schlecht erschlossene Tirol eine Lokalbahn über den »Außerfern« erhielt. Für eine Lokalbahn war der Bau relativ aufwendig. So mussten mehrere Tunnel und große Brücken errichtet werden. Außerdem waren große Höhenunterschiede zu überwinden, da die Trassierung nur selten Tälern folgen konnte. Aus Sparzwängen wurden einige kleinere Tunnelbauwerke vermieden, die Strecke war daher kurvenreich ($R \geq 180\text{ m}$) und mit großen Steigungen ($\leq 36,5\%$) angelegt. Zur Eröffnung am 29. Mai 1913 wurde die Strecke mit Geschwindigkeiten bis zu 40 km/h freigegeben.

Im Streckenabschnitt Reutte-Griesen überführt das Loisach-Viadukt bei km 22,973 in Ehrwald, Österreich, eingleisig die Zugstrecke der Außerfernbahn in einem leichten Linksbogen mit einem Radius $R = 200\text{ m}$ den Fluss Loisach sowie die Ehrwalder Straße B 187 (Bild 2).

Die Gewölbebrücke besteht aus einem Stampfbetonkern, der aufgrund der ortschaftsnahen Lage aus optischen Gründen mit Natursteinen aus der Umgebung verkleidet wurde. Ihre insgesamt sieben Öffnungen lassen sich in ein Hauptgewölbe ($l_w = 15\text{ m}$), drei Nebengewölbe ($l_w = 10\text{ m}$) sowie drei Spargewölbe ($l_w = 1,8\text{ m}$) unterteilen (Bild 3). Aufgrund des festen, felsigen Baugrundes und der »massiven« Bauweise ist davon auszugehen, dass es sich um gelenklose Vollgewölbe handelt. Dieses trifft ebenfalls auf die neun gleichzeitig von 1910–1912 im gesamten Bauvorhaben Innsbruck-Scharnitz und Reutte-Griesen errichteten Viadukte zu. Die Gewölbestärke nimmt vom Scheitel zum Kämpfer hin stetig zu, welches ebenfalls ein Merkmal beiderseits eingespannter Gewölbe ist. Die Breite des Oberbaus mit dem Geländer beträgt ca. $b_o = 5,2\text{ m}$. Die Pfeilerbreite unten beträgt ca. $b_{pu} = 5,6\text{ m}$ und oben ca. $b_{po} = 4,5\text{ m}$.

Während die Gewölbe hauptsächlich aus Stampfbeton bestehen, zeigten im Jahre 1977 durchgeführte Kernbohrungen, dass in den Pfeilern stellenweise ein Stampfbeton-Kalksteingemisch »harter Steinschlag« verbaut wurde. Die Hinterfüllung oberhalb der Gewölbe bis zum Oberbau in der Brückenachse besteht aus einer Steinschichtung, wobei die Aufbauhöhe und -breite variiert (vgl. »Längenschnitt« in Bilder 3 und 5). Die Stirnwände

Bild 2
Südansicht Loisach-Viadukt
»Ehrwald-Viadukt«



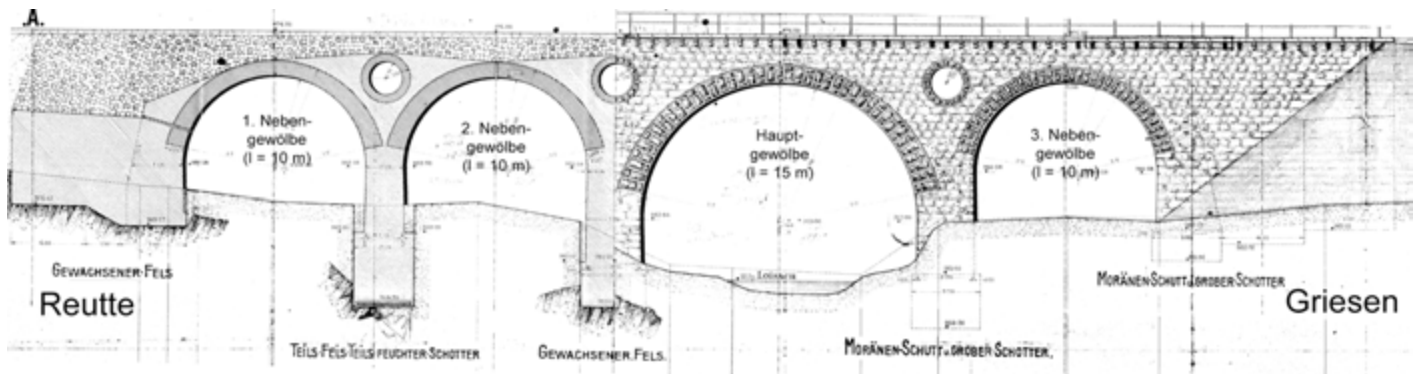


Bild 3
Loisach-Viadukt –
Längsschnitt und Ansicht

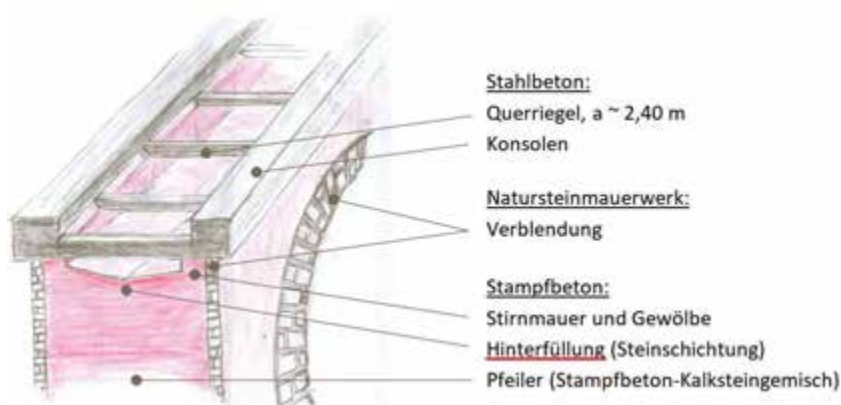
sind bis zur Unterkante der Konsolsteine ebenfalls aus Stampfbeton ausgeführt. Den oberen, seitigen Abschluss bilden die aufliegenden, entkoppelten Stahlbetonkonsolen mit der Geländerkonstruktion.

Bild 3 zeigt einen Ausschnitt des Ursprungsplans zum Loisach-Viadukt von 1913 mit Angaben zum Boden, qualitativen Bauwerksaufbau mit Bemaßung sowie zum Verlauf der Loisach.

2.2 Problemstellung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurde das Objekt aufgrund von verschiedenen Schäden saniert und ertüchtigt. Im Jahr 1970 wurden die Stahlbetonkonsol- und Randsteine auf den Stirnwänden erneuert. Dabei sind die Konsolen durch 2,40 m auseinanderliegende Querträger miteinander gekoppelt und auf den Bestandsstirnwänden auf einer Mörtelfuge gelagert (Bild 4). Dadurch sind die Konsolen vom restlichen Bauwerk entkoppelt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass über die Querträger auch Verkehrslasten direkt in die Stirnwände eingeleitet werden.

Bild 4
Isometrie des Stampfbetonquerschnitts mit
Stahlbetonkonsolen



Aufgrund von Erosion an der Uferböschung und der Unterspülung der Gewölbepfeilerfundamente entstanden Schäden am Bauwerk, die 1978 saniert wurden. Im Zuge dieser Arbeiten ist eine neue Stahlbeton-Flussrinne unter dem Viadukt hergestellt worden, um die Loisach zu regulieren und Fundamentunterspülungen zu vermeiden. Während der Entnahme von Kernbohrungen in den Pfeilern wurde bei allen vier ein totaler Spülwasserverlust festgestellt, was auf eine hohe Porosität, Kiesnester oder Risse schließen ließ. Zur Verbesserung des Gefüges erfolgte daher eine Verfüllungsinjektion mit Zementleim in den Pfeilern und Fundamenten sowie in den Gewölbe- und Seitenmauern (vgl. Bild 5).

Infolge einer undichten Abdichtung unter dem Oberbau konnte das Regen- und Schneeschmelzwasser unkontrolliert durch das Bauwerk sickern und beschädigte sowohl den Stampfbeton als auch den Mauerwerksmörtel durch Auswaschungen und Frostsprengungen. Aus diesem Grund musste im Jahr 1980 die Abdichtung erneuert werden. Dazu wurde der Oberbau zurückgebaut und auf der bestehenden Hinterfüllung eine 10 cm starke Unterbetonschicht mit einem Versiegelungsmörtel hergestellt.

Nachdem sich ein Längsriss zwischen Stirnwand und Gewölbobogen gebildet hatte (Bild 6) und Steinfragmente des Verblenders aus dem Mauerwerksverbund herausgefallen waren (Bild 7) wurde 2014 eine Sanierung des Natursteinmauerwerks veranlasst. Dabei sind die Verblenderkalksteine neu eingemauert und verfugt worden.

Da unklar war, wie die Materialkennwerte sowie Lagerungsbedingungen anzunehmen sind und ob

A photograph showing the interior of a large, arched tunnel under construction. The walls and ceiling are made of rough, grey concrete or stone, with visible cracks and uneven surfaces. Scaffolding and support structures are visible on the left side, and a yellow container is on the right. The floor is a flat, grey surface. The overall atmosphere is industrial and unfinished.



Tabelle 2 geschätzte Materialparameter, abgeleitet aus vorangegangenen Untersuchungen

Nr.	Material Bezeichnung	f_{ck} [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Schub- modul G [N/mm ²]	Querdehn- zahl μ [-]	Spez. Gewicht γ [kN/m ³]
M1	Stapfbeton Gewölbebogen	16	22500	9375	0,20	24
M2	Stapfbeton Pfeiler	16	22500	9375	0,20	24
M3	Stapfbeton Stirnwand	16	22500	9375	0,20	24
M4	Stahlbeton B225 Überbau und Kappen	11,9	26000	10800	0,20	25
M5	Bahndamm / Fels (Boden)		30000	11905	0,26	20 / 22
M6	Schotter (Oberbau)		500	217	0,15	20
M7	Natursteinverblander Kalkstein, dicht	≥ 30	80000		0,32	27
M8	Zementmörtel	10	8000	3333	0,20	20
M9	Natursteinmauerwerk	$\geq 11,33$	50000	22727	0,10	26,5

Loisachviadukts übernommen (Tabelle 2). Sie sollten durch Variation am FE-Modell anhand der Ergebnisse der später durchgeführten Systemmessungen angepasst werden.

Unter Bezugnahme auf frühere Einschätzungen wird angenommen, dass die Natursteinverblander dichter regionaler Kalkstein oder Dolomit sein müsste. Die Materialkennwerte des Natursteinmauerwerks werden mit der Mindest- und mittleren Druckfestigkeit R_S eines dichten Kalksteins angenommen (Tabelle 3).

3.2 Berechnungsgrundlagen

Die Berechnungen für die Gesamtstruktur beruhen auf der Annahme eines isotropen Materials für den Stapfbeton sowie des vorgesetzten, gekoppelten Natursteinmauerwerks und wurden mit dem Finite-Elemente-Programm RFEM der Firma Dlubal durchgeführt. Das Materialverhalten wurde durch eine programminterne linear-elastische Spannungs-Dehnungsbeziehung abgebildet (Bild 8). Die Berechnungsparameter zur Idealisierung des Stapfbetons, hier Beton mit einer Grenzzugspannung von $f_{ctmk} = 1,9 \text{ N/mm}^2$ waren:

$$f_{ck} = 16 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_{c2} = -2,0\text{‰}$$

$$\epsilon_{c2u} = -3,5\text{‰}$$

$$f_{ctmk} = 1,9 \text{ N/mm}^2$$

Das Natursteinmauerwerk »Natursteinverblander im Mörtelbett« dient bei diesem Bauwerk als Verkleidung der tragenden Struktur (Mantelsteinverkleidung). Aufgrund der nicht bekannten Stein- und Mörtel Eigenschaften erfolgt die Analyse mit mittleren Stein- und Mörtel elastizitätsmodulen. Nach den Regelwerken [11] lässt sich der mittlere Mauerwerkselastizitätsmodul $E_M = 50.000 \text{ N/mm}^2$ aus anteiliger additiver Überlagerung des Stein-E-Moduls E_S und des Fugen-E-Moduls E_F bestimmen.

Mit Berücksichtigung der Stein- und Mörteldicke lässt sich aus der Stein- und Mörteldruckfestigkeit die Normdruckfestigkeit R_M des Mauerwerks ermitteln. Mit der Annahme einer Druckfestigkeit eines mittelfesten Zementmörtels und der Mindestdruckfestigkeit dichter Kalksteine und Dolomite nach [10] ergibt sich eine charakteristische Normdruckfestigkeit für das Natursteinmauerwerk von $R_{Mk} = 9,06 \text{ N/mm}^2$ [11]. Diese darf nach Ril 805.0203 [12] bei großen, gleichmäßig beanspruchten Gewölben um den Faktor 1,25 erhöht werden. Somit ergibt sich eine erhöhte charakteristische

Tabelle 3 Anhaltswerte der Steindruckfestigkeit verschiedener Steingattungen [10]

Steingattung	Raumgewicht	Druckfestigkeit, trocken			V_x	Druckfestigkeit, wassergesättigt			V_x
		min	max	mittel		min	max	mittel	
	kN/m ³	N/mm ²			-	N/mm ²			-
Granit	26 bis 27	87	211	140	0,16	53	200	130	0,24
Kalkstein, kristallin	27	43	153	110	0,18	74	141	100	0,16
Kalkstein, dicht	25 bis 27	35	206	110	0,32	34	194	90	0,34
Sandstein	21 bis 26	28	168	80	0,24	13	140	70	0,29
Konglomerat	21 bis 26	24	102	60	0,30	18	128	50	0,39

ristische Normdruckfestigkeit des Natursteinmauerwerks $R_{(Mk,1.25)} = 11,33 \text{ N/mm}^2$.

Die nach der Bauwerksdokumentation verwendeten Baumaterialien für das Gewölbetragerwerk sind:

Stampfbeton char. Druckfestigkeit bis $16,00 \text{ N/mm}^2$
[char. Grenzzugspannung: $1,9 \text{ N/mm}^2$]

Natursteinmauerwerk char. Druckfestigkeit ab $11,33 \text{ N/mm}^2$
[char. Grenzzugspannung: $0,1 \text{ N/mm}^2$]

Ein Vergleich mit der Önorm zeigt [13], dass der Stampfbeton ungefähr eine Festigkeit zwischen einem C16/20 und C20/25 aufweist. Für die Finite-Elemente-Eingabe wurde ein Beton mit einem E-Modul von 22.500 N/mm^2 verwendet (Tabelle 2), der anhand der experimentell ermittelten Messwerte kalibriert wurde.

3.3 Finite-Element-Modell

Für die Modellierung wurden Scheibenelemente gewählt [14]. Mit vergleichsweise geringem Aufwand lässt sich der flächige Lastabtrag in Haupttragrichtung mit nichtlinearen Materialgesetzen simulieren, wobei die unterschiedlichen Steifigkeiten der Haupttragelemente berücksichtigt werden (Oberbau, Gewölbering, Pfeiler und Boden). Die Krümmung des Bauwerks ($R = 200 \text{ m}$) wurde dabei zwar im Modell vernachlässigt, die Auswirkungen (Zentrifugalkräfte) konnten durch das Einführen horizontaler Fliehkräfte im Nachweis gleichwohl berücksichtigt werden.

In Bild 9 ist die Isometrie des Schalenmodells mit den entsprechenden Flächendicken gemäß Tabelle 3 nach Farben sortiert dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Fläche der mittragenden Stirnwand des Oberbaus aufgrund der Berechnung in Schalenelementsystemachse mittig angesetzt wird, sodass eine ungünstigere Spannungsverteilung in den Stampfbetonrandfasern erwartet wird.

Das Verblendmauerwerk wird als homogener Werkstoff abgebildet, da eine Mikromodellierung von Steinen und Lagerfugen zu aufwendig und nicht notwendig ist (Bild 10). Aufgrund der Vernachlässigung vorhandener Diskontinuitäten wird mit mittleren homogenen Spannungen, E-Modulen und Dehnungen im Mauerwerk gerechnet. In Bild 10 ist ein Ausschnitt des FE-Modells mit Mauerwerksverblendung (hellblau) und Kontaktfuge (rot) abgebildet.

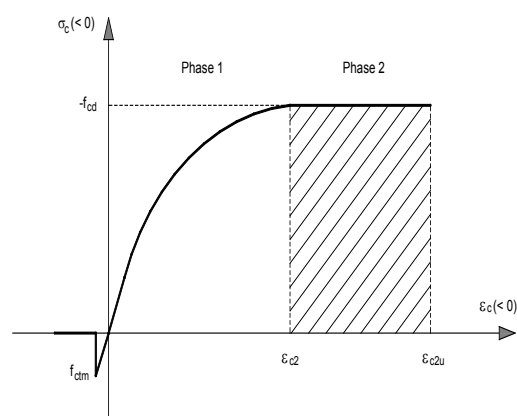


Bild 8
Materialgesetz Stampfbeton, Beziehung Spannung zu Dehnung

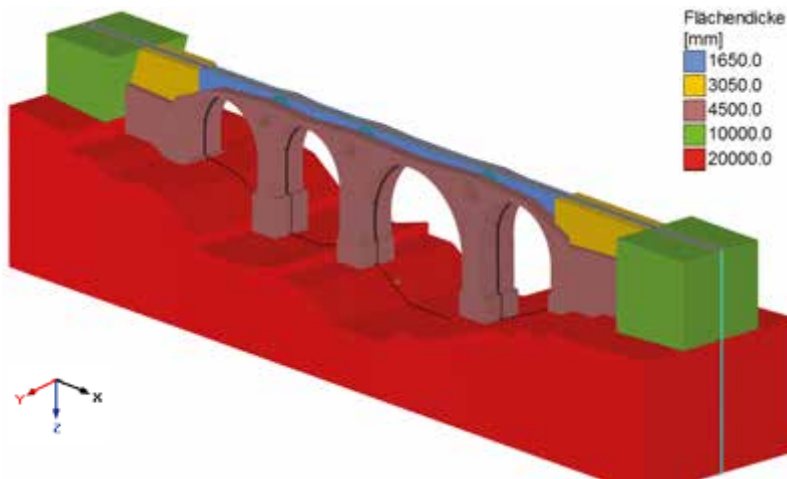


Bild 9
Isometrie der Konstruktion;
Flächendicken nach Farben
sortiert

4 Systemmessungen

4.1 Versuchsprogramm

Die Messungen der Bauwerksreaktionen konnten während der Zugüberfahrten im Regelbetrieb, bzw. aus Loküberfahrten (1 × Lok der Baureihe 1016, Bilder 2 und 11) durchgeführt werden. Position und Geschwindigkeit wurde über Lichtschranken und Dehnungsmessstreifen am Gleis bestimmt. Das Versuchsprogramm der Loküberfahrten umfasste:

- Schnelle Überfahrten ($v \sim 60 \text{ km/h}$)
- Langsame Überfahrten ($v \sim 10 \text{ km/h}$)
- Bremsen auf der Brücke ($v < \sim 55 \text{ km/h}$)
- Anfahren auf der Brücke ($v < \sim 19 \text{ km/h}$)

4.2 Messtechnik

Es wurden am Bauwerk mehrere Bauteilreaktionen online gemessen und zeitgleich am Monitor als Reaktions-Zeit-Diagramm dargestellt. Grundsätzlich besteht ein Messkonzept aus einer Mischung von Sensoren, die einerseits das globale Tragver-

halten (Durchbiegung/Setzung) und andererseits lokale Strukturveränderungen (Dehnungen, Ablösungen, Risse) aufzeichnen können. Zur Messwertverarbeitung mit Messraten von 20 Hz und 300 Hz dienten Messanlagen »X-Box« und ein Notebook zur simultanen grafischen Darstellung und Speicherung.

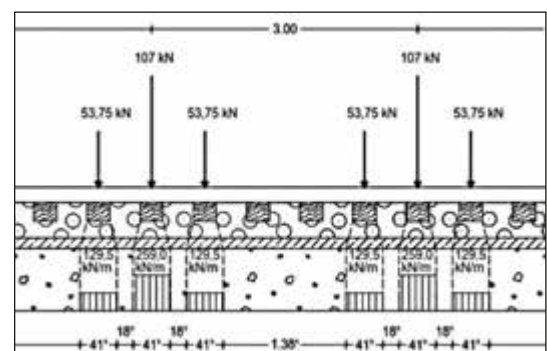
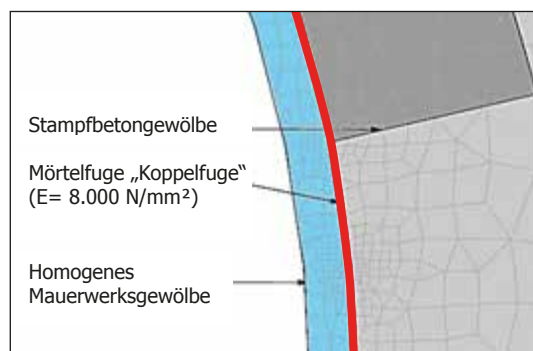
Vertikale Wegmessung: Die vertikale Verschiebung des Gewölbescheitels konnte im Hauptgewölbe nach dem Extensometerprinzip durch einen induktiven Wegaufnehmer WT 10 in Brückenachse relativ zum Boden gemessen werden (Schrägseilabhängiger Messstelle 48, Bild 12). Der Messbereich beträgt $\pm 10 \text{ mm}$ bei einer reproduzierbaren Auflösung unter Baustellenbedingungen von ca. $0,01 \text{ mm}$. Der gleiche Sensor kam im Nebengewölbe (Seite Griesen) zum Einsatz (Messstelle 43, Bild 12) und am Hauptpfeiler (Seite Griesen), um seine Setzungen zu bestimmen (Messstelle 46, Bild 12).

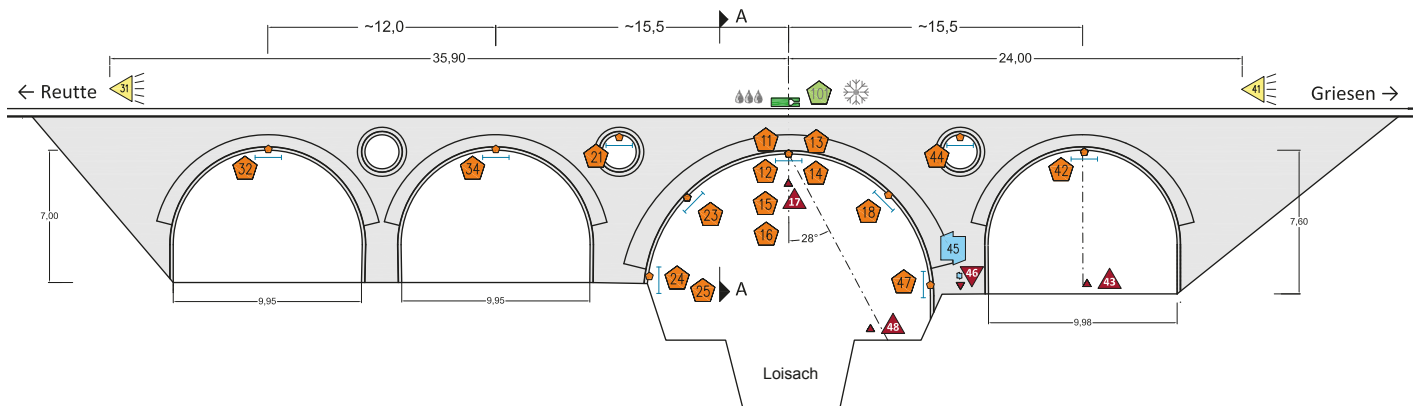
Beschleunigungsaufnehmer: Zum Einsatz kam für die Messstelle 45 (Bild 12) ein Piezo-Schwingungsaufnehmer KB 12VD (MMF, Frequenzbereich 3... 100 Hz), der keine Nullpunktverschiebung bei Temperaturveränderung aufweist. Mit den Sensoren sollten über Integration die vertikalen Verschiebungen des Pfeilers während der Zugüberfahrten abgeschätzt werden.

Integrale Dehnungsmessung: In Hauptgewölbe, Nebengewölben und den Spargewölben wurde die Mauerwerksdehnung im Scheitel (Messstelle 11, 12, 15, 16, 21, 32, 34, 42 und 44), Viertelpunkt (Messstelle 18 und 23) und am Kämpfer (Messstelle 24, 25 und 47) in Brückenachse und Gewölbering (Bild 12) mit induktiven Wegaufnehmern WT 5/WT 10 durch integrale Dehnungsmessung (Beziehung $\epsilon = \Delta l / l$) ermittelt. Zusätzlich ist im Scheitel

Bild 10
Idealisierung des Verblenden-
mauerwerks im FE-Modell

Bild 11
Lastbild (Achslasten und
-abstände) eines Drehgestells
der Triebfahrzeugreihe 1016
($L = 19,0 \text{ m}$; $G \sim 85 \text{ t}$)





des Hauptgewölbes die Dehnung des Stampfbetons in Brückenachse durch eine »Tandemmessung« Messstelle »ET« berechnet worden (aus Messstelle 13 und 14, Bild 13).

Differenzmessung: Im Hauptgewölbescheitel wurde mit einem Wegaufnehmer WT 5 (Messstelle 17, Bild 13) die Differenzverschiebung zwischen dem Stampfbeton und dem vorgesetzten Mauerwerk gemessen, um den Verbund bzw. das Ablösen der Koppelfuge zu analysieren.

Umweltbedingungen: Die Umweltbedingungen konnten ebenfalls bestimmt und in die Messprotokolle aufgenommen werden (Temperatur etwa 0 bis 5 °C; relative Luftfeuchte etwa 50 bis 66 %).

5 Messergebnisse

5.1 Messwertanalyse

Aus den Reaktions-Zeit-Kurven ließ sich direkt entnehmen, dass

- das Verformungsverhalten (Überbau/Gründung) vorwiegend linear-elastisch war,
- die Verformungen unter den rechnerisch prognostizierten Werten lagen,
- das vorgesetzte Mauerwerksgewölbe durch Verformung des Stampfbetongewölbes am Lastabtrag beteiligt ist (Messstelle 17, Bild 13),
- sich die gemauerten Stirnmauern durch die nachträglich eingebauten quer verlaufenden Stahlbetonriegel am Lastabtrag beteiligen (im Besonderen der südliche Rand = Außenradius). Hier ist ggf. wieder eine Ringrissbildung zwi-

schen dem Stirnmauerwerk und dem Mauerwerksgewölbe zu erwarten.

Vorberechnungen hatten ergeben, dass sich die Mauerwerksschale im Scheitel vom Stampfbetongewölbe lösen kann. Die zu erwartenden Differenzverformungen bei einer Loküberfahrt betrugen $\Delta f \sim 0,006$ mm. Der dafür installierte Sensor zeichnete zwar Verformungen in dieser Größenordnung auf, am Messkurvenverlauf war jedoch ersichtlich, dass es sich eher um eine Schwingung als um eine reale Verschiebung handelte.

5.2 Modellkalibrierung und Bemessung

Die Vorberechnungen auf der Grundlage der angenommenen Materialparameter (Tabelle 2) zeigten bereits gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Bauwerksreaktionen (Tabelle 4). Die Differenz zwischen der berechneten Verformung in Feldmitte der Gewölbeöffnung zu der gemessenen Verformung sowie der Dehnungen wurde dabei in Anbetracht einer Modellvereinfachung (Ansetzen der Stirnwand des Oberbaus in der Schwerachse des Schalenmodells ohne Berücksichtigung der

Bild 12
Messstellenplan
(Brückenansicht)



Bild 13
Messstellen im Gewölbescheitel
des Hauptbogens

Tabelle 4 Vergleich der experimentell gemessenen Extremwerte mit der Finiten Elemente Analyse










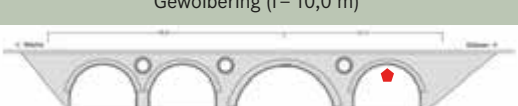
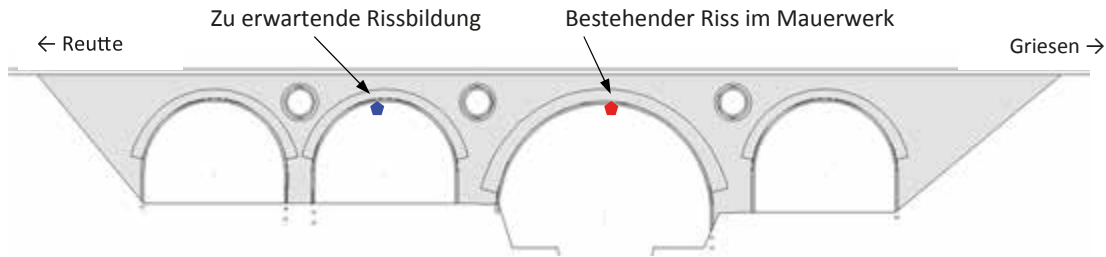
Nr	Information	Bauteil	Ort	Messung	FE _{Schale} $\varphi = 1,0$	FE _{Schale} $\varphi = 1,14$ $\varphi = 1,20$
48	Vertikalverschiebung [mm]	Hauptbogen Gewölbescheitel		0,025	0,078	0,083
12	Dehnungen Mauerwerk [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hauptbogen Gewölbescheitel		4,3	4,3	4,9
ΔT	Dehnungen Beton [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hauptbogen Gewölbescheitel		1,5	2,6	2,9
25	Dehnungen Mauerwerk [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hauptbogen Kämpfer Gewölbering		-3,5	-5,6	-6,1
24	Dehnungen Mauerwerk [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Hauptbogen Kämpfer Stirnwand		~ -1	3,4	3,8
32	Dehnungen Mauerwerk [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Nebenbogen Gewölbescheitel		2,0	2,2	2,8

Tabelle 5 Bereiche der zu erwartenden Rissbildung für das Lastmodell E4 (η -Verkehrslast-Werte)

Lastmodell [10]	v [km/h]	Ort	max. Zugspannungen im Gewölbering [N/mm ²]	η -Verkehrslast-Werte für Grenzzugfestigkeit
E4	80	Gewölbering ($l = 10,0$ m) 	1,1	2,50
E4	80	Gewölbering ($l = 10,0$ m) 		1,90
E4	80	Gewölbering ($l = 15,0$ m) 		1,33
E4	80	Gewölbering ($l = 10,0$ m) 		2,65

**Bild 14**

Erwartete Rissbildung bei erhöhter Beanspruchung durch Verkehrslasten

Hinterfüllung) als ausreichend genau betrachtet, sodass der Tragsicherheitsnachweis konservativ geführt wird.

Für die abschließende Beurteilung und Einstufung wurden die maßgebenden Belastungen in Lastkombinationen zusammengefasst, während die Spannungszustände vom Programm nichtlinear nach Theorie II. Ordnung ermittelt wurden. Der Spannungsnachweis ließ sich für das Lastmodell E4 erfolgreich führen. Anschließend wurden iterativ die Verkehrslasten so lange weiter gesteigert, bis die Grenzzugspannung $f_{ctmd} = f_{ctmk} / \gamma_c = 1,9 / 1,8 = 1,1 \text{ N/mm}^2$ im Stampfbeton erreicht wurde. Dadurch wurde einerseits die weitere Tragreserve sichtbar und andererseits ablesbar, wo im Restnutzungszeitraum Rissbildung zu erwarten ist (Tabelle 5). Der η -Wert gibt an, um wieviel die Verkehrslast (Lastmodell E4) theoretisch noch bis zur Rissbildung im Stampfbeton in den untersuchten Gewölben gesteigert werden kann. Dieser liegt auf der sicheren Seite, da die Tragfähigkeit der Brücke noch höher liegt. Die max. Traglast wird erst bei Ausbilden einer Gelenkkette bzw. Überschreiten der aufnehmbaren Druckspannungen erreicht.

5.3 Schlussfolgerung

Das Verformungs- und Tragverhalten der Stampfbetongewölbebrücke konnte in einem 2D-FE-Schalenmodell nachgebildet werden, indem das Rechenmodell anhand der experimentell ermittelten Bauwerksreaktionen aus Überfahrmessungen angepasst und kalibriert wurde. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich das Verblendmauerwerk am Lastabtrag beteiligt, das Bauwerk steifer ist als angenommen (mittragende Wirkung der Hinterfüllung) und die nachträglich eingebauten quer verlaufenden Stahlbetonriegel Lasten in die Stirnmauern einleiten.

Die Berechnungen erfolgten mit den ungünstigsten Lastmodellen E4 nach ORN 24008, Tabelle B.1 [10]. Sie ergaben, dass die Stampfbetongewölbebrücke unter den angenommenen Bedingungen eine ausreichende Tragsicherheit für das Lastmodell E4 nach ORN 24008 bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h besitzt. Aufgrund der geringen Tragreserve (η -Werte) wurde folgende Nutzung vorgeschlagen:

- Regelhaft: Lastmodell D4 bei einer maximalen Geschwindigkeit von 80 km/h
- In Ausnahmen (z. B. Schwertransport): Lastmodell E4 bei einer maximalen Geschwindigkeit von 80 km/h

Dabei ist bei wiederkehrenden Bauwerksinspektionen ein besonderes Augenmerk auf eine sorgfältige Gleishaltung und auf Risse zu richten. Querrisse treten voraussichtlich zuerst im Hauptgewölbe und im zweiten Nebengewölbe »Reutte« auf (Bild 14). Bei fortschreitendem Rissbild (Risszuwachs) kann es zu Lastumlagerungen im System kommen. Sollte im Rahmen der regelmäßig wiederkehrenden Bauwerksinspektion eine deutliche Zunahme vorhandener oder neuer Risse beobachtet werden, kann mit einer erneuten Systemmessung das Ausmaß der Bauwerksveränderung festgestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird an einem Beispiel gezeigt, wie Systemmessungen die rechnerische Beurteilung von Bestandsbauwerken mit komplexem Tragverhalten unterstützen können. Das Loisachviadukt, eine mit Naturstein verkleidete Stampfbetonbrücke, wurde in den letzten 50 Jahren mehrfach saniert und u. a. mit Stahlbetonkonsolen ergänzt. Die Tragfähigkeit und insbesondere die Beteiligung des Verblend-

natursteins am Lastabtrag waren völlig unklar. Das Bauwerk wurde messtechnisch so ausgestattet, dass die Bauwerksreaktionen im Stampfbeton und Verblendmauerwerk aufgezeichnet werden konnten, um ein Finite-Element-Modell an den Ergebnissen zu kalibrieren. Es zeigte sich, dass sich das Verblendmauerwerk am Lastabtrag beteiligt, das Bauwerk steifer ist als angenommen (mittragende Wirkung der Hinterfüllung) und nachträglich eingebaute Stahlbetonquerriegel Lasten in die Stirnmauern einleiten. An dem verbesserten Rechenmodell wurden anschließend alle notwendigen Nachweise geführt, so dass Empfehlungen für die zulässigen Streckenlasten ausgesprochen werden konnten. Zusätzlich konnten über iterative Laststeigerungen mögliche Schwachstellen identifiziert werden, die bei wiederkehrenden Bauwerksüberprüfungen vorrangig überwacht werden sollten.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt allen Projektbeteiligten, die mit ihrem Engagement und der konstruktiven Zusammenarbeit wesentlich zum Gelingen der komplexen Aufgabe beigetragen haben. Besonderer Dank gilt dem Arbeitstrupp der ÖBB AG, der uns immer zuverlässig und tatkräftig bei unseren in-situ-Messungen unterstützt.

Literatur

- [1] Gorning, M.; Michelsen, C.; Pagenhardt, L.: DIW Wochenbericht 1+2. 87. Jahrgang. DIW Berlin, 2020. ISSN 1860-8787 (online)
- [2] Gutermann, M.; Schröder, C.; Böhme, C.: Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover. Bautechnik 95 (2018), S. 477–484 – doi:10.1002/bate.201800018
- [3] Bolle, G.; Schacht, G.; Marx, S.: Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung,

- Teil 1 und 2. Bautechnik 87 (2010) 11 | 12, S. 700–707, 784–789
- [4] Gutermann, M.; Schröder, C.: 10 Jahre Belastungsfahrzeug BELFA. Bautechnik 88 (2011) 3, S. 199–204
- [5] Gutermann, M.; Gersiek, M.; Löschmann, F.; Patrias, M.: Der Löwenhof in Dortmund: Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken, Ernst & Sohn, Bautechnik Ausgabe 1/2018
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Richtlinie für Belastungsversuche an Betonbauwerken. Berlin: Beuth, Entwurf 2019-08.
- [7] Manleitner et al.: Belastungsversuche an Betonbauwerken. In: Beton- und Stahlbetonbau 96, 2011, Heft 7, S. 489
- [8] DIN EN 1990 (2010-12): Eurocode 0 – Grundlagen der Tragwerksplanung, Anhang D (informativ)
- [9] DIN EN 1992-1-1 (01.2011): Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Kapitel 2.5
- [10] ONR 24008 – Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Eisenbahn- und Straßenbrücken. Wien, 2006: Österreichisches Normungsinstitut.
- [11] UIC-Kodex 778 – 3 – Empfehlungen für die Bewertung des Tragvermögens bestehender Gewölbebrücken aus Mauerwerk und Beton. Internationaler Eisenbahnverband, 01.07.1995
- [12] Ril 805.0203 – Grundlagen der Bewertung von Gewölbebrücken, Unterbauten und Gründungen. Frankfurt am Main: DB Netz AG, 2010
- [13] Krapfenbauer: Bautabellen 17. Ausgabe. Jugend & Volk. Wien 2010, S. 579 ff.
- [14] Wasjuta, Andreas: Numerische Modellierung einer Stampfbetonbogenbrücke, die mit Naturstein verblendet ist. Masterthesis, Hochschule Bremen, 29.08.2017, unveröffentlicht

Bildnachweis

Bilder 1, 2, 4, 6, 7, 13, 14: Marc Gutermann
 Bilder 3, 5, 11: Konstantin Tiefenthaler
 Bilder 9, 10, 12: Andreas Wasjuta

Untersuchungen zur Sicherung eines Natursteinmauerwerks an einer denkmalgeschützten Autobahnbrücke



Die Autobahnbrücke »Talbrücke Höllenbach« in Remscheid wurde in den Jahren 1936 bis 1938 als Bogenbrücke erbaut, ist mehrere hundert Meter lang und an ihrer höchsten Stelle etwa 60 Meter hoch. Die Bögen der Brücke wurden aus Mauerziegelmauerwerk, die Fassaden aus Naturwerksteinmauerwerk errichtet. Die Brückenpfeiler bestehen aus einem Stampfbetonkern und einem äußeren Werkstein-Schalenmauerwerk. Neben dem Bogenmauerwerk wies das Naturwerksteinmauerwerk erhebliche Schäden auf und hatte sich von dem Kernmauerwerk der Bogenbrücke bzw. dem Stampfbetonkern der Pfeiler gelöst.

Axel Dominik
Pascale Dominik

Die Autobahnbrücke »Talbrücke Höllenbach«, errichtet als Mauerwerkbogenbrücke, sollte denkmalgerecht instandgesetzt werden. Sie wies erhebliche sichtbare Schäden auf und war im Fahrbahnbereich umzubauen.

Die Brücke wurde in den 1930er Jahren als 2 mal 2 spurige Autobahnbrücke errichtet (Bild 1). Die Bauzeit dauerte weniger als 3 Jahre. Aufgrund des Zeitdrucks, der beim Bau dieser und einer zeitgleich gebauten Bogenbrücke herrschte, mussten die Brücken mit unterschiedlichen künstlichen und natürlichen Mauerstein-, Beton- und Mörtelarten errichtet werden. Dies bedeutete die Zulieferung von unterschiedlichen Natursteinarten aus verschiedenen Steinbrüchen und die Verwendung von zum Teil veränderten Bindemittelsystemen zur Herstellung der Mauermörtel sowie verschiedener Betonarten.

Aus dieser Situation heraus und aufgrund der Nutzungsart wird deutlich, dass baustoffspezifisch unterschiedliche Prozesse, auch durch Umwelteinflüsse »begünstigt«, zu einer Beanspruchung der Brücke und zur Bildung von verschiedenartigen, schädigenden Stoffen geführt haben.

Aus diesen Erkenntnissen werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgeleitet, die notwendig sind, um die Bestandsbauten, die insbesondere während der Jahrhundertwende des 19. und 20. Jahrhunderts u. a. mit hüttenessand- bzw. hütten-schlackenhaltigen Mörteln und Betonen errichtet wurden, erhalten zu können.

Bild 1
Talbrücke Höllenbach,
Westansicht (Neubauseite)



Grundsätzlich ist bei der Konzeptentwicklung von Sicherungsmaßnahmen an Natursteinmauerwerk auf die Auswahl von speziellen Mörteln und deren Untersuchungen einzugehen. Diese wurden im Labor und am Objekt im Rahmen von Probeflächen und Eignungsversuchen in Abstimmung mit den Beteiligten untersucht. Mit Vertretern der Denkmalpflege erfolgte eine Absprache hinsichtlich Ausführungsart, Materialeigenschaften und Einfärbung des Instandsetzungsmörtels.

1 Brückenbau und Brückenkonstruktion

Die Brückenfassaden sind aus einem Natursteinmauerwerk errichtet worden. Dieses Natursteinmauerwerk stellt eine Art Verblendung dar, die über Verzahnungen und schmiedeeiserne Anker mit der Tragkonstruktion, die bei den Brückenpfeilern aus Beton besteht, verbunden ist. Im Bereich der Gewölbe wurde das Natursteinmauerwerk in Verzahnung mit dem Mauerziegelmauerwerk errichtet. Neben Grauwacke kamen auch Aachener Blaustein und andere Natursteinarten für das »Verblendmauerwerk« zur Anwendung (Bild 3).

Bautechnisch sind offenbar Holzlehren aufgestellt worden, die neben der Ausrichtung des Mauerwerks wohl auch als »leichter« Personenschutz dienten, bevor das Fassaden-Natursteinmauerwerk aufgemauert wurde. Nachdem mehrere Lagen des Natursteinmauerwerks errichtet waren bzw. während des Aufmauerns der Natursteinschale ist dann Beton hinter die Natursteinschale eingefüllt wor-

den. Der Betonierdruck auf die Natursteinschale wurde durch eine gegenseitige Verspannung der Holzlehrenkonstruktion aus »Rödeldrähten« aufgenommen. Solche Drähte waren in den untersuchten Bereichen zwar stark korrodiert aber teilweise noch vorhanden.

Mit dieser Bauweise waren ein stetiger Baufortschritt und ein mehr oder weniger stabiler Verbund zwischen tragendem Betonkern und Natursteinmauerwerk gewährleistet. Allerdings waren Ausblühungen und Aussinterungen am Mauerwerk nicht vermeidbar (Bilder 4 und 27).

Der Herstellungsprozess eines solchen Mauerwerkes ist an den Pfeilern, wo das Natursteinmauerwerk als eine Art »Schalungsmauerwerk« fungiert und der Pfeilerkern mit Beton gefüllt wurde, gut erkennbar (Bild 2).

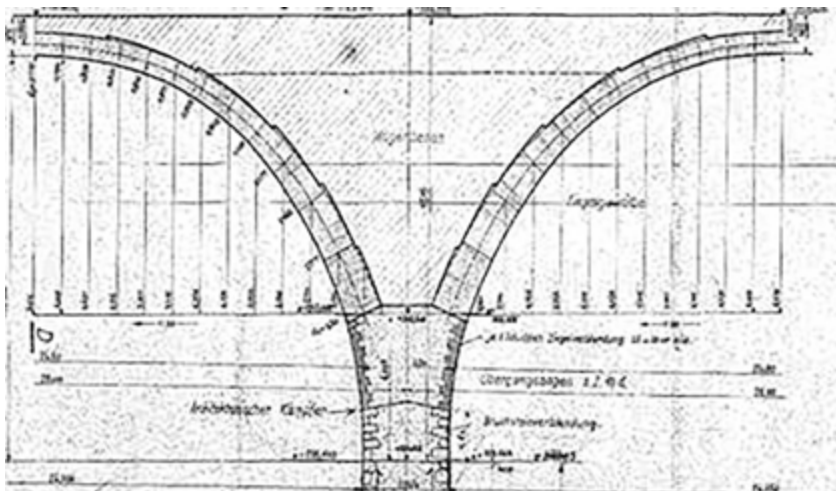
Die Brückenbögen bestehen bis auf die Fassadenflächen aus Mauerziegelmauerwerk mit einer Art Aufbeton als »Füllbeton«. Für das Ziegelmauerwerk wurden unterschiedliche Mauerziegelarten verwendet. Die Bogenhöhe (Gewölbedicke) ist tragfähigkeitsbedingt im Kämpferbereich deutlich dicker (etwa 1,50 Meter) als im Scheitel, wo die Bogenstärke etwa auf rd. 0,80 Meter abgemindert ist. Diese unterschiedlichen Mauerwerksdicken zeichnen sich in der Höhe der in der Fassade sichtbaren Naturwerksteinbögen nicht ab. Die Natursteinbögen zeigen im architektonischen Erscheinungsbild eine nahezu gleichmäßige Höhe.

Das Mauerziegel-Bogenmauerwerk wurde auf einer Schalung mit teilweise tief zurückliegenden (»hohl liegenden«) Fugen errichtet. Dies deutet darauf hin, dass eine nachträgliche Verfügung zwar vorgesehen war, aber nicht ausgeführt wurde. Die jahrelangen Beanspruchungen haben die zurückliegenden Mörtelfugen zusätzlich tiefgreifend geschädigt und den tragenden Gewölbequerschnitt reduziert. Die im Laufe der Jahre zunehmenden Beanspruchungen durch Feuchteintrag und Schadsalzanreicherungen haben zu einer weiteren Schädigung der Fugen in der Tiefe sowie der Mauersteine geführt.

Die Natursteinbögen wurden in Verzahnung mit dem Mauerziegelgewölbe errichtet und mittels einer Art »Blockverzahnung« kraftschlüssig miteinander verbunden.

Bild 2

Brückenkonstruktion;
Ausschnitt aus Plan
Nr. 20.160/15d/ 1937



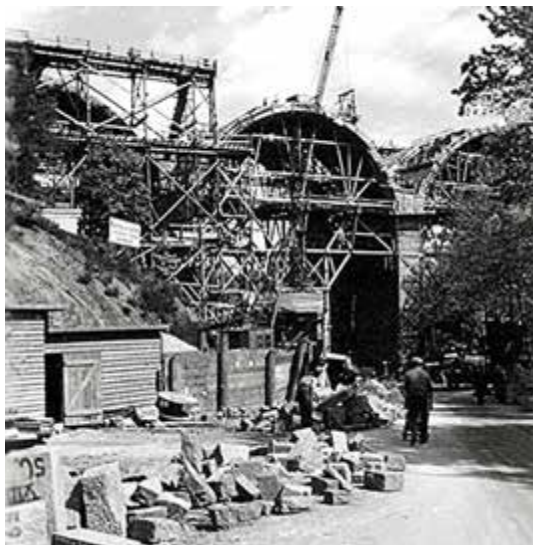


Bild 3
Brückenbaustelle, Arbeitsplatz zur Bearbeitung von Naturstein-Werksteinen



Bild 4
sichtbare Ausblühungen und Aussinterungen am Bogen der Brücke bereits während der Herstellung

Die 11 Bögen der Brücke wurden offensichtlich gleichzeitig, auf die Lastsituation hin abgestimmt, errichtet.

Die Anfängerbereiche zwischen den gemauerten Gewölben sind offenbar mit Stampfbeton (»Magerbeton«) bis zur Höhe der Fahrbahnplatten (bis über den Gewölbescheitel) eingebaut worden.

2 Aufgabenstellungen und Untersuchungen

Der heutige Zustand der Brücke stellte sich so dar, dass die Natursteinbögen extreme Schäden aufwiesen und Teile bereits mit Netzen und Drahtputzgeweben gesichert worden waren.

Insbesondere das Gewölbeleibungsmauerwerk wies extreme Ausblühungen und Schäden auf. Wie die Untersuchungen ergaben, war das Mauerwerk sehr stark durchfeuchtet und mit Schadsalzen durchsetzt. Das Natursteinfassadenmauerwerk wies ebenso wie das Mauerziegelmauerwerk der Gewölbe tiefgreifende Risse und Schalenbildungen auf (Bilder 4 bis 8).

Die Brücke wurde durch die zunehmende Verkehrs- und Streusalzbelastung, aber auch durch ihre exponierte Lage im Laufe der Jahre extrem stark beansprucht.

Deutlich sichtbare Ausblühungen sind bereits in der Entstehungszeit der Brücke, insbesondere an

den Oberflächen der aus Mauerziegeln gemauerten Gewölbebögen (Gewölbeleibung) sowie teilweise auf den Natursteinfassaden der Pfeilermauerwerke zu erkennen (Bild 4). Die Baustoffauswahl sowie die Ausführungsart und die während der Errichtung der Brücke auf das Bauwerk wirkenden Witterungseinflüssen (u. a. Niederschlagswasser) haben zu diesen Ausblühungen und Auslaugungen geführt.

In der Folgezeit war die Brückenkonstruktion weiteren Einflüssen ausgesetzt. So haben die herrschenden Umwelteinflüsse (Beanspruchung durch z. B. schwefelige Säure sowie Kohlendioxid) dazu beigetragen, dass Bindemittelbestandteile im Mörtel und Beton umgewandelt wurden und sich u. a. vermehrt leichtlösliche Sulfatverbindungen gebildet haben.

Überlagert bzw. gefördert wurden diese zusätzlichen baustoffschädlichen Schadstoffbildungen durch den Eintrag von erhöhten Chloridmengen aus dem Streusalz sowie durch das in die Brückenkonstruktion eindringende Niederschlagswasser. Durch Frost-Tau-Salz-Wechselbeanspruchungen ist das gesamte Brückenmauerwerk so stark geschädigt worden, dass dringender Handlungsbedarf bestand.

Die Schäden sind insgesamt neben den gewählten Baustoffen, der exponierten Lage und der Umweltbelastung auch auf Frost-Tau-, aber insbesondere auf Frost-Tau-Salz-Wechselbeanspruchungen sowie Korrosionsprozesse und chemisch-mineralogische Umwandlungsprozessen zurückzuführen.



Bild 5
sichtbare Ausblühungen und
Aussinterungen an der
Gewölbeleibung der Brücke

Bild 6
im Mauerziegelbogen
verzahnter Natursteinbogen
mit extremen Rissen;
offene Fugen im Mauerwerk

Bild 7
Schäden am Mauerziegel-
mauerwerk. Extrem starke
Aussinterungen am
Gewölbemaerwerk

Bild 8
Natursteinfassadenmauerwerk
mit offenen Fugen. Sicherungs-
maßnahmen gegen herunter-
fallende Brückenteile mit
Drahtgeweben und Netzen im
Bogenbereich.

Die Prozesse, die insbesondere zu den Veränderungen am Mörtel und Beton geführt haben, sind noch nicht vollständig bekannt.

3 Allgemeine Anforderungen

Einer der grundsätzlichen Schritte für die Instandsetzung und den Erhalt einer solchen Brücke besteht darin, für einen wirksamen Feuchteschutz oder regulierten Feuchtetransport zu sorgen. Sie muss von oben gegen eindringendes Niederschlags- und salzhaltiges Wasser abgedichtet sein. Eine solche Abdichtung führt langfristig zu einer Feuchtereduzierung (»Trocknung«) im Bauwerk, aber auch dazu, dass sich die vorhandenen Schadstoffe vermehrt im Bereich der Verdunstungszonen, sowohl im Innenbereich der Konstruktion in Hohlräumen als auch an den Bauteiloberflächen, anreichern und dort beanspruchend wirken. Es finden langandauernde, teilweise irreversible chemisch-mineralogische und physikalische Pro-

zesse statt, die aus den bisher vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen in ihrer Wirkung noch nicht genau abschätzbar sind. Sie haben aber einen erheblichen Einfluss auf die Instandsetzungsmaßnahmen bzw. die Auswahl der Instandsetzungsstoffe und damit auf die Dauerhaftigkeit (»Lebensdauer«) der Baukonstruktion.

Unter den genannten Gegebenheiten am Bauwerk kann kein derzeit bekanntes mineralisches Instandsetzungssystem langfristig funktionieren. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.

Eine zu diesem Zeitpunkt durchgeführte Instandsetzung kann nur als eine Zwischenlösung angesehen werden, welche regelmäßig instandgesetzt und gegebenenfalls u. a. oberflächennah (Verfugmörtel) überarbeitet werden muss. Daher ist es wünschenswert, die Instandsetzung solcher Bauwerke in mehreren, über Jahre zeitlich versetzten Schritten (Phasen) durchzuführen, um die Prozesse z. B. Feuchteabgabedauer, Formänderungsprozesse wie Kriechen und Feuchtedehnungen, chemisch-mineralogische Umwandlungsprozesse sowie physika-

lische und mechanische Eigenschaftsveränderungen wie z. B. Festigkeitsänderung, zu analysieren und zu berücksichtigen.

3.1 Allgemeine Anforderungen an die Instandsetzungsmörtel

Die Anforderungen an Instandsetzungsmörtel ergeben sich aus dem Bestand und Zustand des Bauwerkes, den inneren Beanspruchungen, die sich aus dem Bauwerk in feuchtetechnischer, chemisch-mineralogischer und physikalischer-mechanischer Sicht ergeben sowie aus den äußeren Beanspruchungen, die auf das Bauwerk einwirken.

Weiterhin fließen die Forderungen des Tragwerkplaners und der Denkmalpflege u. a. in die Mörtelauswahl ein. Wesentliche Punkte für die Anpassung der Mörtel Eigenschaften stellen darüber hinaus die Verarbeitungsart, die Auswahl der mit dem Mörtel in Verbund stehenden Materialien und die klimatischen Bedingungen der Umgebung dar.

Neben den physikalisch-mechanischen Eigenschaften müssen die eingesetzten Instandsetzungsmörtel in der Lage sein, Chloride bis zu einem gewissen Grad beim Erhärtungsprozess zu binden bzw. einzulagern. Die Mörtel müssen in feuchten bis sehr nassen Bauteilen aushärten und zu einer Stabilisierung der Konstruktion beitragen.

Die vorhandenen Bestandsmörtel, aber auch die neuen Mauer- bzw. Fugenspritzmörtel bieten dabei keinen bzw. nur einen bedingten Korrosionsschutz für im Bauwerk vorhandene bzw. einzusetzende Metallelemente. Hier betrifft dies die vorhandenen schmiedeeisernen Verankerungen der Natursteinfassaden und die »Rödeldrähte. Die Mörtel bieten u. a. auch deshalb keinen Korrosionsschutz für Betonbauteile, weil die puzzolanhaltigen Instandsetzungsmörtel meist sehr schnell karbonatisieren und in ihrer Alkalität deutlich niedriger sind als die von üblichen Betonen. Ein dauerhafter alkalischer Korrosionsschutz kann also durch die Mörtel bzw. eine mörteltechnologische Instandsetzung nur schwer erreicht werden.

Aus der Schädigung der bauzeitlichen schmiedeeisernen Anker und »Rödeldrähte« (Bild 9), die in den Fassaden der Brücke vorhanden sind, ergibt sich durch die ablaufenden Korrosionsprozesse ein

zusätzliches Schädigungspotential sowohl für die Konstruktion selbst als auch für die Mörtel. Diese Schadprozesse können mit den derzeitigen bekannten Instandsetzungsverfahren nicht gänzlich vermieden werden, zumal eine vollständige Entfernung der korrodierenden Teile nicht möglich ist.

Die Instandsetzungsmörtel sollten eine entsprechend hohe Druckfestigkeit aufweisen, in der Verformbarkeit aber dennoch an die Brückenmaterialien (z. B. Mauersteine) angepasst sein. Ähnlich wie bei einem Sanierputzsystem sollten sie zumindest in einer geringen Menge wasserdampfartig Feuchtigkeit auf- und abgeben können. Die Mörtel müssen, um diese Anforderungen zu erfüllen, u. a. ein bestimmtes Porenvolumen und eine entsprechende Porenstruktur haben und einen hohen Widerstand gegen Schadsalze aufweisen, da ein porenreiches Mörtelsystem zwangsläufig von innen heraus durch Schadsalze und Feuchtigkeit und den damit verbunden Prozessen sehr stark beansprucht wird.

Bereits Untersuchungen von [1, 6] haben gezeigt, dass der Widerstand solcher Mörtel- bzw. Bindemittelsysteme bei einem inneren Angriff deutlich geringer ist, als bei einem Angriff von außen (Bild 10). Der beim Anmischen des Mörtels eingestellte Wasser-Zementwert (w/z) bzw. Wasser-Bindemittelwert (w/b) kann für einen nach Norm hergestellten Mörtel ein Anhaltswert für die Porosität sein. Je poröser das System ist, umso stärker kann bei einem »empfindlichen Mörtelsystem« z. B. der Sulfatangriff und Frost-Tau-Wechsel (FTW) bzw. Frost-Tau-Salz-Wechsel (FTSW) wirken.

Die vorgenannten Anforderungen können – wie umfangreiche Untersuchungen gezeigt haben [1] – mineralische Mörtelsysteme nur bedingt erfüllen.

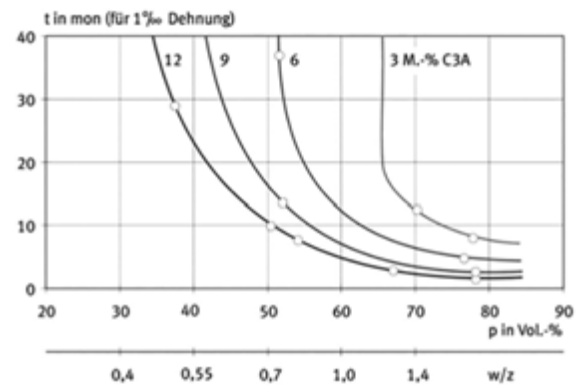
Das Beanspruchungspotential auf die Instandsetzungsstoffe wird insgesamt dann reduziert, wenn die Brücke einen »Ausgleichszustand« erreicht hat, bei dem der Feuchtegehalt deutlich gesenkt wurde und die Salze in der Brückenkonstruktion, soweit aufgrund der klimatischen Gegebenheiten der Umgebung überhaupt möglich, weitgehend »in Ruhe« sind. Gerade die Chloridverbindungen aus den Streusalzen fördern allerdings die Korrosion der Mörtel und Metallelemente, auch wenn puzzolanhaltige Mörtel im Zuge des Abbindeprozesses ein

Bild 9

stark korrodierter und im Querschnitt verminderter schmiedeeisener Anker aus dem Naturstein-Fassadenmauerwerk

Bild 10

Geschwindigkeit des Sulfatreibens in Abhängigkeit vom Zementsteinporenraum (p) bzw. Wasser/Zement-Wert (w/z) und vom C_3A -Gehalt des Zementes nach [1, 7]



bestimmtes Potential von Chloriden binden können. Diese werden aber evtl. durch die Karbonatisierung der Mörtel später teilweise wieder gelöst [1, 2, 3].

3.2 Tragwerksbezogenen Anforderungen und Anforderungen der Denkmalpflege

Das Mauerziegelmauerwerk und teilweise auch das Natursteinmauerwerk der Brücke wiesen z. T. tiefliegende und geschädigte Fugen auf. Zudem zeigten viele der Mauersteine Schäden. Die in das Natursteinmauerwerk im Zuge der Errichtung der Brücke eingesetzten schmiedeeisernen Maueranker waren nach der langen Standzeit und den Nutzungsbedingungen der Brücke z. T. so stark korrodiert, dass sie ihre konstruktive Funktion, die »Natursteinverblendschale« zu halten, nicht mehr erfüllen konnten (Bild 9).

Die Forderungen des Tragwerkplaners bezogen sich auf die konstruktive Instandsetzung, die eine neue kraftschlüssige, zug- und druckfeste Rückverankerung der Mauerwerkschale mit einer entsprechenden Hohlraumverfüllung hinter der Naturstein-Vorsatzschale beinhaltete.

Bezogen auf die Mörtelanwendungen müssen die Mörtel ihre konstruktive Funktion hinsichtlich Festigkeit und Verformbarkeit im Verbund zu der historischen Konstruktion erfüllen. So war z. B. im Pfeilerbereich sowie in der Fassade ein besserer Verbund zwischen Natursteinmauerwerk und der Tragkonstruktion aus Beton herzustellen.

Das Gewölbemauerwerk sollte nach Vorgabe des Tragwerkplaners möglichst im vollen Querschnitt

als Tragelement herangezogen werden. Dies bedeutete, dass alle Fugen möglichst vollfugig und kraftschlüssig so geschlossen werden sollten, dass die Druckfestigkeit ($f_{C,F}$) der Mörtel im Mittel mindestens 10 N/mm^2 über die gesamte Fugentiefe beträgt.

Darüber hinaus müssen die Instandsetzungsmörtel auf Grund der langandauernden Beanspruchung u. a. aus bauschädlichen Stoffen und feuchtebedingten Prozessen zusätzliche »Tragreserven« bzw. Festigkeitsreserven aufweisen.

Vertreter der Denkmalpflege wünschten darüber hinaus, dass die Fugen des Mauerwerks aus optischen Gründen dunkel eingefärbt und von der Mauerwerkoberfläche zurückliegend und oberflächlich rau ausgeführt werden sollten.

Weitere Grundanforderungen an die Mörtel waren:

- Der Verfugmörtel sollte vollfugig, gleichmäßig verdichtet, über die gesamte Fugentiefe teilweise über 10 cm eingebracht werden.
- Die Fugenoberfläche sollte entsprechend der Anforderungen der Denkmalpflege bearbeitbar sein.
- Die Mörtel sollten eine große Haftung zum Mörtelgrund aufweisen.
- Die Verarbeitung aller Mörtel sollte einfach und rationell erfolgen können.

Daraus ergaben sich komplexe Anforderungen an die Mörtel Eigenschaften und die Verarbeitungsverfahren, die im Rahmen der weiteren Mörtelformulierungen und Mörteluntersuchungen zu berücksichtigen waren.

Ein dauerhaft beständiges Standardmörtelsystem mit entsprechenden Untersuchungsnachweisen

war zum Zeitpunkt der geplanten Instandsetzung für diesen speziellen Anwendungsfall nicht bekannt.

4 Untersuchungen zur Mörtelauswahl

Nach Durchführung von Vorversuchen wurden in Abstimmung mit den Beteiligten zuerst mehrere Mörtelsysteme von verschiedenen Produktherstellern ausgewählt, die anhand von Eignungsversuchen an der Talbrücke hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Verarbeitungstechnik und den wesentlichen physikalisch-mechanischen Eigenschaften mit und ohne Verbund zum Mauerwerk bewertet wurden.

Diese Mörtel ergaben gute Ergebnisse in Hinblick auf die Verdichtung, Haftung und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften.

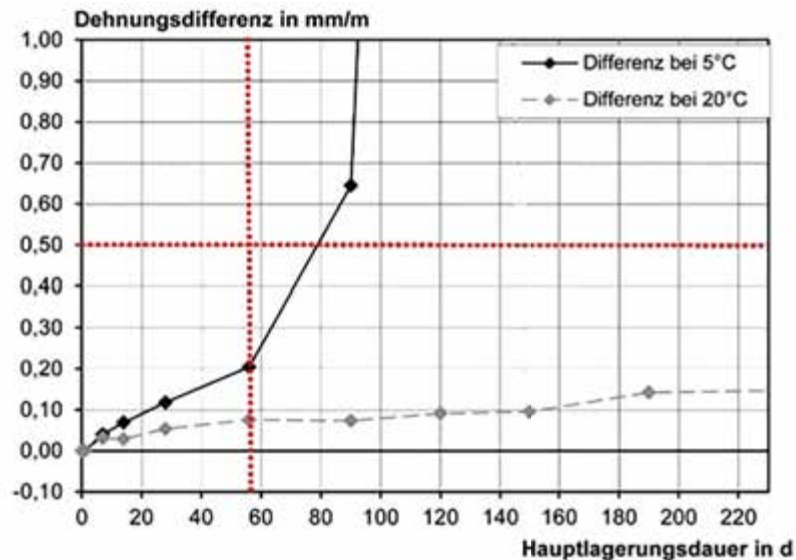
Die zwischenzeitlich im Labor durchgeführten Verträglichkeitsuntersuchungen zeigten in Hinblick auf den Sulfatwiderstand gemäß des sogenannten SVA-Prüfverfahrens nach einer Prüfdauer von 56 Tagen zwar ausreichende Ergebnisse. In Hinblick auf die Anwendung der Mörtel an der Brücke waren die Untersuchungsergebnisse zum Sulfatwiderstand aber noch nicht zufriedenstellend (Bild 11).

Mit entsprechenden neuen Mörtelformulierungen wurden weitere Verträglichkeitsuntersuchungen mit diesen Mörteln durchgeführt.

Diese sind u. a. mit speziellen Bindemittelsystemen hergestellt worden und wiesen nach einer Prüfdauer von etwa 90 Tagen einen höheren Sulfatwiderstand auf. Damit erfolgten weitere Eignungsversuche am Bauwerk.

Die Sulfatwiderstandsuntersuchungen wurden bis zur Vorlage der Nachuntersuchungsergebnisse der Eignungsversuche zeitlich parallel weitergeführt. Nach der Besichtigung durch Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Denkmalpflege wurden die nicht eingefärbten Mörtelsysteme aufgrund der hellen Farbgebung aus ästhetischen und optischen Gründen abgelehnt.

Die Mörtelsysteme sollten dunkel eingefärbt werden, was unter der Zugabe von entsprechenden Pigmenten erfolgte. Da die Zugabe von Pigmenten



zu einer Eigenschaftsveränderung der Mörtel führen kann [1], mussten mit diesen neu konzipierten, dunklen Mörteln zusätzliche Verträglichkeitsuntersuchungen durchgeführt werden.

Es sind drei ausgewählte Mörtelsysteme, die von ihren Eigenschaften her für die Anwendung an der Brücke als geeignet erschienen, von den Produktherstellern dunkel eingefärbt und zur Anwendung im Rahmen eines weiteren dritten Eignungsversuches und zur Untersuchung im Labor geliefert worden.

Die Rezeptierung der eingefärbten Mörtel basierte auf der Vorauswahl der nicht eingefärbten.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Pigmentzugaben nicht nur zu einer Eigenschaftsveränderung der Mörtel in Hinblick auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften führten, sondern auch einen Einfluss auf den Sulfatwiderstand der Mörtel haben.

Bild 11

Werkmörtel: Untersuchungen zum Sulfatwiderstand
Dehndifferenz $\Delta\epsilon_{su}$ zwischen Sulfatlagerung und Wasserlagerung in Abhängigkeit vom Prüfalter [1]

5 Eignungsversuche

5.1 Anlegen von Probeflächen

Ergänzend zu den Laboruntersuchungen wurden mehrere Eignungsversuche auch am Bauwerk durchgeführt.

Neben der Änderung der Farbgebung sollte auf Wunsch der Denkmalpflege auch die Oberflächenbearbeitung der Verfügmörtel verändert werden.

In Ergänzung zu den bereits durchgeführten Eignungsversuchen an der Brücke wurden deshalb vor Ort nach Vorgabe der Denkmalpflege wiederholt mit dunkel eingefärbten Mörtelsystemen am Gewölbemauerwerk aus Mauerziegeln und am Natursteinmauerwerk der Pfeiler Probeflächen angelegt.

Diese dienten dazu, die Oberflächengestaltung festzulegen, die Verarbeitungseigenschaften zu prüfen und nach einer längeren Standzeit am Bauwerk die wesentlichen Mörtel-Eigenschaftskennwerte sowohl im Verbund zum Mauerwerk als auch an entsprechenden, am Bauwerk hergestellten und gelagerten Prüfkörpern mit und ohne Verbund zum Mauerstein zu untersuchen.

Dazu wurden vor Ort am Bauwerk Prüfkörper mit dem gleichen Applikationsverfahren, wie es zur Verfüllung der Fugen verwendet wurde, hergestellt und untersucht.

Das Anlegen der Probeflächen und einige am Bauwerk hergestellte Prüfkörper sind in den Bildern 12 bis 20 dargestellt.

Die eingefärbten Mörtel wurden erneut in baupraktischen Verarbeitungsversuchen für die Trockenspritzmörtelverfugung, für das Vermauern von Steinen und in Vorversuchen auch für die Herstellung einer im Trockenspritzmörtelverfahren herzustellenden Mörtelausgleichsschicht getestet.

Bei der Verarbeitung im Trockenspritzmörtelverfahren

sind dem Mörtel zusätzlich spezielle Fasern u. a. zur Reduzierung von evtl. auftretenden Risse zugegeben worden.

5.2 Laboruntersuchungen

Für die Untersuchungen der wesentlichen Eigenschaftskennwerte der eingefärbten Mörtel wurden im Rahmen der Eignungsversuche Normprismen vor Ort sowie im Labor hergestellt. Am Bauwerk sind mit den Mauer- und Fugenspritzmörteln ebenfalls Normprismen (Bild 21), mit den Mauermörteln Zwei-Stein-Prüfkörper (Bild 22) sowie mit den Fugenspritzmörteln Zwei-Stein-Verbund-Prüfkörper nach dem ibac-1 Prüfverfahren [1, 8, 9, 10, 12] hergestellt worden.

Die Normprismen, Zwei-Stein-Prüfkörper und Zwei-Stein-Verbund-Prüfkörper lagerten vor Ort sieben Tage bei regelmäßiger feuchter Nachbehandlung. Bis auf die Mörtel, die in die Zwei-Stein-Verbund-Prüfkörper appliziert wurden, mussten die Mörtel aus den einzelnen Prüfformen ausgebaut und bis zur Prüfung im Labor unter Laborbedingungen nach Normbedingungen gelagert werden.

Zusätzlich sind nach einer längeren Standzeit Mörtelproben aus den Probeflächen mittels Bohrkernentnahme bzw. mittels Winkelschleifer entnommen worden.

Bild 12
Verfugung im
Spritzmörtelverfahren



Bild 13
Abtrag des überschüssigen
Mörtels



Bild 14
Mauerwerkoberfläche nach
dem Entfernen des über-
schüssigen Mörtels



Bild 15
Oberfläche nach dem
Abwaschen und Verstreichen
der Mörtelreste und Einbringen
eine Fugenoberflächen-
profilierung



Es muss beachtet werden, dass die ermittelten Eigenschaftskennwerte von vielen Faktoren abhängig sind. Dazu zählen u. a. neben der Prüfkörpergeometrie auch das jeweils angewendeten Prüfverfahren, die klimatischen Bedingungen der Umgebung, die im Mauerwerk vorhandenen Stoffe (z. B. »Trona« als evtl. verzögernder und erhärtungsbeeinflussender Stoff), der Untergrundfeuchtegehalt und das Alter der Mörtelproben (»Nacherhärtungsverhalten«). Bereits ein Temperaturunterschied während des Erhärtungsprozesses kann zu deutlichen Eigenschaftsveränderungen von Mörteln führen [1].

Die Untersuchungen der Mörtelproben erfolgten u. a. in Anlehnung an DIN EN 998-02, DIN EN 18580-V, DIN 18555-09 und die Prüfnormen DIN EN 1015. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Normen beim Bauen im Bestand oft nur Hilfen für eine Beurteilung des Mauerwerks darstellen [12] und deshalb die ermittelten Eigenschaftskennwerte nur als grober Anhalt für einen Eigenschaftsvergleich dienen können.

Probenahme

Es wurden zwei Verfahren für die Entnahme von Proben aus den Musterflächen angewendet:

- **Entnahme von Bohrkernen** im Trockenbohrverfahren zum Überprüfen der Einbauqualität und der wesentlichen physikalisch-mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit und E-Modul des Verfugmörtels als Fugenspritzmörtel, eingebracht im Trockenspritzmörtelverfahren. Prüfung der Verbundfestigkeit des Mörtels an den Fugenflanken und der Verbundwirkung zum Altmörtel, auch in Abhängigkeit von der Feuchtesituation im Bauwerk.
- **Trockenes Ausschneiden** des im Trockenspritzmörtelverfahren applizierten Fugenmörtels mittels Winkelschleifer zum Überprüfen der Einbauqualität und der wesentlichen physikalisch-mechanischen Eigenschaften wie Druckfestigkeit und E-Modul des Verfugmörtels, sowie der Verbundfestigkeit des Mörtels an den Fugenflanken und der Verbundwirkung zum Bestandsmörtel.



Bild 16
Mauerwerkoberfläche nach der ersten Handreinigung



Bild 17
Mauerwerkoberfläche nach der letzten Reinigungsstufe

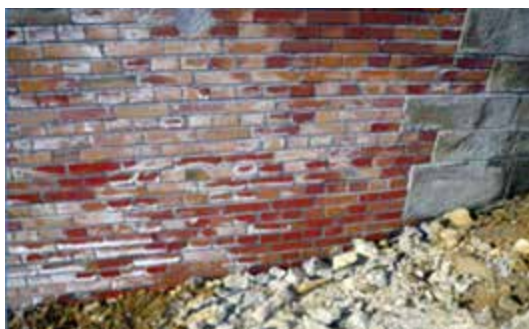


Bild 18
Probebläche nach einer mehrmonatigen Standzeit



Bild 19
Ausblühungen im Wesentlichen auf den Mauerziegeln – mehrere trockene Nachreinigungen sind erforderlich (Wartung)



Bild 20
Natursteinoberfläche mehrere Monate nach der Mörtelapplikation und Reinigung

im Trockenspritzmörtel-
verfahren verfüllte Norm-
prismenformen

Zweistein-Verbundprüfkörper aus Mauerziegel und Mauermörtel

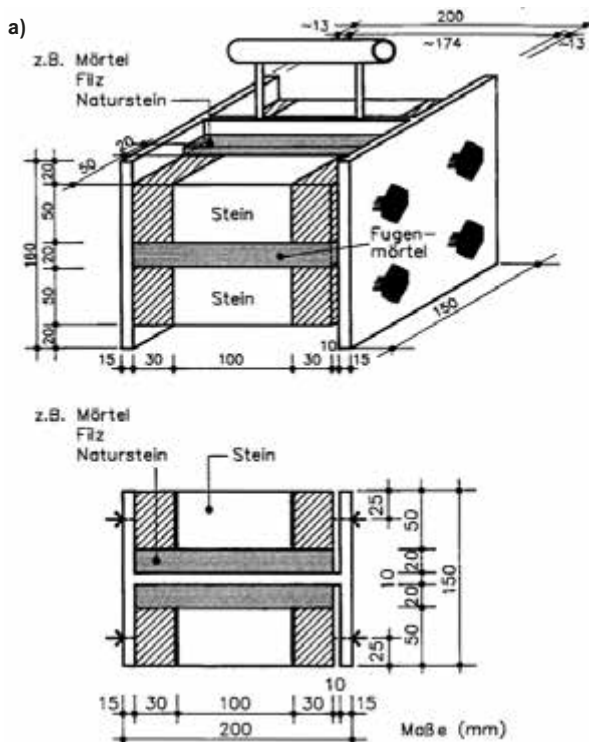


Von den entnommenen Proben wurden in Abhängigkeit vom anzuwendenden Prüfverfahren unterschiedliche Prüfkörperarten trocken geschnitten, unter normalen klimatischen Bedingungen gelagert und hinsichtlich Rohdichte, Druckfestigkeit und dynamischer E-Modul untersucht. An ausgewählten, nach dem ibac-1 Verfahren hergestellten Verbundprüfkörpern sind zudem die Haftzugfestigkeit des Mörtels am Stein bzw. die Zugfestigkeit des Mörtels selbst untersucht worden, wenn die Haftung am Stein entsprechend groß war.

Zwei-Stein-Verbund-Prüfkörpern (ibac-01 Prüfverfahren) [1, 8] sowie an Prüfkörpern, die von den bauzeitlichen und neuzeitlichen Mörtelproben aus dem Bauwerk entnommen wurden, konnten direkt miteinander verglichen werden, da die Prüfkörpergeometrie und die Prüfverfahren vergleichbar waren.

Im Bauwerk wurden Mörteldruckfestigkeiten von etwa 10 bis $>40 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Es ist sowohl für die untersuchten Bauwerksmörtelproben als auch für die im Rahmen der Eignungsuntersuchungen ermittelten Druckfestigkeiten zu beachten, dass sie nicht ohne Weiteres mit den Norm-Druckfestigkeiten, ermittelt am Normprisma, gleichgesetzt werden können [1, 9, 10, 11, 12].

Herstellvorrichtung für
Verbundfestigkeitsprüfkörper
(Zwei-Stein-Verbund-
prüfkörper) nach dem
ibac-1 Verfahren (a);
beispielhaft Verbundprüfkörper
vor dem Spritzmörteleintrag
aus Mauerziegel (b) und
Grauwacke (c), nach dem
Spritzmörteleintrag (d) und
nach dem Ausbau aus der
Prüfvorrichtung (e)



Vergleichsuntersuchungen zeigen, dass die in der Norm angegebenen Prüfverfahren für eine Beurteilung der Druckfestigkeit von Mörteln, die aus einer Fuge entnommen wurden, nur bedingt anwendbar sind. Ein direkter Rückschluss auf die Normdruckfestigkeit lässt sich aus den Druckfestigkeitsbestimmungen mit Hilfe dieser Prüfverfahren nicht ziehen.

In der TH Köln wurden jedoch umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die u. a. ergaben, dass sich sehr gute Zusammenhänge zwischen der Normdruckfestigkeit und der Fugendruckfestigkeit mit einem dort angewendeten Prüfverfahren herstellen lassen. Bei diesem TH-Sonderprüfverfahren werden Mörtelscheiben mit in ihren Eigenschaften angepassten Verbundstoffen so aufeinander angeordnet und anschließend präpariert, dass ein würfelförmiger Prüfkörper mit den Maßen rd. $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ entsteht (Sandwichprüfkörper), von dem dann die Druckfestigkeit bestimmt werden kann [1, 10, 13].

Einige Untersuchungsergebnisse von den drei im Trockenspritzmörtelverfahren in die Fugen der Probeflächen eingebrachten Mörtel sind in der Tabelle dargestellt, für Mz=Mauerziegel und GW=Grauwacke. Die dynamischen E-Modulwerte sind mit Hilfe eines Ultraschallmessverfahrens an prismatischen Prüfkörpern ermittelt worden. Die



Bild 24
Haftzugfestigkeitsprüfung
nach dem Prüfverfahren ibac-1
(siehe auch Bild 23)

E-Modulwerte liegen im Bereich der geprüften historischen Bestandsmauermörtel.

Verträglichkeitsuntersuchungen

Von den ausgewählten und an die objektspezifischen Bedingungen angepassten Mörtel sind Normprismen unter Laborbedingungen hergestellt und hinsichtlich ggf. auftretender Formänderungen infolge eines Sulfatangriffes in Zeitrafferuntersuchungen geprüft worden.

Die Untersuchungen wurden, um bessere Hinweise auf die Dauerhaftigkeit der Systeme zu erhalten, im Rahmen der Verträglichkeitsuntersuchungen über einen längeren Zeitraum (mehr als 90 Tage) durchgeführt und durch Frischmörtel- und Festmörtel-Untersuchungen ergänzt.

Spritzmörtelfugen Festmörtel Eigenschaften

Bestimmung der Rohdichte (lufttrocken $\rho_{L,F}$), des dynamischen E-Moduls (dyn $E_{SK,F}$) (ermittelt mit dem Steinkamp-Gerät), an prismatischen und der Druckfestigkeit in der Fuge $f_{c,F}$ ($\beta_{D,F}$), an würfelförmigen Prüfkörpern aus dem Fugenmörtel

Prüfalter: 56 d

Mörtel- bezeichnung	Verbund- material	$\rho_{L,F}$ kg/dm ³	$f_{c,F}(\beta_{D,F})$ N/mm ²	dyn $E_{SK,F}$ ¹⁾
1	2	3	4	5
A_s	Mz	1,90	11,2	21.200
	GW	1,83	12,0	21.500
B_s	Mz	1,92	29,9	24.300
	GW	1,86	15,0	17.000
C_s	Mz	1,87	22,0	18.800
	GW	1,81	17,3	21.900

1): Werte abhängig von verschiedenen Berechnungsfaktoren
z. B. der Querdehnzahl, daher sind Abweichungen von etwa $\pm 25\%$ bis $\pm 35\%$ möglich.

Dies war notwendig, da Untersuchungen gezeigt haben, dass verschiedene, am Markt erhältliche Mörtelsysteme unterschiedlicher Hersteller trotz deklarierten hohen Sulfatwiderstandes bzw. sogar »Sulfatbeständigkeit« die Anforderungen bzgl. der Anwendung unter den objektspezifischen Verhältnissen nicht erfüllt haben. Zwar wurden von einigen Mörteln die Kriterien nach 56 Tagen Sulfatlagerung erfüllt, bei einer längeren Lagerung hingegen zeigten die Mörtel entweder einen deutlichen Festigkeitsabfall und/oder wurden durch Treibprozesse geschädigt (Bild 25).

Untersuchungen zum Sulfatwiderstand

Der Sulfatwiderstand von Bindemittel- bzw. Mörtelsystemen wurde in Anlehnung an das sogenannte SVA-Prüfverfahren an Flachprismen geprüft. Dabei werden Bindemittel mit einem Wasserzement- (w/z) bzw. Wasserbindemittelwert (w/b) von 0,5 hergestellt und geprüft. Das Mischungsverhältnis von Bindemittel und Gesteinskörnung beträgt 1:3 in Masseteilen.

Für dieses Prüfverfahren sollte die Differenzdehnung zwischen der Lagerung von Prüfkörpern im Wasser und parallel gelagerten Prüfkörpern in Sulfatlösung nicht größer als 0,5 mm/m betragen. Die Prüfbedingungen wurden in Anlehnung an die zum Prüfzeitpunkt nur im Entwurf vorliegenden DIN EN 19573 und der darin beschriebenen Prüfverfahren für die Sulfatangriffsprüfung von Mörtel angepasst. Gemäß dieses Prüfverfahrens darf die Dehn-

differenz bis zu 0,8 mm/m im Prüfalter von 90 d betragen.

Der Entwurf der Norm DIN EN 19573 geht allerdings bei Mörteln, die für Entwässerungsbauwerke aus Mauerwerk konzipiert worden sind, davon aus, dass wie beim Beton der Sulfatangriff im Wesentlichen von der Oberfläche aus stattfindet (äußerer Angriff) [6].

Bei den Instandsetzungsmörteln für die Brücke findet jedoch gekoppelt an eine äußere Beanspruchung auch eine starke innere Beanspruchung durch Schadstoffe statt, da es sich um ein sehr poröses System handelt bzw. handeln muss, um den gestellten Anforderungen gerecht zu werden. In solch ein poröses System können die Schadstoffe sehr schnell eindringen und von innen heraus beanspruchend wirken.

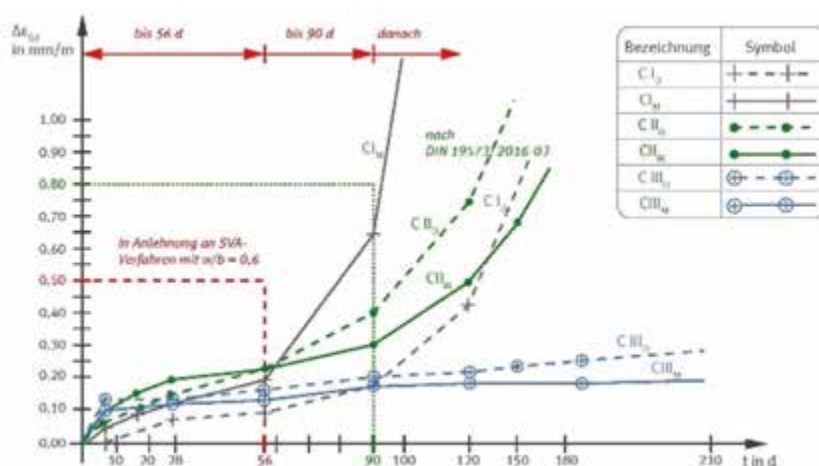
Für die Prüfung der eingefärbten Mörtel wurde der Wasserbindemittelwert bei einer Prüferie auf 0,5 eingestellt und bei einer weiteren Prüferie auf 0,6 erhöht. Aufgrund der mit dem größeren Wassergehalt verbundenen vergrößerten Porosität führt dies i. d. R. zu einem stärkeren Sulfatangriff als bei einem Wasserbindemittelwert von 0,5 [6].

Die Grenzbereiche, die nach den unterschiedlichen Prüfverfahren eingehalten werden sollten, sind für - Prüfalter: 56 d; $\epsilon < 0,5$ mm/m) = rot in den Bildern 11 und 25 bzw. - Prüfalter: 90 d; $\epsilon \leq 0,8$ mm/m = grün in Bild 25 gekennzeichnet. Neben der Längenänderung wurden parallel zu den Verträglichkeitsuntersuchungen auch die Eigenschaftskennwerte der Mörtelsysteme wie Rohdichte, Karbonatisierungstiefe, Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit bestimmt. Sowohl die speziellen Bindemittelsysteme als auch die eingefärbten Instandsetzungsmörtel sind über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr hinsichtlich des Sulfatwiderstandes untersucht worden. Einige Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung des Sulfatwiderstandes sind in Bild 25 für drei Mörtel dargestellt. Sie wurden mit einer Basisrezeptur aber verschiedenen Zementarten hergestellt.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen in Bild 25, dass beim Instandsetzungsmörtel C III_M ab einer Prüfdauer von 90 Tagen keine wesentlichen Veränderungen der Dehnung auftreten.

Bild 25

verschiedene Mörtel CI, CII und CIII bestehend aus einer Basisrezeptur aber verschiedenen Zementen (CEM I, R HS, CEM I, R HS NA und CEM III) mit (M) und ohne (O) spezielle Puzzolanzugabe; Dehndifferenz $\Delta\epsilon_{SU}$ zwischen Sulfatlagerung und Wasserlagerung bei +5 °C in Abhängigkeit vom Prüfalter t [1].



6 Prognose, Forschung und Entwicklung

Die Brücke wies bereits während ihrer Errichtung extreme Ausblühungen und Aussinterungen auf (Bild 26).

Sie wurde offenbar mit verschiedenartigen, unterschiedlichen schlackehaltigen (hüttensandhaltigen) Mörteln und Betonen errichtet.

Der Beton ist, wie aus historischen Unterlagen und den Untersuchungen zu entnehmen ist, teilweise sehr porös (»Stampfbeton«). Dies führte dazu, dass Niederschlagswasser und salzbelastetes Wasser in einer Art Sickerströmung in die Konstruktion gelangen und dabei Schadstoffe eintragen konnten. Diese wurden an die Bauteiloberfläche transportiert bzw. in der Baukonstruktion in Hohlräumen eingelagert (Bild 27).

Wie die Eignungsversuche gezeigt haben, lagern sich die in den Baustoffen vorhandenen Schadstoffe auch nach einer Instandsetzung (u. a. Reinigung, Austausch von Fugenmörteln) in kürzester Zeit (nach wenigen Wochen) wieder an den Bauteiloberflächen und insbesondere in den oberen Mauerwerkszonen im Mauerstein und Mörtel an. Gerade an den Bauteiloberflächen, die den Umwelteinflüssen direkt ausgesetzt sind, wirken diese Stoffe beanspruchend auf die historischen und neuzeitlichen Baustoffe.

Im Zuge der Brückeninstandsetzung wurde die Brückenkonstruktion von oben abgedichtet. Nach Abdichtung und damit Trocknung der Talbrücke wird nach und nach der Feuchtegehalt in der Brückenkonstruktion (Trocknungs- bzw. Feucht-abgabeprozess) sinken. Damit verbundene Formänderungen (Schwinden, Kriechen, Quellen) sowie die Wirkung der enthaltenen Schadstoffe werden zu Oberflächenveränderungen bis hin zu Abmahlungen, Abschalungen und evtl. auch zum Auslösen von Rissen führen.

Die in der Brückenkonstruktion heute noch vorhandenen Schadstoffe können mit den derzeit bekannten Techniken nicht entscheidend aus der Konstruktion entfernt bzw. reduziert werden, sodass sie auch zukünftig auf die vorhandenen bzw. für die Instandsetzung verwendeten und eingesetzten Baustoffe (Mauersteine, Mörtel, Verankerungssys-

teme, Beton) stark beanspruchend wirken werden. Die Beanspruchung der Brückenkonstruktion wird also auch nach der Instandsetzung des Brückenmauerwerkes weiter über einen unbekannten Zeitraum stattfinden und zu Veränderungen an der historischen Bausubstanz führen.

Ein Mörtelsystem, das im Zuge der Instandsetzungsarbeiten u. a. als Verfugmörtel in das Mauerwerk eingebracht wird, muss daher als eine Art »Verschleiß- bzw. Opferschicht« angesehen werden. Die »Lebensdauer« eines solchen Mörtelsystems ist von mehreren Faktoren abhängig, u. a. von der Art der belastenden Stoffe im Bauwerk, den Umwelteinflüssen und klimatischen Bedingungen, den Transportprozessen sowie der Bauabfolge im Zuge der Instandsetzung.

Eine zuverlässige Aussage zu der Lebensdauer der Baustoffsysteme kann daher, wie die Erfahrungen aus den Untersuchungen vieler anderen Projekte zeigen, auch dann nicht angegeben werden, wenn entsprechende Laboruntersuchungsergebnisse vorliegen. Es können allenfalls Tendenzen zur Dauerhaftigkeit aufgezeigt werden.

Eine dauerhafte Erhaltung eines solchen Bauwerks ist nur dann möglich, wenn sich alle verantwortlich Beteiligten dessen bewusst sind, dass ein solches Bauwerk phasenweise, zeitlich über Jahre und Jahrzehnte versetzt instandgesetzt und wartend gepflegt werden muss.

Für die Instandsetzung eines solchen Brückenbauwerkes sind fünf unterschiedliche, zeitlich sehr lang versetzte Arbeitsphasen anzusetzen.



Bild 26
Ausblühungen am Mauerziegelmauerwerk der Talbrücke bereits im Bauzustand im Jahre 1938



Bild 27
extreme Schadstoffanreicherungen in Mauerwerks-hohlräumen in Übersicht (links) und im Detail (rechts)

- Wenn in der **1. Phase** der Feuchteschutz der Brücke von der Fahrbahnseite aus erfolgt ist, wird ein langandauernder, baustoffbeanspruchender Schwind- und Kriechprozess sowie eine Salzanreicherung im und an den Bauteilen stattfinden. Damit sind Spannungsumlagerungen, Rissbildungen und chemisch-mineralogische Prozesse, auch Umwandlungsprozesse verbunden. Kristallisations-, Hydratations- und Dehydrations-Prozesse der Salze führen zu weiteren Beanspruchungen, die durch Frost-Tau-Wechsel- und Frost-Tau-Salz-Wechsel-Beanspruchungen beeinflusst und/oder überlagert werden. All diese Beanspruchungen sind temperatur- und feuchtegehaltsabhängig (z. B. aus Niederschlag und unterschiedlichen Luftfeuchten).

Die Instandsetzungsmörtel, insbesondere die oberflächennah eingesetzten Mörtel, werden dieser Beanspruchung nicht langandauernd widerstehen können. Sie wirken als »Verschleiß- und Opferschicht«.

- Die »Lebensdauer« dieser Systeme kann dadurch verlängert werden, indem in der **Phase 2** (Feuchteabgabephase) nach dem Abdichten der Brücke möglichst lange gewartet wird, um die zuvor beschriebenen Beanspruchungsprozesse zu reduzieren und in dieser Zeit die oberflächigen Salzanreicherungen, soweit möglich, immer wieder trocken entfernen zu können.

Diese langen Wartezeiten sind in der Regel auch aus Kostengründen nicht möglich.

- In der **Phase 3** können die Steinaustausch- und Verfugarbeiten ausgeführt werden. Diese Verfugarbeiten sollen bei richtiger Ausführung von qualifizierten Facharbeitern die vorgesehene Tragfunktion, in Abhängigkeit von der weiteren Belastung, für einen begrenzten Zeitraum erfüllen.
- Die **Phase 4** schließt unmittelbar an die ersten Instandsetzungsmaßnahmen an und besteht in einer langfristigen Beobachtung und dem kontinuierlichen Nacharbeiten der Brücke im Rahmen einer wartungsgemäßen Instandsetzung, die vorgeplant werden sollte. Dabei werden die Feuchteabgabe und damit die Salzanreicherung und die salzbedingte Beanspruchung über Jahre und Jahrzehnte stattfinden. Es werden Ausblühungen, Abblätterungen, Formänderungen und Risse entstehen, die ggf. einer weiteren Instandsetzung zu einem späteren Zeitpunkt bedürfen.
- Es ist einzuplanen, dass in der **Phase 5** voraussichtlich nochmalige restauratorische Instandsetzungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Zustand des Bauwerkes notwendig werden.

Das **Ziel** eine dauerhafte Instandsetzung im Sinne des Erhalts des Baudenkmals zu erreichen, bedingt neben den beschriebenen notwendigen begleitenden Maßnahmen, dass die Prozesse, die in einem solchen Bauwerk stattfinden, wissenschaftlich-praktisch genauer untersucht und ggf. entsprechende Baustoffentwicklungen für die Instandsetzung durchgeführt werden.

Sollen also kulturhistorisch bedeutende Bauwerke aus der Entstehungszeit 19./20. Jh. langfristig erhalten werden, so ist anzuraten, eine entsprechende Forschung zum Erhalt und zur Instandsetzung solcher Bauwerke durchzuführen [7]. Dazu wäre es z. B. notwendig, ähnlich wie dies derzeit im Betonbau versucht wird, entsprechende praxisbezogene Prüfparameter für Laboruntersuchungen zu erarbeiten.

Solche Forschungen müssen im Labor, aber insbesondere auch an Bestandsbauten selbst, über einen ausreichend langen Zeitraum durchgeführt werden. Dabei ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von praxisorientierten Wissenschaftlern mit Praktikern erforderlich.

Für die Gewinnung weiterer Erkenntnisse wäre es z. B. von Bedeutung, die Untersuchungen und die erfolgte Instandsetzung sowie die Nacharbeiten an einem solchem Bauwerk über einen ausreichend langen Zeitraum mittels Monitoring zu dokumentieren und praktisch-wissenschaftlich zu begleiten. Es könnten z. B. folgende Parameter erfasst werden:

- Messung der Formänderungen vor, während und nach der Instandsetzung auch in Abhängigkeit von der Brückennutzung. Dabei sollten begleitenden Messungen zur Veränderung des feuchte- und baustoffschädlichen Salzgehaltes sowie zum Umgebungsklima und zu den Temperaturverläufen in der Bauteilkonstruktion erfolgen.
- Bestimmung der Baustoffeigenschaftsveränderung (von vorhandenen und neu verwendeten Baustoffen) in Abhängigkeit von der Zeit und den auf die Konstruktion wirkenden Beanspruchungsprozessen.
- Abgleich der Formänderungsmessungen mit dem rechnerisch ermittelten Tragverhalten der Brücke.

Dass baustoffschädliche Stoffe, u. a. Sulfatverbindungen auch durch Umwandlungsprozesse aus Mörteln und Betonen gelöst werden können, ist von verschiedenen historischen Bauwerken bekannt. Die Ursache für das Vorhandensein und/oder die Bildung solcher Stoffe sowie deren genaue Wirkung von diesen Stoffen auf die Bausubstanz ist aber

bisher für solche Brückenbauwerke noch nicht detailliert erforscht worden. Was bisher im mörteltechnologischen Sektor ebenfalls kaum bekannt ist und im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht werden sollte, ist der Einfluss der Karbonatisierung auf die Mörtel Eigenschaften. Im Rahmen der Untersuchungen [1] an Standard-Werkmörteln sind beispielsweise erhebliche Festigkeitsreduktionen im Zusammenhang mit der Karbonatisierung festgestellt worden. Die chemisch-mineralischen Prozesse, die dabei in den Mörteln stattgefunden haben, können evtl. einen erheblichen Einfluss auf die Beständigkeit und damit auf die Dauerhaftigkeit von Instandsetzungsmörteln haben.

Die jetzt durchgeführten mörteltechnologischen Maßnahmen an der Brücke sind also als eine Art »Zwischenschritt« in einer, über einen langen Zeitraum stattfindenden Gesamtmaßnahme zu sehen.

Dennoch:

»Trotz aller Wissenschaft werden die Naturgesetze das letzte Wort haben«

In Erinnerung an unsere Kollegin

Sabine Koch †

Dominik Ingenieurbüro

Restauratorin im Steinmetz und Bildhauerhandwerk

Lehrbeauftragte für Baustoffprüfung an der TH Köln

Literatur

- [1] Dominik, A.: Dissertation in Bearbeitung
 - [2] Laserscanaufnahmen und Planerstellung durch OE Planung + Beratung GmbH, Altena
 - [3] Ludwig, Horst-Michael: »Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton«; Dissertation; Bauhaus-Universität Weimar; 1996
 - [4] Ludwig, Michael; Stark, Jochen: Frost-Tausalz-Widerstand von HOZ-Betonen. Untersuchungen an Betonen mit hüttensandreichen Zementen; Verband Deutscher Betoningenieure e. V. -VDB-, Düsseldorf (Herausgeber); Beton – Entwicklungen und Tendenzen. Fachtagung des VDB in Erfurt 1996 Düsseldorf; Selbstverlag 1997, S. 3–10
 - [5] Franke, L.; Oly, M.; Witt, S.: »Richtlinie für die Prüfung von Mörteln für den Einsatz im Sielbau« – In: TIS Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau, S. 23–27; Heft 8; Bauverlag, Gütersloh, 2001
 - [6] Schießl, P.: Vorlesungsskript Baustofflehre für Bauingenieure, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), RWTH Aachen, bis 2000
 - [7] Restauratorische Instandsetzung der Immanuelskirche in Wuppertal-Barmen; Entwicklung von Methoden zur restauratorischen Instandsetzung von sulfathaltigem, historischem Mauerwerk, welches mit Mörtel u. a. aus Hüttenschlacken/Hüttensand errichtet worden ist. Aktenzeichen 12248 DBU Osnabrück/Forschungsprojekt F 621, Ingenieurbüro Schießl · Raupach Consulting Engineering, Aachen; 1997. (Hinweis: das genehmigte und begonnene Forschungsprojekt wurde durch den Bauherrn zurückgezogen.)
 - [8] Knöfel, D.; Schubert, P.: Mörtel und Steinergänzungstabelle in der Denkmalpflege, Sonderheft der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1993
 - [9] Klinkner, J., Nocker, C., Baroness von Kruedener, D.: Ansätze zur rechnerischen Erfassung des Tragverhaltens von Bruchsteinmauerwerk unter Berücksichtigung der erforderlichen Messtechnik und der zu ermittelnden Baustoffkennwerte, 2018
 - [10] Schell, A.: Anwendung unterschiedlicher Prüfverfahren zur Untersuchung von Mörtel im Verbund zu unterschiedlichen Mauersteinen, 2018
 - [11] WTA-Arbeitskreis: Druckfestigkeit von Mauerwerk im Bestand, 2018/2020, in Bearbeitung
 - [12] Dominik, A.: Skript zur Vorlesung Schutz und Instandsetzung von Bauwerken, WS 2019/2020
 - [13] Dominik, A; Schell, A: Vergleichende Untersuchungen von unterschiedlichen Prüfverfahren zur Bestimmung der Fugendruckfestigkeit. – Veröffentlichung in Bearbeitung.
- DIN EN 998-02 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau Teil 2: Mauermörtel /2017-02
- DIN EN 18580-V Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften /2007-03
- DIN 18555-09 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln / 1999-09
- DIN EN 1015 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk /2007-05
- DIN EN 19573 Anforderungen an zementgebundene Mörtel /2016

Bildnachweis

Bilder 2–4, 26: Strassen NRW, Regionalniederlassung Ruhr

Bild 10: nach [1, 7]

Alle anderen Bilder: Ingenieurbüro Dominik

Schloss Linderhof – Wiederherstellung der Kaskadenanlage



Die Kaskade im Norden des Schlosses Linderhof ist das zentrale Gestaltungselement des Landschaftsparks in diesem Bereich. Durch Baumängel und Witterungseinflüsse wurden Schäden verursacht, die im Rahmen der Gesamtanierung der Freianlagen behoben werden sollten.

Dazu sind die Unterkonstruktion ertüchtigt bzw. erneuert, die Werkstücke und Schmuckteile aus Naturstein abgebaut und in die Werkstatt gebracht worden. Nach der aufwändigen Restaurierung wurden sie am ursprünglichen Ort wieder aufgebaut. Zwei fehlende Schmuckvasen sind durch Kunststeinkopien neu hinzugefügt worden.

Ulrich Bauer-
Bornemann

Unter den weltbekannten »Königsschlössern« des bayerischen Königs Ludwig II ist die »Königliche Villa« Schloss Linderhof bei Ettal das kleinste. Es liegt im Ammergebirge am Ende des Graswangtals auf nahezu 1000 m Höhe und wird von vielgestaltigen Gartenanlagen umgeben. König Ludwig errichtete es in mehreren Bauabschnitten von 1870–1886 in Rokokoformen nach dem Vorbild des bei Versailles durch Ludwig XIV erbauten Pavillons von Marly. Linderhof gilt als Lieblingsschloss des Märchenkönigs; hier hielt er sich am häufigsten auf und es war auch das einzige, das noch zu seiner Lebenszeit fertiggestellt wurde. Die nach Süden vorgelagerten Bereiche sind mit Terrassen, Treppenanlagen und einem großen Bassin gestaltet. Nach Norden hin steigt der Berghang in unmittelbarer Nähe steil an. Auf diesen fiel der Blick des Königs von seinem Schlafzimmer auf dieser Seite des Schlosses. Hier ließ er 1886 die Kaskadenanlage in ihrer bestehenden endgültigen Form genau in der Hauptachse des Schlosses bauen

Über dem Neptunbrunnen mit einer Figurengruppe aus Zinkblech und einer nischenförmigen Grotte als Rückwand steigt die Kaskade steil in Schwell-

stufen den Berg hinauf. Seitlich werden die Treppen durch gemauerte Wägen vom anschließenden bewegten Hang getrennt. Seitliche Boskette rahmen die Kaskade ein, oben steht als Abschluss ein offener Pavillon (Bild 1). Die Seitenmauern waren verputzt und sind mit Marmorplatten belegt, die Wehrkronen der Wasserstufen bestehen ebenfalls aus hell-grauem kristallinem Marmor (Bilder 2 und 3). Das Becken des Neptunbrunnens wurde

Bild 1
Vorzustand der Kaskade
mit Neptunbrunnen





Bild 2 1886 dazu gefügt und die geschweiften Profil-
Wasserstufen mit Bosketten
(Blick zum Pavillon)

Bild 3 Wasserstufen mit Wehrkronen
(Blick zum Schloss)

1886 dazu gefügt und die geschweiften Profil-
Wasserstufen mit Wehrkronen bestehen ebenfalls aus italienischem Marmor. Die Seitenwangen sind durch mehrere Abstufungen mit volutenförmigen Endungen akzentuiert. Diese sind zusätzlich durch zehn Rundvasen mit üppiger bildhauerischer Dekoration geschmückt (Bild 4). Die aufgesetzten Vasen bestehen aus einem sehr feinkörnigen Jurakalkstein von heller, leicht gelblicher Farbe.

Der Freistaat Bayern ist durch seine Schlösserverwaltung Eigentümer der Anlage, deren Sanierung zusammen mit der oberhalb gelegenen Venusgrotte ab 2017 begonnen wurde. Das Staatliche Bauamt in Weilheim beauftragte Markus Lohr aus Regensburg mit der restauratorischen Fachbauleitung Naturstein, der ein Arbeitskonzept und eine Leistungsbeschreibung erarbeitete. Auf dieser Basis erfolgte im Sommer 2017 die Ausschreibung; die Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH in Bamberg erhielt als Mindestnehmender den Auftrag.

Wesentliches Ziel der Steinrestaurierung ist die Wiedergewinnung des ursprünglichen Erscheinungsbildes und die konservatorische Behandlung der überkommenen originalen Substanz. Spätere Eingriffe mit ungeeigneten Materialien und formal ungenügenden Reparaturen sollten dabei zurückgeführt werden, um möglichst nahe an den bauzeitlichen Gesamteindruck zu Zeiten König Ludwigs zu gelangen.



Dieser ist in einer frühen malerischen Darstellung überliefert. Dabei fällt die gewünschte helle Absetzung der Marmor- und Kalksteinteile gegenüber dem vielfältigen Grün der Grasmatten und Boskette und des oberhalb anschließenden Bergwaldes deutlich ins Auge. Durch natürliche Auflagerungen – hier vor allem Moose und Flechten sowie abgestorbene Fruchtkörper und dünne Algenüberzüge – hatte sich das Bild der Steinoberflächen in den bewitterten Bereichen ins Schwarz-Graue verschoben.

Bei den profilierten Schwellstufen, die ständig unter Wasser stehen, kamen erhebliche Sinterauflagen und zusätzliche Bitumenanstriche als Beläge hinzu.

Das raue Klima des Gebirges hat zu zahlreichen Spannungsrissen geführt. Hier sind die oft rasch wechselnden Außentemperaturen und der strenge Winter ursächlich. Auch konstruktiv haben sich Bewegungsrisse durch Setzungen des Unterbaus und Schieben der steilen Außenwangen ergeben. Durch die an vielen Stellen schadhafte Verfüugung der einzelnen Werkstücke konnte Wasser eindringen und zusätzlich im Unterbau nachteilige Wirkung entfalten. Bei Renovierungen der jüngeren Zeit kam häufig Zementmörtel zur Anwendung, der auf Grund seiner Sprödigkeit die Bewegungen innerhalb der Anlage nicht mitmachen konnte und ebenfalls zu erheblichen Schäden geführt hat. Nahezu alle aufliegenden Marmorplatten der

Seitenwangen waren vom Untergrund gelöst. Das ganze Ausmaß der Belastungen war unter den biogenen Filmen und den dicken Überzügen schwierig zu erkennen. Durch Suchöffnungen und probe-weise Bearbeitung von Teilbereichen versuchte der Fachplaner ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten und die Leistungen so vollständig wie möglich zu erfassen und zu beschreiben.

Sämtliche Natursteinteile mussten abgebaut, verladen und in die Werkstatt nach Bamberg transportiert werden. Da eine direkte Anfahrt nicht möglich ist, wurden die bauseits errichteten beiden Drehkräne eingesetzt, um die teils schweren Einzelstücke über Zwischenpodeste zum Schlossparterre zu heben (Bild 5). Dort wurden sie mit dem Ladekran nach Palettierung und Transportsicherung fachgerecht auf die Ladefläche bewegt und mit Verspannung etc. für die Transporte eingerichtet, die auf Grund der großen Menge und des hohen Gesamtgewichtes mehrfach nötig waren (Bild 6).

Die Schmuckvasen mussten besonders sorgfältig gepolstert werden, da der weiche Kalkstein bei den sehr dünnwandig gearbeiteten Ornamenten leicht brechen konnte.

Die Phase des Abbaus musste auch der örtlichen Witterung angepasst werden, da bei starkem Wind kein Kraneinsatz möglich und bei Regen der Steilhang nicht begehbar ist. Vor dem Eintreten des ungünstigen Herbstwetters waren jedoch alle Originalteile geborgen und in der Bamberger Werkstatt unter Dach. Ein Nummernsystem aus den Grundrissplänen wurde über alle Teile der Anlage gelegt. Diese Einzelbezeichnung jedes Werkstücks ist jeweils dauerhaft an unempfindlicher Stelle angebracht worden.

Die Reinigung wurde mit verschiedenen Verfahren bemustert. Gewünscht war eine möglichst vollständige Abnahme der mineralischen und biogenen Beläge sowie Überzüge auf den Schwellstufen. (Bilder 7 und 8). In einer Mischung aus mechanischer Vorarbeit – Abnehmen der Beton- und Zementmörtelbereiche (Bild 9), Heißdampf mit geringem Druck und ohne chemische Zusätze sowie einer nur in Teilbereichen anzuwendenden Bearbeitung mit Niederdruckpartikelstrahl – konnten die Marmoroberflächen der Architekturteile weit-



Bild 4
Rundvase mit Sonnensymbol
(Vorzustand)

gehend wieder freigelegt werden. Eine abschließende Bearbeitung mit Metall-Drehbürsten (»Satinieren«) brachte eine Verdichtung und einen leichten Oberflächenglanz.

Die Abdeckplatten waren vielfach mit Rissen und Rissystemen durchzogen, in vielen Fällen auch zerbrochen. Nach Abnahme der unterseitigen Mörtel konnten hier Armierungen durch eingelegte Basaltstäbe (\varnothing 6–8 mm, je nach Größe) in Kunstharzmörtel eingebracht werden (Bild 10). Darüber wurde abschließend noch eine dünne Putzschlämme als durchgängiger Haftgrund aufgetragen (Bild 11). In den Sichtbereichen sind die Risse mit fließfähigem Mörtel durch Injektion gefüllt worden; der oberste Bereich wurde mit Ergänzungsmörtel aus Marmormehl und Acryldispersion verlaufs-genau ergänzt. Kleinere Schäden konnten mit dem gleichen Mörtel ausgebessert werden, bei größeren Bereichen wurden Marmorvierungen angesetzt (Bild 12). Diese folgten möglichst dem Verlauf der Ausbrüche (Konturvierung), die Versetzfuge wurde dabei so dünn wie möglich gehalten. Als Armierung kamen ebenfalls Basaltstäbe zum Einsatz.

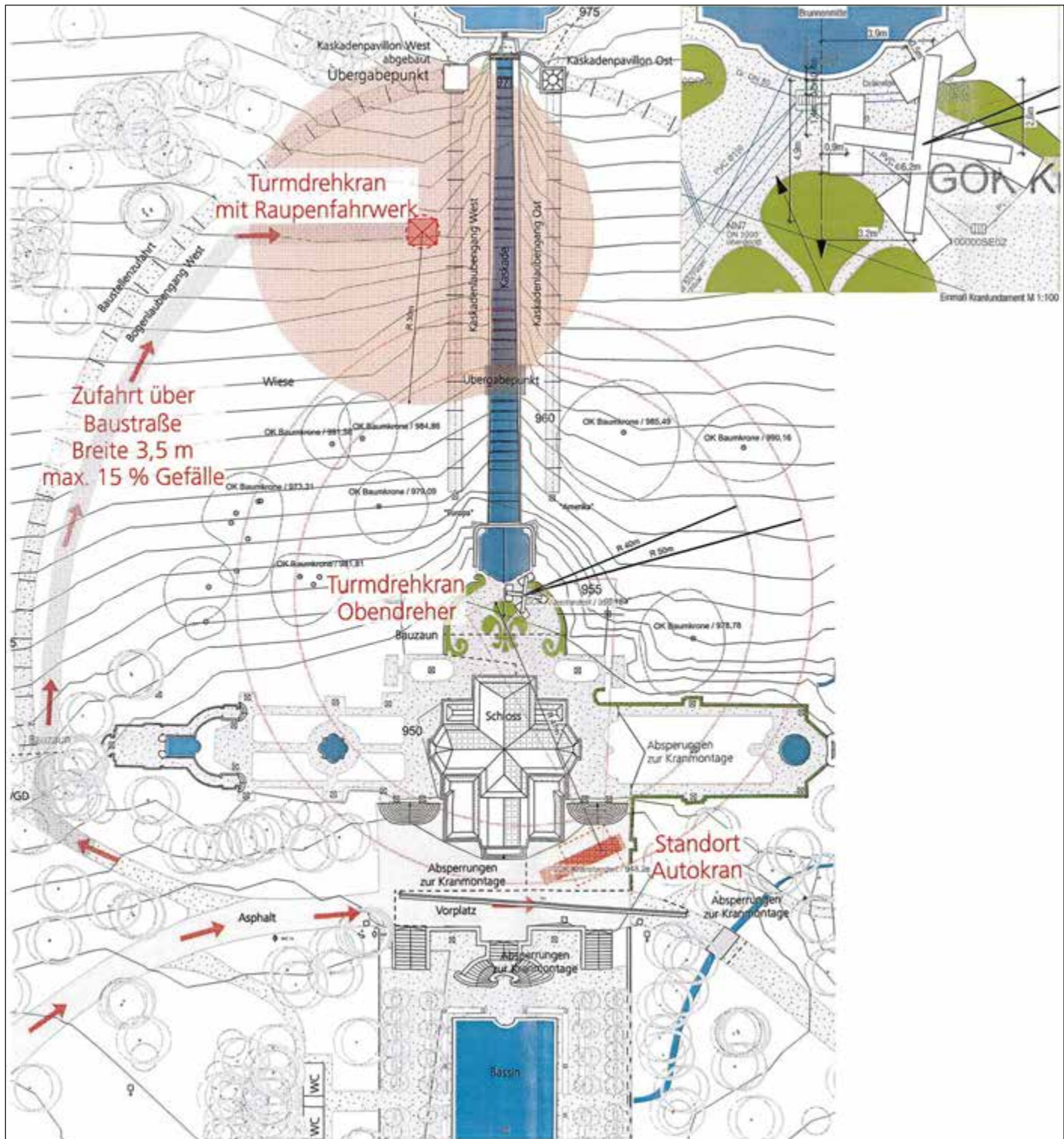


Bild 5 Plan der Baustelleneinrichtung (Staatl. Bauamt Weilheim)



Bild 6
abgebaute Werkstücke in der Restaurierungswerkstatt Bamberg

Bild 7
Reinigungsmuster Schwellstufe

Bild 8
vollständige Abnahme der Beläge (Vor-/ Endzustand)

Bild 9
mit Beton- und Zementmörtel verunreinigte Abdeckung



Bild 10
Armierung gebrochener Abdeckplatten

Bild 11
Putzschlämme als Haftgrund (Unterseite)



Bild 12
passgenaue Konturierung

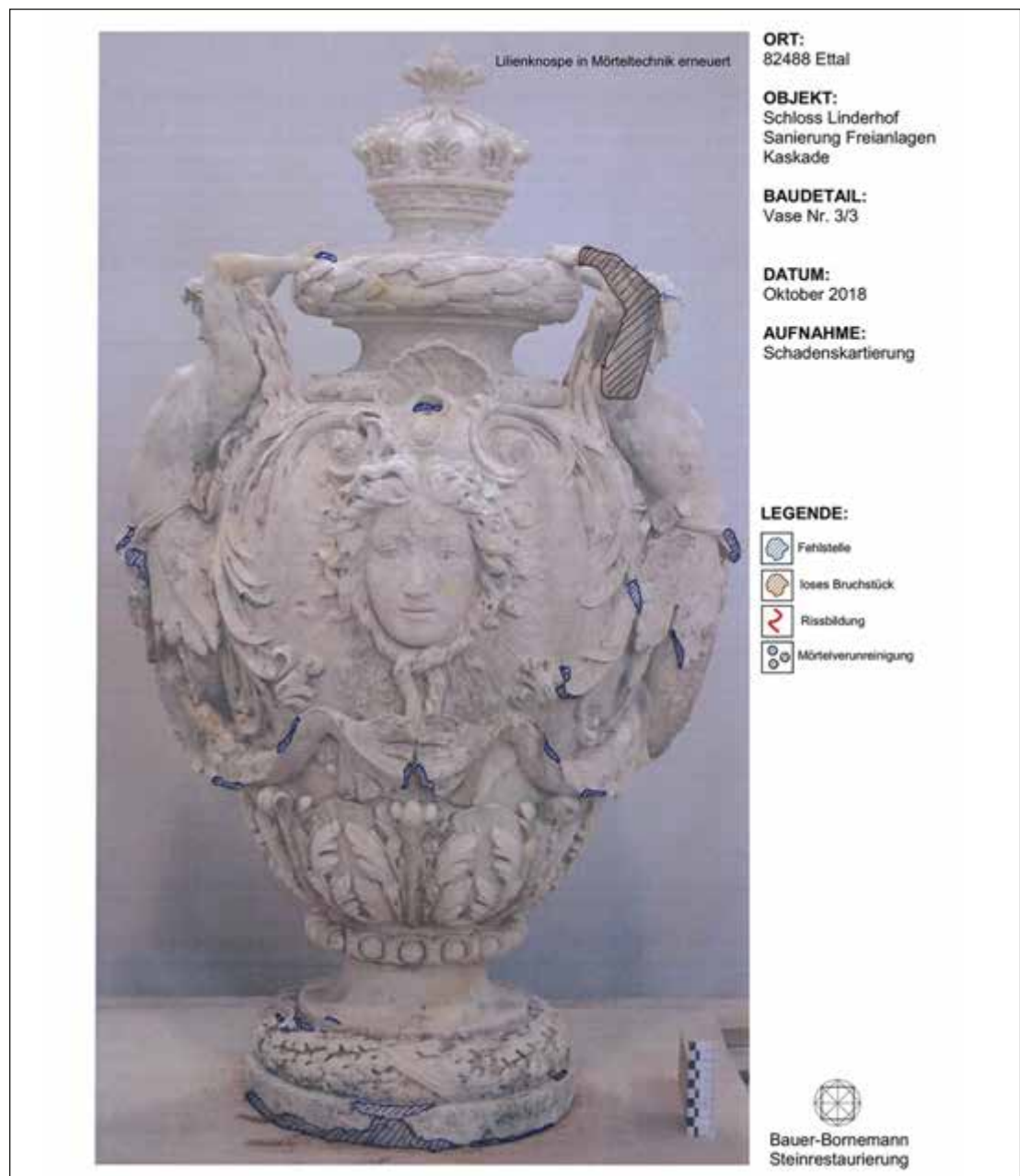
Bild 13
Vasen vor und nach den Reinigungsarbeiten

Die massiven Voluten mussten teilweise mit innenliegenden Ankern aus Edelstahl wieder zusammengesetzt werden, ansonsten wurden Risse und Schadstellen wie bei den Platten behandelt.

Eine der Abdeckplatten war derart häufig gebrochen und geschädigt, dass sie durch ein Neuteil aus Carrara Marmor ersetzt wurde. Die Bruchstücke konnten als Rohmaterial für Reparaturvierungen verwendet werden.

Alle Marmorteile wurden abschließend mit einer 3–5%igen Acrylatlösung (Paraloid B72 in Ethylacetat) als Schutzüberzug beschichtet.

Die Vasen mit ihrer überaus sensiblen Oberfläche mussten weitaus schonender bearbeitet werden, um keinerlei Einbußen an den Schmuckreliefs zu verursachen. Nach mehreren Musterflächen, die mit den Beteiligten abgestimmt waren, wurde eine Kompressen mit deionisiertem Wasser zum Aufweichen der Beläge aufgebracht. Anschließend konnte mit Mikrodampf und Holzspatel sowie feinen Bürstchen die Verschmutzung in kleinen Teilflächen abgenommen werden. Danach zeigte sich die bildhauerische Qualität vor allem in den geschützteren Zonen in bewundernswerter Erhaltung. (Bild 13)





Die Vasen wurden konservatorisch behandelt, (Bild 14). Neben einer Versorgung einiger Risse durch Injektion mit Kalkmörtel bedeutete dies auch das Ansetzen erhaltener Bruchstücke und das sehr zurückhaltende Ergänzen kleinerer Schadstellen mit angepasstem Kalkmörtel (Bilder 15 und 16). Einige größere Ausbrüche, vor allem im Bereich der Plinthen, wurden durch Vierungen aus Kelheimer Kalkstein in seiner feinsten Varietät repariert (Bild 17). Im Depot aufbewahrte Vasenkörper konnten wiederverwendet werden. Dazu musste in einem Fall eine große Fehlstelle mit Steinersatzmasse aufmodelliert und ein Fuß als Neuteil ange-setzt werden.

Zwei fehlende Vasen sowie die zusätzlichen Deckel wurden durch eine Kopie im Steinguss hergestellt. Dazu wurde ein Original mit einer reversiblen Trennschicht versehen, einige Unterschneidungen abgestellt und eine Form aus Silikonkautschuk mit Stützkappen angefertigt (Bilder 18 und 21). Der Abguss erfolgte mit einem extra konfektionierten Mörtel mit Epoxidharzbindung, dem feinste Glas-kugeln als Leichtbaustoff beigegeben wurden (Bild 19 und 20).

Alle Vasen sind nach Fertigstellung mit Acryl-Dispersion und Pigmenten retuschiert worden, da verbleibende dunkle Flecken des Flechtenbewuchses aus Gründen der Schonung nicht ab-

genommen worden waren. Mit einer sehr dünnen aufmassierten Schlämlasur (Historic Schlämlasur, Remmers) wurde ein Witterungs- und Verschleißschutz zusätzlich aufgetragen.

Bild 15
Fehlstelle an einer
Widderkopfvase

Bild 16
Mörtelerneuerung des Widder-
horns (Zwischenzustand)



Bild 17
Herstellung einer Vierung aus
Kelheimer Kalkstein

Bild 18

Ausschalen des Abgusses
aus der Silikonform



Bild 19

Detail: Widderkopfvase/
Original



Bild 20

Detail: Widderkopfvase/Kopie



Bild 21

Detail der Gußform



Bild 22

Wiederaufbau der Kaskade



Bild 23

Aufbau der Voluten-Abdeckung



Bild 24

Versetzen der Schwellensteine
mit Romanzement



Bild 25

Übersichtsaufnahme:
Versetzarbeiten



An Ort und Stelle wurden zwischenzeitlich die Seitenwangen und die Wasserstufen bauseits erneuert. Die restaurierten Natursteinteile konnten in mehreren Arbeitskämpfen nach Rücktransport wieder aufgebaut werden.

Unter Verwendung der Drehkräne und weiteren Hebzeuges wurden die Abdeckplatten in ein Mörtelbett aus Romazement gesetzt; dabei diente die unterseitige Mörtelbeschichtung der verbesserten Anhaftung (Bild 22). Die aus thermischen Gründen verformten und nicht mehr planebenen Einzelstücke mussten durch Ausgleich im Versetzmörtel möglichst gerade ausgerichtet werden, was teilweise zu ungewöhnlich hohen Mörtelräumen führte (Bild 23).

Die Schwellen wurden nicht mehr unter die früher vorhandenen seitlichen Betonkanten eingebaut. Sie sind auf das jeweils vorhandene lichte Innenmaß abgekürzt und ebenfalls mit Romazementmörtel versetzt worden (Bild 24).

Die Stoßfugen wurden mit Bleiwolle verstemmt, um die zu erwartenden Bewegungen auf Grund der Hanglage und der großen Länge der Seitenmauern durch die Elastizität des Materials mit der Möglichkeit des Nachverdichtens berücksichtigen zu können.

Nach Abschluss des Wiederaufbaus der seitlichen Abdeckungen (Bild 25) konnten die restaurierten Vasen und die Abgüsse an den ursprünglichen Aufstellungsorten wieder angebracht werden (Bild 26). Ein Winterschutz ist soweit bekannt vorgesehen.



Bild 26

Versetzen der Vasen

Bild 27

Wiederversetzte Vase,
vgl. Bild 4

Bild 28

Abschlussaufnahme mit Blick
zum Pavillon

Sobald die Metallfiguren des Neptunbrunnens wieder aufgestellt worden sind, werden die profilierten Einfassungen des Beckens wieder versetzt. Hier wurde die ursprüngliche Symmetrie wiederhergestellt. Durch Verschiebungen hatten sich weit klaffende und ausbetonierte Stoßfugen ergeben. Die Grottenrückwand und die kleinen Grottenhügel werden ebenfalls repariert, wobei Kalksintertuff aus bauseitigem Bestand bzw. vorhandenen Abbaustellen sowie Romanzementmörtel zum Einsatz kommen. Die Abdecksteine der Rückwand werden wie ursprünglich durch Gussteile aus Romanzement anstelle der völlig aufgefrorenen Bestandstücke ersetzt.

Sämtliche Arbeiten wurden in Orts- und Werkstattterminen unter Federführung des Fachbauleiters Markus Lohr entsprechend des Leistungsfortschritts überprüft und festgelegt. Eine Dokumentation durch fotografische Darstellungen (Bilder 27 bis 29: Endzustand), Kartierung in bauseitige Pläne und einen Arbeitsbericht mit Angabe der verwendeten Materialien wird nach Abschluss aller Arbeiten erstellt und in mehreren Exemplaren dem Auftraggeber überreicht.

Bildnachweis

Alle Bilder: Fa. Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH
Bild 5:



Bild 29
Abschlussaufnahme der
Kaskade mit Blick zum Schloss

NR.	STRA.	DES.	REVISION
A	28.03.22	NAME	ÜBERLIEFERUNG
Lageplan			
P5_06274_LiHoF_F_LP_BE02 PLANNR. INDEX			
FREISTAAT BAYERN STAATLICHES BAUAMT WEILHEIM			
Wiesener Straße 16, 82302 München, TEL. 089 / 159 4 2 100-2 FAX. 089 / 159 4 2 100-2 275, E-MAIL: poststelle@staatsbauamt.bayern.de			
SCHLOSS LINDERHOF SANIERUNG FREIANLAGEN			
GEB.-NR 06274			
LAGEPLAN Baustelleneinrichtung II - Kräne			
AFU			
M 1:100			
BRUNNEN-NR. 06274-2-000	KAP. TITEL 00000000	GEZ. VON 01/08	GEZ. AM 03.08.2017
STAND 02.10.2017		AUFGABEN 01.08.2017	
NOTIZEN 001-42			
LAGEPLAN: ÜBERSICHTSANSICHT			
Anschlüsse oder Parkpläne			
Freizeitanlagen oder Wege			
FRIEDLICHE ANSICHT			
FRIEDLICHE ANSICHT			
DIT. ANMERKUNGEN BRUNST			
ÜBERSICHTSANSICHT VON 1:8			
DATE:			
PLANNR. INDEX P5_06274_LiHoF_F_LP_BE02			

Statische Sicherungen erdbebengefährdeter Pfeiler und Türme in Basel (CH) und auf der Schwäbischen Alb



Aus Natursteinen bestehende Pfeiler und Türme reagieren als vertikal ausgerichtete Bauwerke oder Bauglieder sehr sensibel auf horizontale Lastenleitungen, die durch Erdbeben verursacht werden. Die statischen Sicherungen bzw. Reparaturen bei bestehenden Vorschädigungen müssen deshalb entsprechend sorgfältig, umfassend und vorrausschauend erfolgen. Zwei beispielhafte Lösungsansätze von statischen Sicherungen in erdbebengefährdeten Gebieten werden aufgezeigt.

Ronald Betzold

1 Erdbebenzonen in Deutschland und der Schweiz

Die geologische Struktur des Oberrheingrabens, welcher vor ca. 50 Millionen Jahren entstand und an dessen südlichem Ende die Basel-Region liegt, zeichnet sich hauptsächlich verantwortlich für eine Vielzahl kleinerer und größerer Erdbeben aus. Der Oberrheingraben trennt seit seiner Entstehung zunehmend den Schwarzwald von den Vogesen. Die dortige Erdkruste markiert eine ständig aufbrechende Wunde. In Deutschland und der Schweiz werden jedoch auch schwere Beben mitten auf der Europäischen Kontinentalplatte registriert. Basierend auf der seismischen Gefährdung berücksichtigen spezielle Risikomodelle den Einfluss des lokalen Untergrundes sowie die Verletzbarkeit von Gebäuden und Infrastrukturen (Bilder 2 und 3).

Am 18. Oktober 1356 erschütterte die Stadt Basel ein sehr schweres Beben (Magnitude von 6.7). Diesem Beben ging mindestens ein Vorbeben voraus. Das Erdbeben von Basel stellt das größte nördlich des Alpenhauptkammes historisch dokumentierte Beben dar. Die verheerenden Auswirkungen wur-

den vielfach in Aufzeichnungen und Bildern dargestellt (Bild 1).

Vor 5 Millionen Jahren kam es im Bereich der Schwäbischen Alb durch den enormen Druck bei der Auffaltung der Alpen ebenfalls zu einer lokalen Verwerfung. Hierbei entstand der Zollerngraben. Seismologen sehen die Ursache der Erdbeben auf der Schwäbischen Alb jedoch schwerpunktmäßig in der dort in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Albstadt-Scherzone (Bild 4). Diese Zone verläuft 5 bis 10 Kilometer unter der Erdoberfläche und ist ca. 1,5 Kilometer breit und 30 Kilometer lang. 1978 ereignete sich ein schweres Erdbeben (Magnitude 5,7) auf der Schwäbischen Alb, das große Schäden besonders in Albstadt anrichtete. Der Gesamtschaden betrug ca. 275 Millionen DM, dies entspricht 140 Millionen €.

In [2] schreibt Herbert Blauß danach von vernünftigen »historischen«, erdbebensicheren Reparaturmaßnahmen in der Albstadt-Scherzone. »Da auch künftig im Bereich der Albstadt-Scherzone mit ähnlich schweren Erdbeben zu rechnen ist, war bei den sofort anstehenden Reparaturarbeiten das Hauptaugenmerk darauf zu legen, durch entspre-



Bild 1
historische Darstellung
Erdbeben Basel 1356

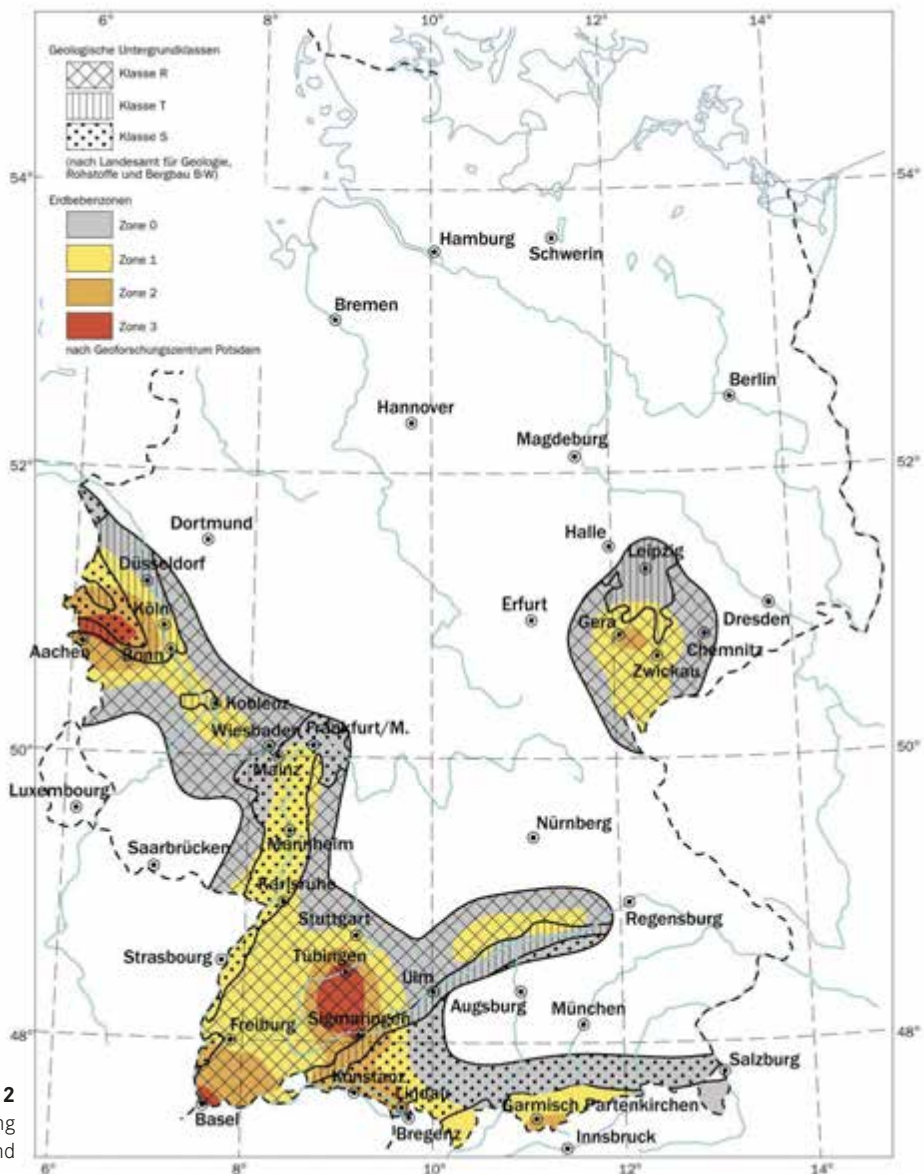


Bild 2
Karte Erdbebengefährdung
in Deutschland



Bild 3
Komponenten Erdbebenrisiko,
Beispiel Schweiz

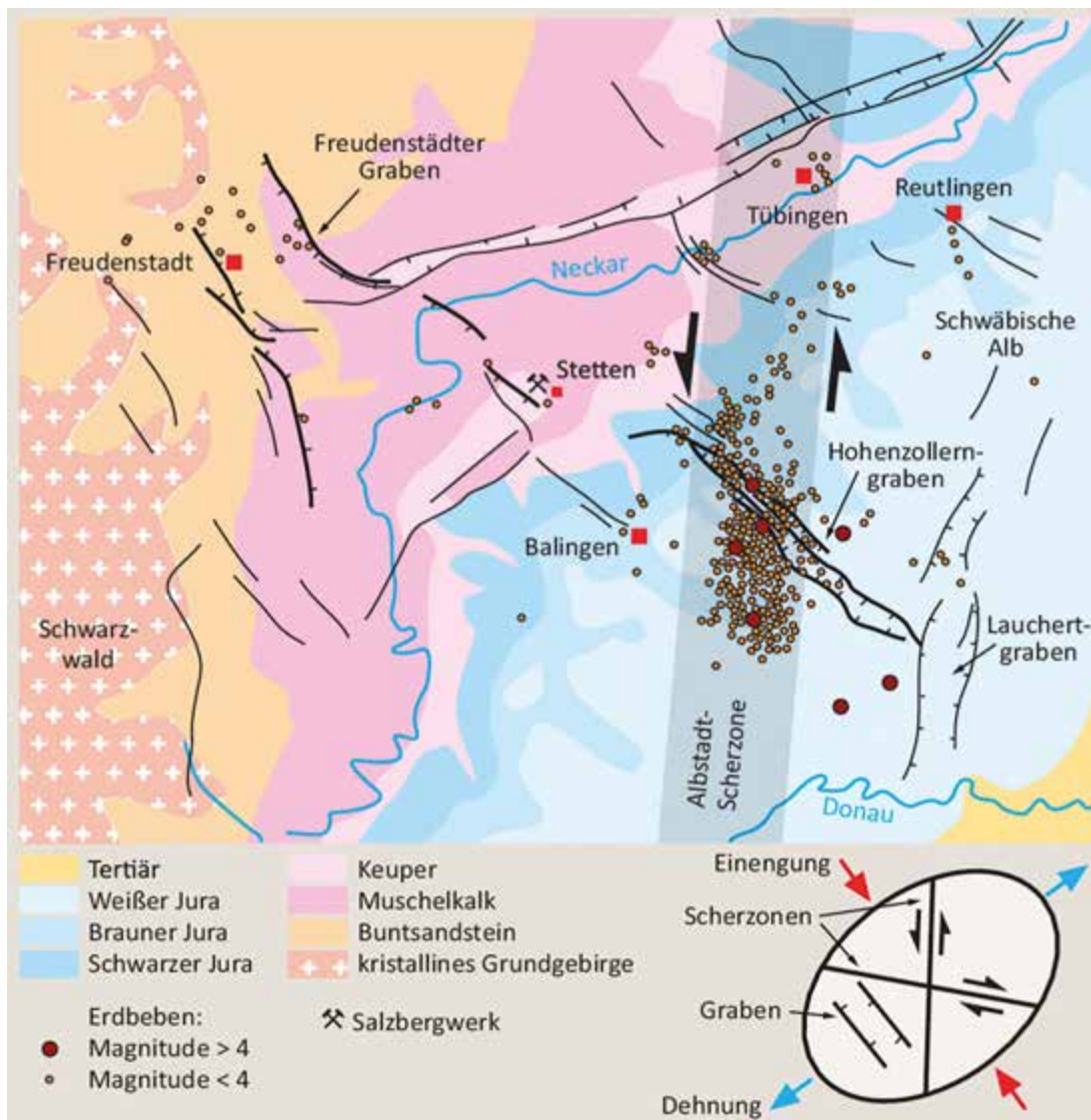


Bild 4
Albstadt-Scherzone
Hohenzollerngraben

chende konstruktive Maßnahmen zwischen den einzelnen Gebäudeteilen zugfeste Verbindungen herzustellen. Die Reparatur der tragenden Bauteile erfolgte hierbei auf verschiedene Art und Weise. Sofern gemauerte Giebelwände abgetragen und erneuert werden mussten, wurden die Ecken dieser Wände in Stahlbeton ausgeführt und mit den Längswänden und den Geschoßdecken zugfest verbunden. Dieses Verfahren ist auch dort angewandt worden, wo die Außenwände senkrechte Risse aufwiesen, jedoch nicht so stark beschädigt waren, dass sie abgetragen werden mussten. In Einzelfällen wurden die Gebäudeecken in Stahlwinkel gefasst, die jeweils in Geschoßhöhe miteinander verbunden worden sind. Durch Einbau von Spannelementen in den Verbindungsstäben war es möglich, im Zuge der Reparaturen eine Art Vor-

spannung auf das Mauerwerk der Außenwände aufzubringen, wodurch dem Baukörper wieder sein innerer Zusammenhalt gegeben werden konnte, ohne dass Außenwände in größerem Umfang entfernt werden mussten.« [2]

2 Bruchverhalten von Natursteinmauerwerk

Natursteinmauerwerk ist i. d. R. ausreichend druckfest, versagt jedoch relativ schnell bei Zugbelastung. Durch Erdbeben wird eine große Horizontalbeschleunigung erzeugt. Hierbei werden Bauwerke oder Bauglieder, welche vorwiegend für eine ruhende Vertikallast ausgelegt sind, zusätzlich durch eine dynamische Horizontalkraft belastet. In den

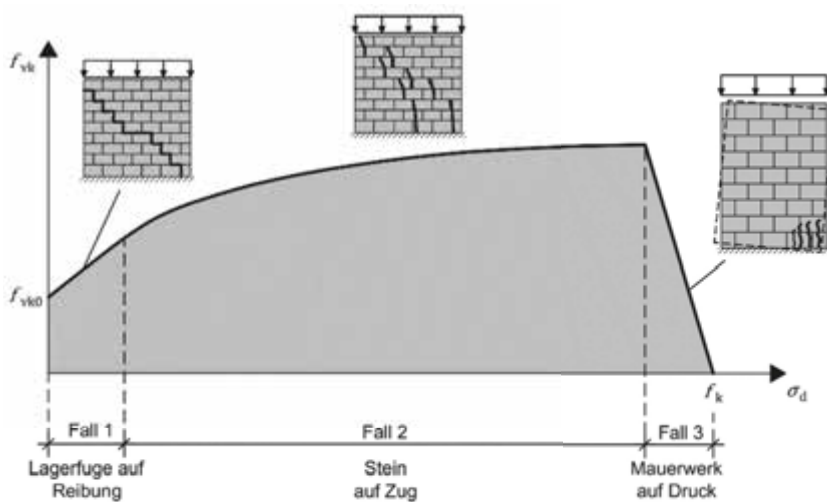


Bild 5 Versagensarten bei Schub

Fällen, wo zulässige Spannungen in den tragenden Bauteilen durch die normale Belastung voll ausgenutzt oder gar schon überschritten werden und keine Tragfähigkeitsreserven mehr vorhanden sind, führen zusätzliche Horizontalkräfte zu Schäden. Die Auswirkungen im Mauerwerk bei Auftreten von Schubspannungen sind differenziert und richten sich nach den vorhandenen Druckspannungen. Mauerwerksbauten müssen konstruktiv erdbebensicher ausgebildet werden. Dabei ist oft die Errichtung von bewehrtem Mauerwerk eine Möglichkeit, unbewehrtes bzw. nicht eingefasstes Mauerwerk ist ungeeignet. Zur Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit von Mauerwerk ist die Höhe der Scherfestigkeit (Schubspannung) sehr wichtig. Der Grenzzustand der Schubfestigkeit wird erreicht, wenn es zu einem Fugenversagen, Steinzugversagen oder einem Steindruckversagen kommt. Die Schubfestigkeit von Mauerwerk ist im Unterschied zur Mauerwerksdruckfestigkeit kein fester Wert. Sie ergibt sich abhängig vom konkreten Lastzustand.

Versagensarten bei Schub (Bild 5)

Fugenversagen

Ein Fugenversagen bedeutet oft ein Versagen durch Horizontalschub. Liegen nur geringe Auflasten vor, werden die aufnehmbaren Scherspannungen in den Mörtelfugen (Lagerfugen) überschritten und es entstehen durch das Reibungsversagen Abrisse

bzw. kommt es zu einem Aufklaffen der Fugen. Das Erscheinungsbild kann sich gerade oder abgetreppt darstellen.

Steinzugversagen

Bei Überschreiten der Steinzugfestigkeit spricht man von Steinzugversagen. Bei einer Steigerung der Auflasten unter Beibehaltung des Horizontalschubes ändert sich der Neigungswinkel der resultierenden Kraft und somit die Beanspruchung in der Wand. Die in den Steinen entstehenden schrägen Querkraftkomponenten führen bei Erreichen des Grenzwertes der Steinzugfestigkeit zum Aufreißen der Steine. Man erhält eine spröde Bruchfläche.

Steindruckversagen

Ein Steindruckversagen liegt vor, wenn die Steindruckfestigkeit überschritten wird. Beim weiteren Erhöhen der Vertikalkräfte entstehen stark geneigte Druckstreben im Wandkörper. Im Grenzfall kann es zum Druckbruch im randnahen Wandbereich kommen, da sich dort die Druckspannungstrajektorien konzentrieren und die resultierende Querkraftkomponente die vorhandene Druckfestigkeit des Mauerwerks reduziert. Die aufnehmbare Schubspannung darf nicht größer sein als die Differenz zwischen vorhandener Normalspannung und Mauerwerksfestigkeit, welche nicht überschritten werden kann.

3 Statische Sicherungen in erdbebengefährdeten Gebieten

3.1 Beispiel Basel, Hauptpost

Der Gebäudekomplex der Basler Hauptpost stammt im Kern aus dem Spätmittelalter. 1853 errichtete die Stadt für die Post einen Neubau an der Freien Straße. Bereits 1878 musste der Bau gegen die Rüdengasse hin erweitert werden (Bild 6). Hier befindet sich heute der Haupteingang mit der großartigen Schalterhalle. Sie gehört zu den größten Profansälen des Historismus in der Schweiz (Bild 7).



Das Gebäude ist ein viergeschossiger Mauerwerksbau mit Unterkellerung. Im Eingangsbereich zur eigentlichen Schalterhalle ist eine Vorhalle angeordnet, welche wie die Schalterhalle über die beiden ersten Geschosse reicht. Außerhalb der Schalterhalle und der Vorhalle ist das Erdgeschoss vollständig ausgebildet und mit einer Decke zum OG abgeschlossen. Die Decke zum 2. OG über der Schalterhalle und der Vorhalle sind mit Kreuzgratgewölben überspannt, welche in der Schalterhalle durch Gussstützen und in der Vorhalle durch die beiden schlanken Pfeiler unter den Außenwandbögen und die wesentlich kräftiger ausgebildeten Pfeiler zur Schalterhalle hin getragen werden. Alle Pfeiler sowie auch die gesamte Außenwand sind aus Sandsteinquadern mit Fugendicken im Bereich von etwa 7 mm ausgeführt. Die beiden Vorhallen-Pfeiler stehen auf massivem Kellermauerwerk, welches nach den vorliegenden Plänen unmittelbar neben dem linken Pfeiler durch eine größere Öffnung, für den dort gelegenen Birsigkanal, unterbrochen ist (Bild 9). Der derzeitige Baukörper wurde nach mehreren rivalisierenden Planungskonzepten 1880 fertiggestellt.

Veranlassung

Am rechten Sandsteinpfeiler unter den Fassadenbögen der Fassade zur Rüdengasse waren massive Risssschäden aufgetreten. In Vorbereitung der statischen Sanierung dieser Risssschäden bzw. Ertüch-

tigung des geschädigten Bereiches wurde ein Laserscan der gesamten Fassade (Bild 8) durchgeführt, dessen Ergebnisse ausgewertet und einer Bewertung unterzogen worden (Bilder 10 und 11). Die übliche Genauigkeit dieser Laserscanergebnisse liegt bei den vorliegenden Randbedingungen und den betrachteten Bauteilen im Bereich von etwa 1–2 mm, wobei erfahrungsgemäß durch Mittelungen von Linien und Flächen über eine größere Zahl von Stützpunkten die tatsächlichen und verwertbaren Genauigkeiten in etwa der gleichen Größenordnung liegen. Bei Auffälligkeiten ist stets auch zu beurteilen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass diese bereits beim Bau infolge von Maßungenauigkeiten entstanden sind. Für die statische Bewertung waren folgende Fragestellungen relevant:

Gibt es globale Verformungen an der Fassade in horizontaler und vertikaler Richtung, die darauf hindeuten, dass dem geschädigten Pfeiler Zwängungen oder größere Umlagerungseffekte aufgezungen wurden?

Sind Anzeichen dafür vorhanden, dass bereits eine größere Schädigung der betroffenen Pfeiler über die sichtbaren Risssschäden hinaus eingetreten ist?

Auf Grundlage der Beantwortung dieser Fragestellungen konnten detailliertere statische Untersuchungen erfolgen und Vorschläge für eine dauerhafte Sanierung/Ertüchtigung des Pfeilers ausgearbeitet werden.

Bild 6

Basel Hauptpost
Fassadenansicht

Bild 7

Schalterhalle - Herzstück der
Hauptpost von 1880

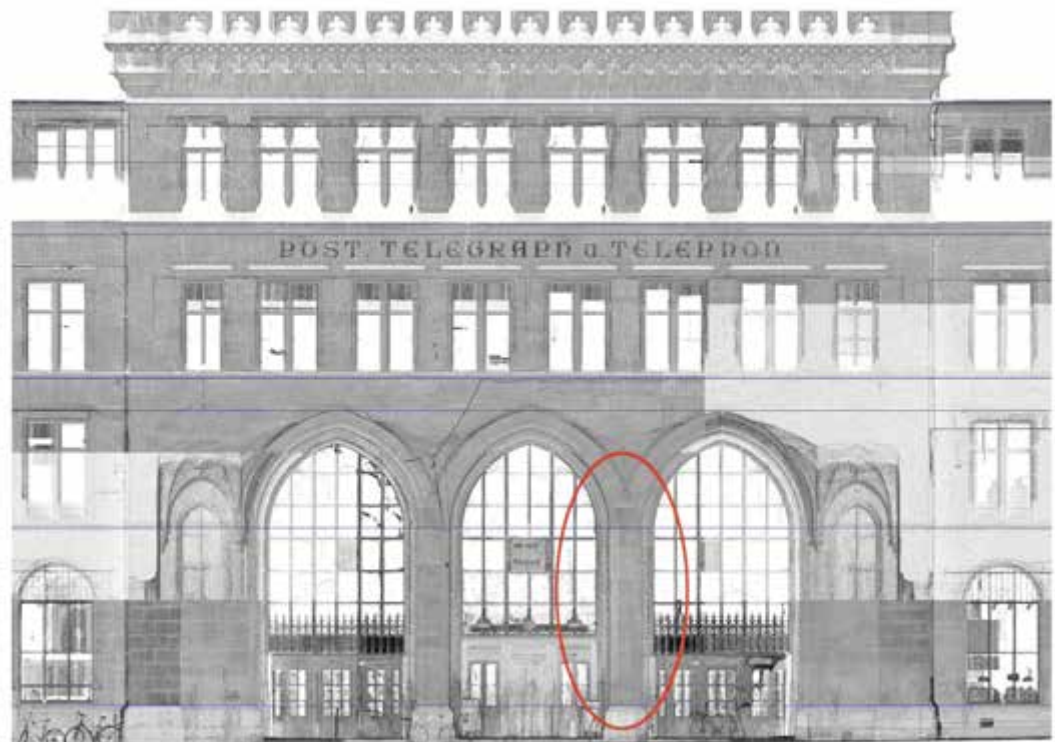


Bild 8
Laserscan Pfeiler
(rechts) Rüdengasse

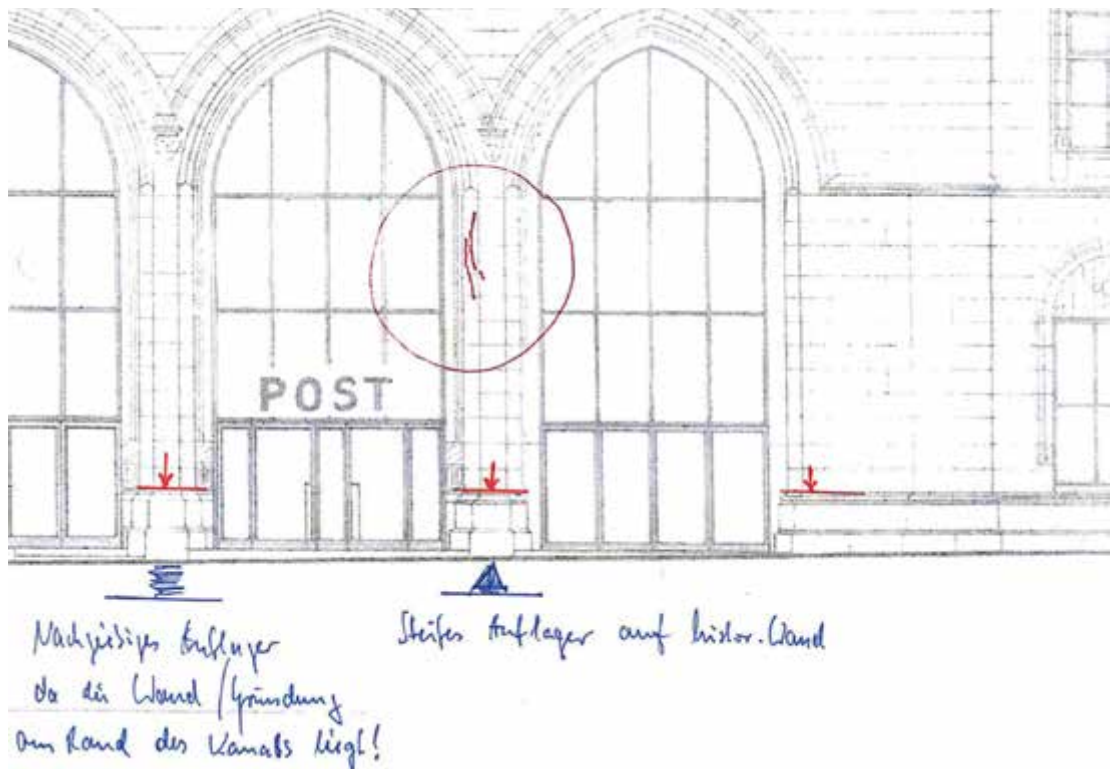


Bild 9
Recherche Gründungs-
situation – linke Säule
oberhalb Kanal Birsig

Verformungen

Wie ermittelt wurde, kippt die gesamte Fassade nach außen, wobei der Überhang auf die Fassadenhöhe bis zu etwa 90 mm beträgt. In der Tendenz ist

dieser Überhang im mittleren Bereich größer als an den beiden Fassadenenden. Das lässt darauf schließen, dass es sich nicht um einen systematischen Effekt aus dem Bau des Gebäudes, sondern

tatsächlich um Verformungen aus statischen Einwirkungen handelt. Einer dieser statischen Effekte wurde im Horizontalschub aus den Kreuzgratgewölben der Vorhalle vermutet. Da die Hauptpfeiler zur Schalterhalle hin keine messbare Schiefstellung haben, ist als alleinige Ursache ein Gewölbeschub aus der Schalterhalle auszuschließen. Auffällig ist aber, dass die Schiefstellungen im Bereich der Obergeschosse größer sind als die bis zum Gesims über den Bögen der Vorhalle. An den Fugenbildern und Gesimsen konnte keine relevante vertikale Verformung erkannt werden. Werden die beiden Fassadenpfeiler an der Vorhalle untersucht, so sind deutliche Unterschiede zwischen diesen zu erkennen. Ausgewertet wurde die Lage der Flächenschwerpunkte der Horizontalschnitte der Pfeiler (Bild 10). Die Auswertung der Lage der Flächenschwerpunkte ist sehr aussagekräftig, da sie eine Mittelung über alle Messwerte des jeweiligen Schnittes darstellen. Der linke Pfeiler zeigt eine resultierende Schiefstellung von etwa 10 mm und der rechte, geschädigte Pfeiler etwa 16 mm (Bild 11), wobei interessant ist, dass die resultierende Bewegung jeweils nach außen und zur Mitte hin zwischen beiden Pfeilern zeigt. Wertet man die Eigenverformungen der Pfeiler auf Grundlage der Seitenflächen aus, so ist deutlich die stärkere Krümmung des geschädigten Pfeilers erkennbar. Diese Verformung ist mit Sicherheit nicht Ursache der Schäden, sondern deren Folge – die Krümmung des Pfeilerquerschnittes hat hier infolge des lokalen Entzuges der Druckspannungen überproportional zugenommen.

Schlussfolgerungen

Aus den Auswertungen der Verformungen der relevanten Fassadenbereiche ließ sich keine mechanische Ursache erkennen, die zu den Schäden am rechten Sandsteinpfeiler geführt haben könnte. Es ist auch nicht zu erkennen, dass externe Lastumlagerungen zu einer erhöhten Belastung des geschädigten Pfeilers führten. Damit bestand auch nicht die Notwendigkeit zu vorlaufenden Sanierungen und Ertüchtigungen an anderen Bauteilen, sondern die weitere Planung konnte voll auf die Behandlung des geschädigten Pfeilers fokussiert werden. Hinsichtlich der eigentlichen Schadens-

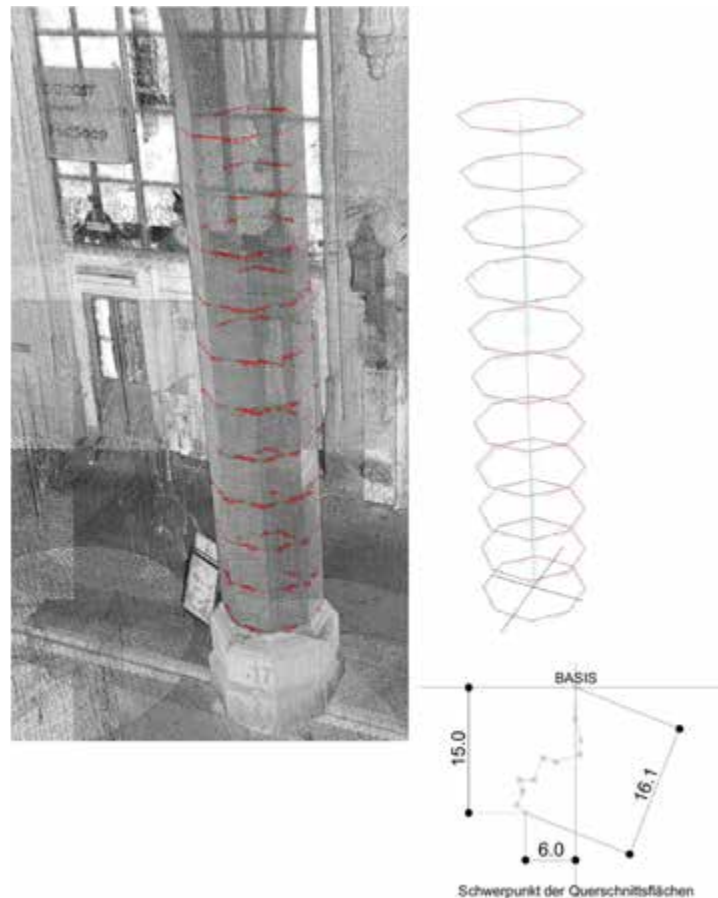


Bild 10
Schwerpunkte der Pfeiler –
Querschnittsflächen

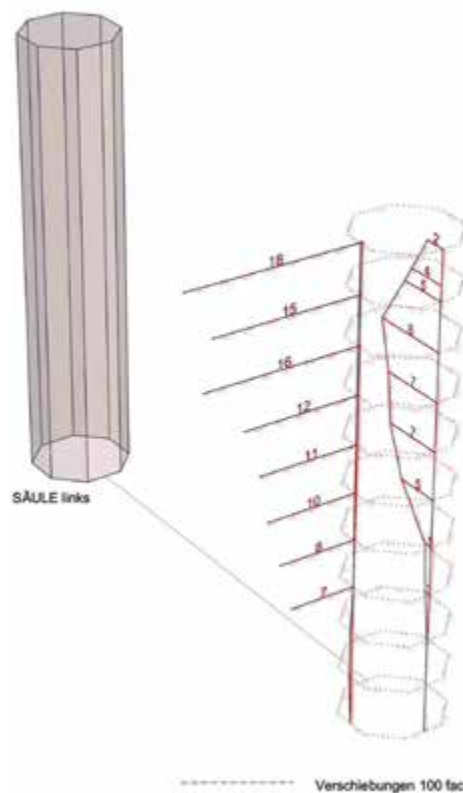


Bild 11
Verschiebungen der
Pfeilerachse

Bild 12
Rissbild exemplarisch



Bild 13
Detail Risstiefe



ursache war davon auszugehen, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit lokale Festigkeitsdefizite der Sandsteinquader, ggf. auch der Verfugung eine Initialwirkung hatten und sich dann infolge der hohen Druckspannungen Risse wegen nicht ausreichender Behinderung der Querdehnungen eingestellt haben. [1]

Maßnahmen am rechten Pfeiler

Die Maßnahmen am rechten Pfeiler im Bereich des Haupteingangs zur Post umfassten ein 3D-Laser-scanning der ganzen Fassade Rüdengasse, die Tragwerksplanung und statische Bauüberwachung, die statische Ertüchtigung des Pfeilers sowie stein-

konservatorische und steinrestauratorische Maßnahmen am Pfeilerschaft. Zur Kontrolle der Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen erfolgte abschließend die Installation von mehreren mechanischen Rissmonitoren (Bild 21).

Im Laufe der Bauausführung wurden massive Risse sowie erhebliche Hohlräume innerhalb des Pfeilerschaftes lokalisiert (Bilder 12 und 13). Dieses vorhandene Hohlraumvolumen führte zwangsläufig zu einer Umlagerung der vorhandenen hohen Druckspannungen aus dem Kernbereich des Pfeilers heraus nach außen und verursachte dort y-förmige, komplett durchgehende Risse in 6 Sandsteintrommeln, die dadurch faktisch in je 3 Einzelteile zerissen wurden. Frühere Sanierungen, datiert im

Bild 14
Aufweiten der Fuge
mittels Schlitzfräse



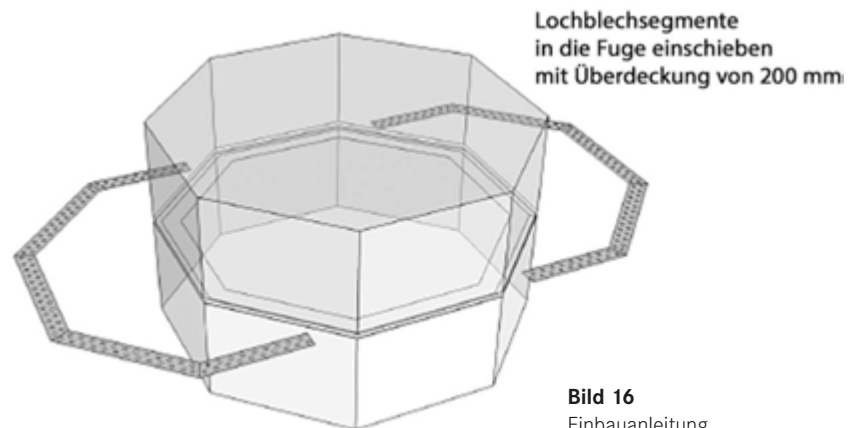
Bild 15
konfektionierte Fugenarmierung



Jahr 1979, mittels nahezu oberflächigen Rissverschluss sowie einer begrenzten Vernadelung erwiesen sich als unzulänglich.

Statische Ertüchtigung des Pfeilers

Sie umfasste das Einfräsen von umlaufenden Schlitzn im Bereich der Stoßfugen mit einer Schlitzbreite von max. 10 mm und einer Tiefe bis 75 mm (Bild 14), sorgfältiges Säubern sowie Ausblasen mit Druckluft, Einbringen einer Fugenarmierung, bestehend aus gelaserten Edelstahllochbändern der Dimension 50/2 mm -V4A, Wst.-Nr. 1.4571/Z-17.1-603, welche aus je zwei Halbelementen incl. Abwinkelung mit 135° zum oktagonalem Querschnitt zusammengesetzt wurden (Bilder 15, 16 und 17). Die Fugenarmierung wurde mit ca. 10 KN vorgespannt und anschließend ist das gesamte Fugenvolumen, 20 mm von der Steinoberfläche zurückliegend, vollflächig in zwei Lagen mit verschiedenen Epoxidharzmörteln verpresst worden (Bild 18). Das Einbringen einer Vorspannung war erforderlich zum Erreichen einer ausreichenden Druckspannung. Die nach außen abschließende Deckverfugung erfolgte mit einem Kalk-Zementmörtel, nachdem die obere Epoxidharzmörtellage zum besseren Haftverbund mit Quarzsand abgestreut wurde. Der »weiche« Deckfugenmörtel verhindert eventuelle Abplatzungen an der Oberfläche des Pfeilerschaftes. Parallel zur Verpressung der tieferen Fugenlagen erfolgte die Verfüllung des festgestellten Hohlraumvolumens sowie der Rissverschluss mit einem Injektionsmörtel auf Epoxidharzbasis (Bilder 18 und 20). Die gewählte Verfugungstechnologie verfolgte die Zielstellung einer Behinderung der Querdehnung sowie des Entgegenwirkens von Rissbildungen parallel zur Richtung der Hauptdruckspannungen. Das ergänzende Herstellen lokaler Vernadelungen mittels Klebeanker erfolgte orthogonal zu den Rissverläufen im Sinne einer Optimierung der Querdehnungsbehinderung, zur Kompensierung der verloren gegangenen Steinzugfestigkeit im Rissbereich sowie zur Kompensierung lokaler Abtriebskräfte. Eingeklebt wurden Gewindestäbe M8 V4A, Länge 700 mm mittels Verbundankermörtel Hilti Hit HY 270, incl. Herstellen der Bohrungen (drehendes Bohrverfahren, d = 12 mm, Tiefe 700 mm), (Bild 19).



Lochblechsegmente
in die Fuge einschieben
mit Überdeckung von 200 mm

Bild 16
Einbauanleitung
Lochblechsegmente

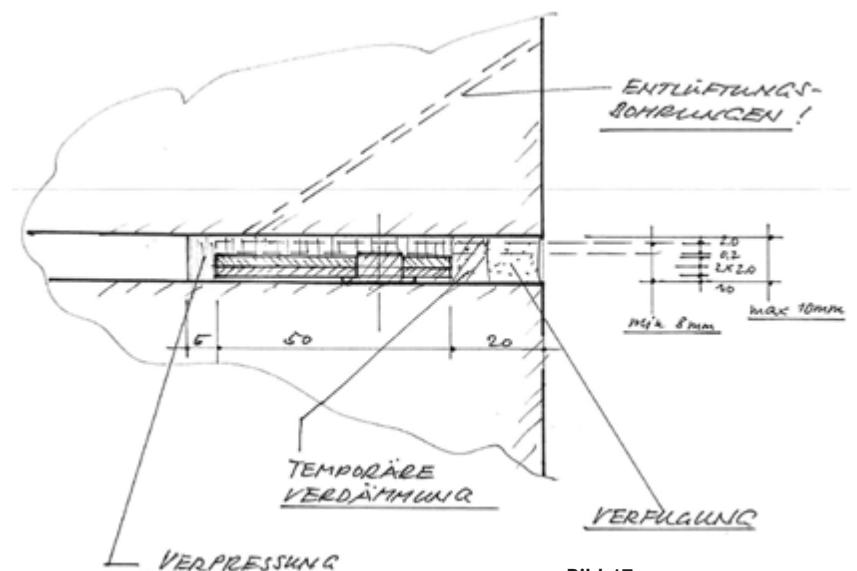
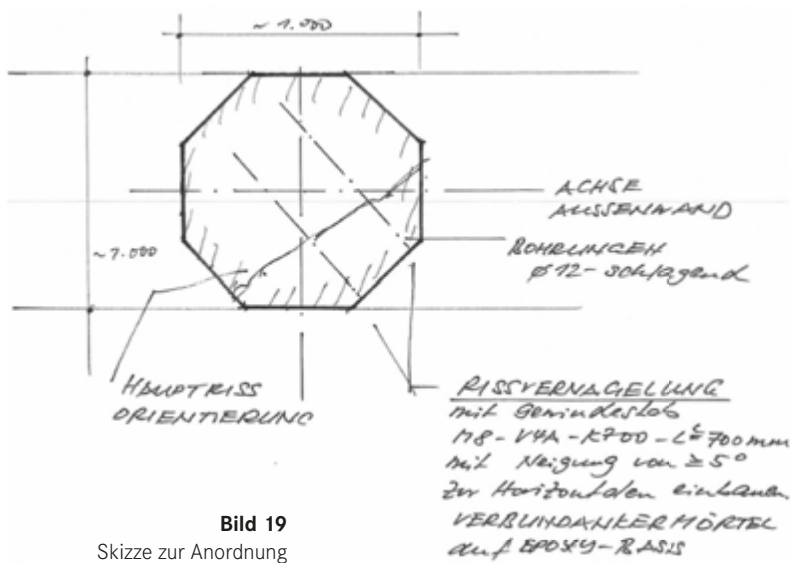


Bild 17
Detail Aufbau Fugenarmierung



Bild 18
Kontrolle Viskosität Epoxidharzmörtel bei Haarrissen, Probeverpressung

**Bild 19**

Skizze zur Anordnung
Querzugvernadelung

RISSVERNAEELUNG M 1:1,5
Gesamt-mengen:
25 Stck. L=700 mm

**Bild 20**

Pfeiler nach Hohlraumverfüllung
und vollflächiger Verklebung
Lochblechsegmente

**Bild 21**

Rissmonitor an Pfeilerrückseite

**Bild 22**

Gomaringen Evangelische
Kirche Fassadenansicht

3.2 Beispiel Gomaringen, Evangelische Kirche (Schwäbische Alb)

Die Evangelische Kirche in Gomaringen liegt im Erdbebengebiet Schwäbische Alb (Bild 22). Die Bausubstanz der gesamten Kirche war gekennzeichnet von einer Vielzahl von starken Rissen, besonders im Bereich der vier Turmseiten sowie generell im Scheitelbereich sämtlicher Fenster des Kirchenschiffes. Der gemauerte Westgiebel drohte abzustürzen, sowohl die Aufhängung der Glocken als auch das Gebälk im Turm und Schiff waren schadhaft. Die Risse im Mauerwerk wurden in ihrer eigentlichen Dimension erst nach Entfernen des Putzes erfassbar (Bilder 23 und 24). Besonders die Vertikalrisse im Turm lassen als Ursache eine Erdbebeneinwirkung vermuten. Die hierbei eingebrachten Schwingungen hätten sich sicher theoretisch in der Gesamtschwingung des Turmes mit denen aus dem Läuten der Glocken superpositioniert, da die Teilschwingungszahlen der Glocken sich in Frequenznähe zur Eigenschwingung des Turmes befanden. Festgestellt wurde diese kritische Resonanz durch entsprechende baodynamische Untersuchungen. Aus diesem Grund sind die Glocken jahrelang nicht geläutet worden. Im Zuge der statisch erforderlichen Turmsanierung wurde

daher flankierend eine Optimierung der Glockensteuerung durch eine Änderung der Schlagzahl vorgenommen.

Statische Ertüchtigung des Turmmauerwerkes

Als Kernmaßnahme wurde die Ebene der Glockenstube durch zwei horizontal komplett umlaufende Zugankersysteme zusätzlich versteift (Bilder 25 und 26). Bei den Turmmauerwerk-Zugankersystemen erfolgte dabei der Einbau von Umlenkprofilen.

Beim nachträglichen Einbau von Zugankern in historisches Turmmauerwerk, z.B. im Zuge einer Mauerwerkssanierung, werden nach Herstellung der Bohrkanäle mittels Kernbohrungen Gewindestangen, Ankerplatten sowie ggf. Betonpolster i.d.R. ohne direkten Kontakt eingebracht. Die Kraftumlenkung erfolgt über das Mauerwerk, welches dadurch jedoch zusätzlich eine Scherbelastung erfährt. Je Gebäudeecke sind bei dieser kon-



Bild 23
Turmfenster stark ausgeprägtes Rissbild exemplarisch (nach Abnahme Putz)

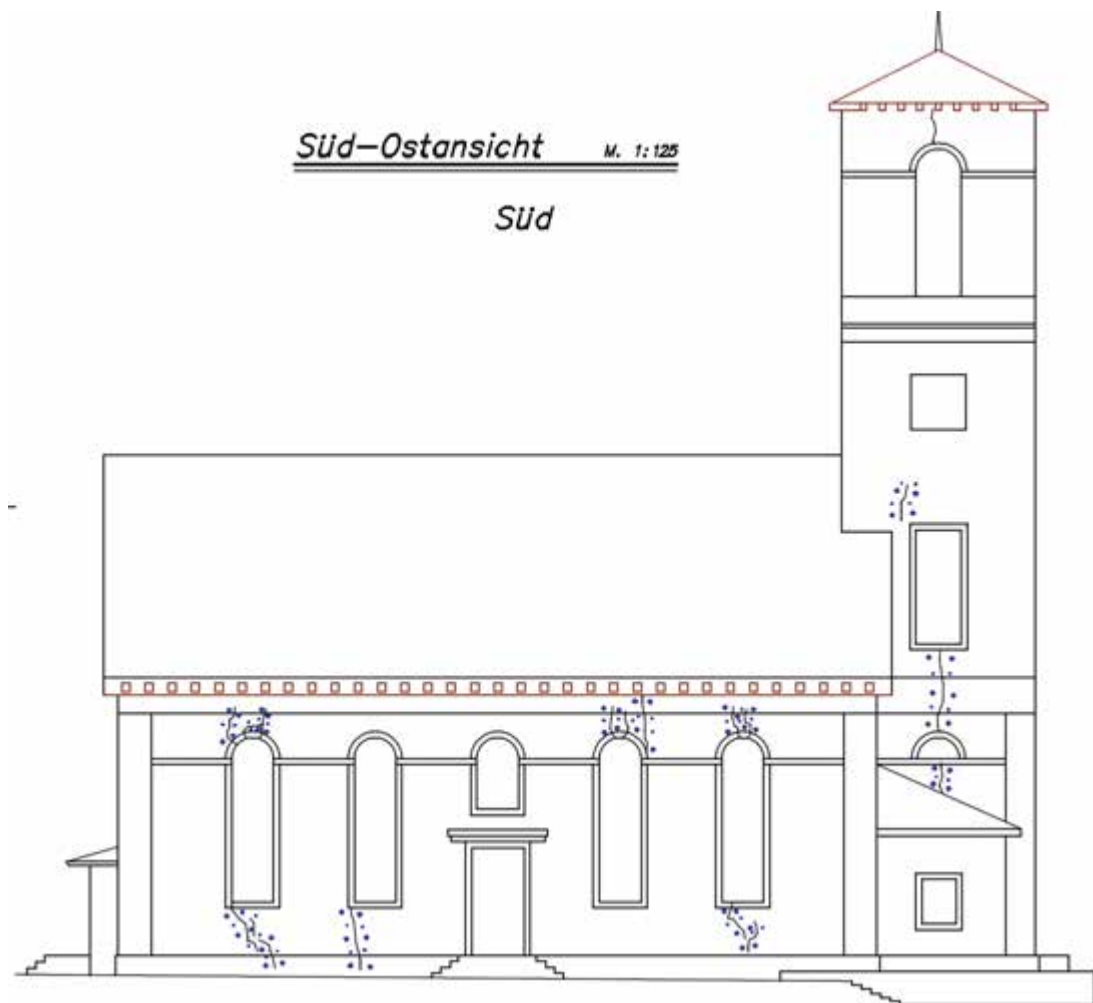
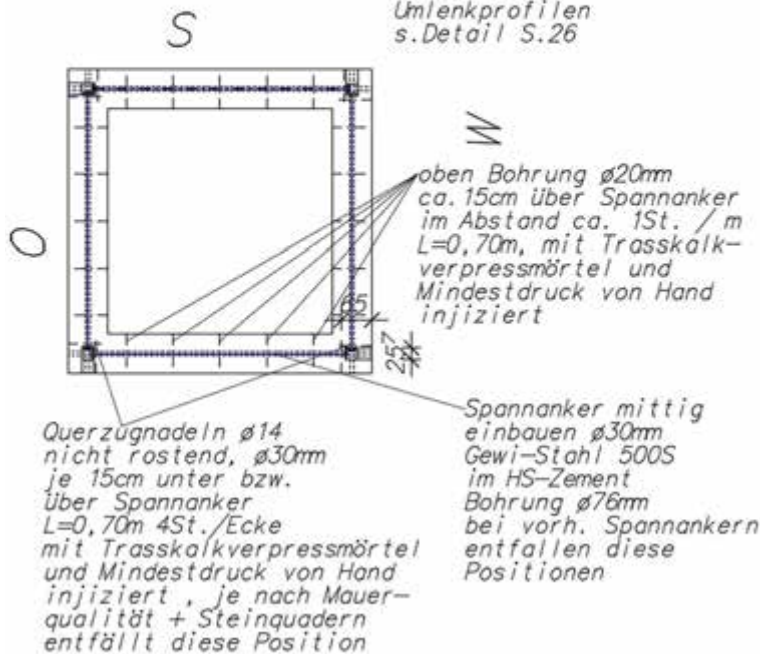


Bild 24
Risskartierung Süd-Ost-Ansicht Turm (nur Putzrisse!)

Grundriss Turm M. 1:100

Sämtliche Fugen müssen vor den Verpressarbeiten geschlossen sein
Lage der Bohrungen vor Ausführung mit der Bauleitung abstimmen

Variante mit Umlenkprofilen
s. Detail S.26



Süd-Ostansicht M. 1:100

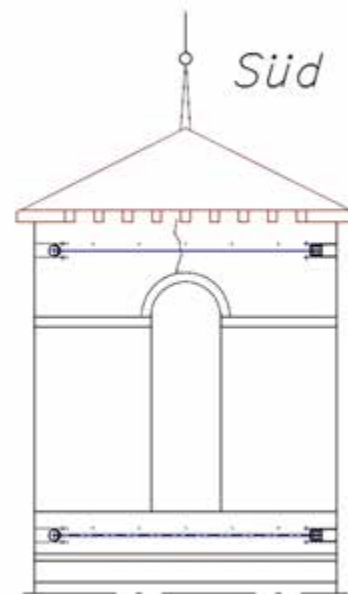


Bild 25
Lage Zugankersystem mit
Umlenkprofil Grundriss Turm

Bild 26
Lage Zugankersystem mit
Umlenkprofil Süd-Ost-Ansicht
Turm

ventionellen Vorgehensweise mindestens zwei große Bohrungen bzw. das Herstellen von zwei Auflagerpolstern erforderlich. Durch den Einbau von Umlenkprofilen (Bilder 27 und 28) werden die Gewindestangen direkt untereinander verbunden und es kann eine kraftschlüssige Übertragung der Zugkräfte im Zugankersystem erfolgen (Bilder 29 und 30). Die Einbringung der Umlenkprofile erfordert nur eine Kernbohrung (Durchmesser 257 mm, Tiefe 60 cm) (Bild 30) je Gebäudeecke, die an

Nebenfassadenflächen erfolgen kann. Die Bohrkern werden vor der Verpressung der Ankerkanäle incl. Umlenkprofile wieder passgenau eingebaut. Die Gewindestangen werden i. d. R. konstruktiv mit 10 kN vorgespannt (Bild 31). Der Vorteil der beidseitigen Umlenkprofile besteht in der Schonung der historischen, oft unter Denkmalschutz stehenden Bausubstanz, der Möglichkeit der verdeckten Anordnung der Profile sowie einer wesentlich optimierten Kraftübertragung. Die Form der Umlenk-

Bild 27
UMLENKPROFIL für 90°-Winkel
3-D-Darstellung [6]

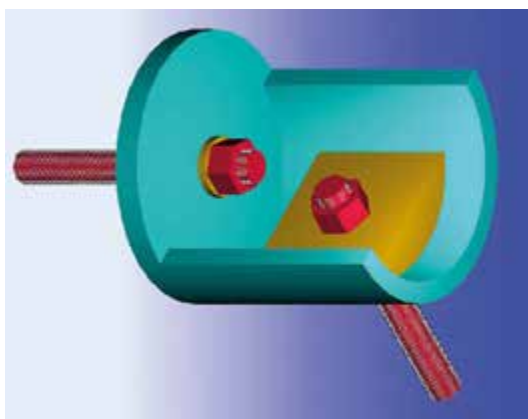


Bild 28
UMLENKPROFIL aus Blech
und Halbrohr – individuelle
Fertigung





Bild 29
Spannanker Gewindestangen
DIN 976 A2 mit Abstandshalter

Bild 30
Komplettsystem aus UMLENK-
PROFIL und Spannanker fertig
zentriert

profile ist so konstruiert, dass sich diese passgenau und kraftschlüssig am Mauerwerk anliegend in den Bohrkanal der großen Kernbohrung integrieren lassen. Durch die Aussparungen der Umlenkprofile werden die Zugankerstäbe (Gewindestangen) axial lagernd eingeführt und verschraubt. Die dem Bohrkanal zugeordnete Innenwandung der Umlenkprofile wird mit einer Distanzscheibe versehen, welche eine vollflächige Kraftübertragung garantiert. Die Umlenkprofile bestehen aus feuerverzinkten Rohren und Blechen (S 235 JR).

Flankierend zu dieser Leistung sind sämtliche Risse im Mauerwerk nach Öffnung und Flankenauflagerung wieder mittels Vernadelung und Verpressung kraftschlüssig verschlossen worden. Als besondere Leistungen wurden dabei ausgeführt:

- Neuaufmauerung desolater Wandbereiche
Feststellung von Hohlstellen nach Putzabnahme; Freilegung und Rückbau sowie statisch temporäre Sicherung mittels Kanthölzern und Keilen; komplette Neuausmauerung mittels Mauersteinen aus Kalkstein
- Hohlstellenverschluss
großflächige Sondierung von Putzhohlstellen incl. Abnehmen und Entsorgen desolater Putzbereiche; Reinigung der freigelegten Wandbereiche und Entfernen/Ausräumen von geschädigten Fugen bis Tiefe i. d. R. 20 cm, Einzelbereich bis 30 cm; mehrlagiger Fugenverschluss (Tiefenverfugung)
- Instandsetzung gerissener Fensterbänke/Stürze
Öffnen der Vertikalrisse; Herstellen von Bohrungen 16 mm (zwei Bohrungen je Risse); Einbringen von Edelstahlnadeln M14, Länge ca.



Bild 31
Kernbohrstücke DN 300 +
DN 90 wieder in Ausgangslage
versetzt

40 cm mittels Hybridmörtel HILTI-HIT HY 70; Rissverschluss durch Rissinjektion und steinrestauratorischer Oberflächenverschluss (Risslängen 22 bis 45 cm); Verschluss der Bohrpunkte mit Steinrestauriermörtel

- Aufhängung von Bogensteinen
Sicherung loser Bogensteine sowie temporäre Auskeilung; Herstellen von Bohrungen (radial geneigte Bohrung zum Scheitel, \varnothing 18 mm, Tiefe über Kopf 80 cm); Einbau von Edelstahlnadeln und Siebhülsen Edelstahl \varnothing 16 mm, Länge 75 cm mittels Hybridmörtel

Schlussbetrachtung

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die durchgeführten statischen Sicherungen in Basel und auf der Schwäbischen Alb neben dem eigentlichen Zweck der Reparatur der im Vorfeld entstandenen Schäden für die Zukunft ein gutes Rüstzeug bei Erschütterungen durch Erdbebeneinwirkung erhalten haben. Im weitesten Sinne wurde

jeweils die Mauerwerksstruktur durch das Einbringen einer vorgespannten Fugenarmierung bzw. die Montage eines geschlossenen Zugankersystemes bewehrt.

Diese Ertüchtigungsmaßnahmen unterlagen keiner bauaufsichtlichen Regelung bzw. DIN-Normung.

Weiterführende Literatur

- [1] Dr. sc. techn. Josef Trabert: Auswertung Verformungsmessungen aus Laserscan, Januar 2018, Projekt Basel(CH), Hauptpost, Ingenieurbüro Trabert + Partner
- [2] Herbert Blauß: Erdbeben am 3. September 1978 auf der Schwäbischen Alb, Zeitschrift Schadenprisma Februar 1980, 9. Jahrgang, Nr. 1, https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1980/sp_1980_1_1.pdf
- [3] Prof. Dr.-Ing. A. Ötes: Die neue Erdbebennorm DIN 4149, 2007, https://www.bauwesen.tu-dortmund.de/tk/Medienpool/Bilder/Forschung/Die_neue_Erdbebennorm_DIN_4149_1.pdf
- [4] Dipl.-Ing. Mattias Küttler: Erdbebensicherheit von Bauwerken nach DIN 4149, Ausgabe 2005, im Vergleich DIN 4149, Ausgabe 1981, http://kup-koeln.de/wordpress/wp-content/uploads/2012/07/ERDB_SEM_06.pdf
- [5.1] Induzierte Erdbeben: Eine Herausforderung in der Gefährdungs- und Risikoabschätzung, Mitteilungen der Geotechnik Schweiz Frühjahrstagung Mai 2014, Seite 115
- [5.2] Blaise Duvernay: Erdbebengefährdung und –risiko in der Schweiz – Relevanz für die Geotechnik, Mitteilungen der Geotechnik Schweiz Frühjahrstagung Mai 2014, S. 11–13, <http://geotechnik-schweiz.ch.vtxhosting.ch/wp-content/uploads/2017/04/Heft168.pdf>
- [6] Patentschrift DE 198 14 651 C2

Bildnachweis

- Bilder 0 (Titel), 6, 12–15, 18–22, 27–31: Ronald Betzold, betzold+maak GmbH & Co.KG, Schleusingen
- Bild 1: Chronicon Helvetiae Christoph Silbereysen. <https://blog.nationalmuseum.ch/2019/02/das-grosse-erdbeben-von-basel>
- Bild 2: Meskouris, K., Brüstle, W., Schüter, F.-H.: Neufassung der Norm DIN 4149. Bauingenieur, Bd. 79, S. 3–8, 2004. <https://dgeb.org/erdbebeningenieurwesen/erdbebeneinwirkung/>
- Bild 3: SCHWEIZERISCHER ERDBEBENDIENST ETH Zürich, <http://www.seismo.ethz.ch/de/knowledge/seismic-risk-switzerland>
- Bild 4: Martin Meschede, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-56422-6_8
- Bild 5: Verband Österreichischer Ziegelwerke, <https://www.ziegel.at/ziegeltechnik/mauerwerk>
- Bild 7: Rolf Jöhr: Kleinbasel 1977, Herausgeber Heimatschutz Basel Mitteilungsblatt No. 121, Dez. 2016. http://www.heimatschutz-bs.ch/uploads/media/20161205_Heimatschutz-Mitteilungsblatt_121.pdf
- Bilder 8–11, 16, 17, 19 : Dr. Josef Trabert, TRABERT + PARTNER, Geisa
- Bilder 24–26: Dipl.-Ing. Ursula Kallenbach, Schilling + Kallenbach, Stuttgart
- Bilder 27: Dipl.-Ing. Gerhard Weidenbach, Mühlhausen (Thüringen)

Projektbeteiligte Statiker

Basel (CH), Hauptpost: Dr. sc. techn. Josef Trabert

Gomaringen, Evangelische Kirche: Dipl.-Ing. Ursula Kallenbach

Bauausführung

Basel (CH), Hauptpost u. Gomaringen, Evangelische Kirche: betzold + maak GmbH & Co. KG, Dipl.-Ing. Ronald Betzold

Maurus **Baldermann**
Landeshauptstadt Stuttgart
Garten-, Friedhofs- und Forstamt
Maybachstraße 3, 70192 Stuttgart
Maurus.Baldermann@stuttgart.de

Dr.-Ing. Albert **Distelrath**
stellv. Dombaumeister Köln
Dombauverwaltung
Roncalliplatz 2, 50667 Köln
albert.distelrath@dombau-koeln.de

Dipl.-Ing. Ronald **Betzold**
betzold + maak GmbH & Co.KG
BauManufaktur
Waldauer Berg 7, 98553 Schleusingen
betzold@betzold-maak.de

Axel **Dominik**
Bauingenieur, Restaurator im Maurerhandwerk
Dominik Ingenieurbüro
Griegstraße 16, 53332 Bornheim-Merten
info@dominik-ingenieurbuero.de

Ulrich **Bauer-Bornemann**
Steinrestaurierung Bauer-Bornemann GmbH
Oberer Stephansberg 36, 96049 Bamberg
steinrestaurierung@bauer-bornemann.com

Pascale **Dominik** M.Sc.
Dominik Ingenieurbüro
Griegstraße 16, 53332 Bornheim-Merten
info@dominik-ingenieurbuero.de

Dr.-Ing. Toralf **Burkert**
Jäger Ingenieure GmbH
Paul-Schneider-Straße 17, 99423 Weimar
t.burkert@jaeger-ingenieure.de

Dipl.-Ing. Angela **Eckart**
Baustoffingenieur
Jäger Ingenieure GmbH
Paul-Schneider-Straße 17, 99423 Weimar
a.eckart@jaeger-ingenieure.de

Matthias **Deml** M.A.
Dombauarchiv
Roncalliplatz 2, 50667 Köln
matthias.deml@dombau-koeln.de

Boris **Frohberg**
Dipl. Restaurator
Rembrandtstraße 51, 12623 Berlin
boris-frohberb@gmx.de

Dr. Claudia **Dietze**
IBZ Salzchemie GmbH&Co. KG Halsbrücke
Schwarze Kiefern 4, 09633 Halsbrücke
claudia.dietze@ibz-freiberg.de

Peter **Füssenich**
Dombaumeister Köln
Dombauverwaltung
Roncalliplatz 2, 50667 Köln
peter.fuessenich@dombau-koeln.de

Prof. Dr.-Ing. Marc **Gutermann**
Institut für Experimentelle Statik,
Hochschule Bremen
Neustadtswall 30, 28199 Bremen
marc.gutermann@hs-bremen.de

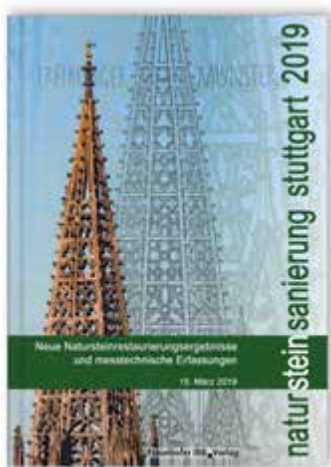
Andreas **Wasjuta**
Institut für Experimentelle Statik,
Hochschule Bremen
Neustadtswall 30, 28199 Bremen

Tanja **Pinkale**
Dombauhütte Köln
Am Domhof, 50667 Köln
Tanja.Pinkale@dombau-koeln.de

Dr. Judit **Zöldföldi**
Stv. Referatsleiterin
Ref. Denkmalschutz, Abt. Bauwerkserhaltung
Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart
Judit.Zoeldfoeldi@mpa.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Konstantin **Tiefenthaler**
ÖBB-Infrastruktur AG
Streckenmanagement und Anlagenentwicklung
Bahnhofplatz 8, 6700 Bludenz
konstantin.tiefenthaler@oebb.at

Natursteinbauwerke im Mittelpunkt



Natursteinsanierung Stuttgart 2019

Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen

Verfall verhindern, Wertvolles konservieren und Verlorenes wiederherstellen – die Beiträge befassen sich mit außergewöhnlichen und brandaktuellen Erhaltungsaufgaben, wie zum Beispiel der Wiederherstellung des verlorenen spätgotischen Schlingrippengewölbes der Dresdener Schlosskapelle. Die dazu notwendige Handwerkstechnik musste nach 400 Jahren des Vergessens völlig neu erarbeitet werden. Nicht einsturz-, aber stark absturzgefährdet sind heute so manche Fassadenelemente aus Naturstein. Behutsame und nachhaltige Konservierungsmethoden werden in den Tagungsbeiträgen ebenfalls behandelt.

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Karin Schinken

2019, 146 Seiten, 154 Abb., 10 Tab., Softcover

ISBN 978-3-7388-0243-6 | auch als E-Book und BuchPlus verfügbar

Zur Vervollständigung Ihrer Bibliothek – die Tagungsbände der Jahre 2011 bis 2018:

Natursteinsanierung Stuttgart 2018

136 Seiten, 171 Abb., 5 Tab., Softcover

ISBN 978-3-7388-0098-2

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

Direkt online bestellen:

www.baufachinformation.de

Nobelstraße 12 ■ 70569 Stuttgart ■ irb@irb.fraunhofer.de ■ www.baufachinformation.de

Umfassendes Wissen zur Steinkonservierung



Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein

Der Leitfaden führt durch die Abläufe der Befunderhebung, Entscheidungsfindung, Maßnahmenplanung, Ausführung und Nachkontrolle von Steinkonservierungen. Alle praxisrelevanten Untersuchungsmethoden, Restaurierungsmaterialien und -techniken werden erklärt. Als Auswahlhilfe ist jedem Arbeitsschritt eine Inhaltsübersicht vorangestellt, aus der anhand festgelegter Kategorien eindeutige Prioritäten ablesbar sind. Der 5. Auflage dieses Standardwerks der Denkmalpflege wurde ein Kurzlehrgang zur Gesteinskunde und zu den Konservierungsmitteln vorangestellt, sodass sich auch Quereinsteiger und Nicht-Fachleute in das Thema einarbeiten können.

Rolf Snethlage, Michael Pfanner

5., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2020, 448 Seiten, 145 Abb., 34 Tab., Softcover
ISBN 978-3-7388-0307-5 | auch als E-Book und BuchPlus verfügbar



Direkt online bestellen:

www.baufachinformation.de

Nobelstraße 12 ■ 70569 Stuttgart ■ irb@irb.fraunhofer.de ■ www.baufachinformation.de

ISBN 978-3-7388-0415-7



Veranstalter

**NATURSTEIN
SANIERUNG**

Dr.-Ing. Gabriele Patitz
Alter Brauhof 11
76137 Karlsruhe
www.natursteintagung.de

mit Unterstützung von

 **Fraunhofer**
IRB



Baden-Württemberg
LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE
IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART