



Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen

11. März 2016



Fraunhofer IRB Verlag

naturstein sanierung stuttgart 2016

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

Natursteinsanierung Stuttgart 2016

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen
sowie Sanierungsbeispiele**

Tagung am 11. März 2016 in Stuttgart

Herausgeber

Dr.-Ing. Gabriele Patitz

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

Prof. Dr. Gabriele Grassegger

Fakultät Bauingenieurwesen, Fachgebiet: Bauchemie und Baustoffkunde
Hochschule für Technik (HFT)
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

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

Satz und Layout

Manuela Gantner – punkt, STRICH. – Karlsruhe

Druck und Bindung

AZ Druck und Datentechnik GmbH – Kempten

Einband

Foto: Maßwerkrose am Südquerhaus des Straßburger Münsters (©Fondation de l'Œuvre Notre-Dame)
Fotogrammetrie: Straßburger Münster, Südquerhausfassade (©Fondation de l'Œuvre Notre-Dame)

1. Auflage

2016 Fraunhofer IRB Verlag,
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

ISBN (Print): 978-3-8167-9598-8

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9599-5

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung von Frau Prof. Dr. Grassegger und Frau Dr. Patitz unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

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

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

Liebe Teilnehmerinnen und Teilnehmer, liebe Leserinnen und Leser,

herzlich Willkommen zur 22. Fachtagung Natursteinsanierung an der HFT in Stuttgart. Wir wünschen Ihnen einen interessanten und abwechslungsreichen Tagungstag. Mit den zusammengestellten Beiträgen aus der Forschung und Praxis möchten wir Ihnen viele neue Anregungen und Ideen für Ihre tägliche Arbeit mitgeben.

Die Fachbeiträge und weiterführenden Informationen finden Sie in dem vorliegenden Tagungsband. In Ergänzung dazu können Sie sich in der Fachausstellung über neue und altbewährte Produkte und Arbeitsmaterialien informieren. Fachliteratur bieten Ihnen die Informationsstände des Fraunhofer IRB Verlages und der Stand des Landesdenkmalamtes Esslingen an.

Die diesjährige Exkursion führt uns zum Straßburger Münster und wurde von den Mitarbeitern der Fondation de l'Œuvre Notre-Dame organisiert und vorbereitet. Wir erhalten Einblicke in die Werkstätten der Straßburger Münsterbauhütte und werden die Baustellen an der Südquerhausfassade und an der Galerie Goetz besichtigen. Eine geführte Turmbegehung sowie eine Führung zum europäischen Steinhandwerk mit Schwerpunkt Tradition & Brauchtum – Rituale & Zeremonien – Symbole & Allegorien runden das Tagungsprogramm ab.

Die Vorträge in Stuttgart spannen einen Bogen von der Verfugung des Natursteinmauerwerks auf der Wartburg über die Sanierung von hydrophobierten Sandsteinfliguren am Schloss Weißenstein, das Schadensbild und die Schadensentwicklung eines Marmorgrabmales in der Schweiz, die Steinrestaurierung am Hauptportal der Stiftsbasilika St. Martin in Landshut und Forschungsarbeiten zu Untersuchungen der Natursteinverwitterung mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen.

Mit den ausgewählten Themen und Informationsständen wollen wir Ihnen zwei spannende und inspirierende Tage bieten.

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

Gabriele Patitz


Gabriele Grassegger

Otto Wölbert

Hans-Werner Zier Heike Dreuse	Verfugung des Natursteinmauerwerks der Wartburg Vorzustand, Voruntersuchungen, Mörtelentwicklung und Realisierung	7
Heike Kirsten	Verborgenes vom Grimmenstein Die Sanierung der Zisterne unter Schloss Friedenstein in Gotha	21
Priska Rast	Praxiserfahrung und Anwendungsbeispiele mit einem selbst entwickelten Graffitienschutz der Stadt Zürich	35
Michael Hauser	Das Grabmal von Adolf Guyer-Zeller in Bauma, Zürich Schadensbild und Schadensentwicklung der Marmoroberflächen	45
T. Meier, M. Auras, M. Fehr, D. Köhn, T. Steinkraus, F. Eckel, R. Sobott, S. Sieges- mund, D. Schulte-Kortnack, E. Erkul	Untersuchung der Verwitterung von Naturstein mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen	57
Markus Huschenbeth Susann Halbeisen Philipp Schubert	Die Steinrestaurierung am Hauptportal der Stiftsbasilika St. Martin in Landshut	73
Ute Tuch	Ein „Marienepitaph“ aus Ingolstadt Voruntersuchung und Konservierung	89
Sabine Bengel	Das Straßburger Münster und die Straßburger Münsterbauhütte (Fondation de l'OEuvre Notre-Dame)	99
Eric Salmon	Die Arbeitsweise der Straßburger Münsterbauhütte (Fondation de l'OEuvre Notre-Dame)	111
Deepankar Banerjee	Chemistry and Deposition of Airborne Particulates on the Taj Mahal at Agra/India Investigations on Soiling at Monuments in a Semi-Arid Zone of India.	119
	Autorenverzeichnis	131

Verfugung des Natursteinmauerwerks der Wartburg Vorzustand, Voruntersuchungen, Mörtelentwicklung und Realisierung

von Hans-Werner Zier, Heike Dreuse



Die Baugeschichte der Wartburg reicht bis in das 12. Jahrhundert zurück. Bedingt durch die jahrzehntelange Nutzung und die teils extremen Expositionen der Wandflächen waren starke Schäden an den Verfugungen vorhanden. Über baubegleitende Untersuchungen wurde eine Vielzahl von Bindemittelarten, die im Laufe der Nutzung der Burg in Mauer- und Verfugmörteln zum Einsatz kamen, nachgewiesen. Aus dem Istzustand ergaben sich Anforderungen an Mörtel für die Überarbeitung der Sichtfugen im Natursteinmauerwerk. Die Entwicklung und Erprobung eines Trockenmörtelsystems mussten Anforderungen wie Gipsgehalt, Salz- und Feuchtebelastungen aber auch gestalterischen Möglichkeiten gerecht werden.

1 Einleitung

Die Wartburg zählt zu den bekanntesten deutschen Burgen und ist seit 1999 von der UNESCO in die Liste des Welterbes der Menschheit aufgenommen.

Die Geschichte der Wartburg begann angeblich (z. B. nach [1], [2], [3]) um 1067 mit der Inbesitznahme des Geländes durch Ludwig den Springer. Das älteste noch erhaltene Bauwerk ist der Palas. Mit dessen Errichtung wurde ab 1157 [3] begonnen. Somit befinden sich auf dem Gelände der heutigen Burganlage bauliche Anlagen, die über einen Zeitraum von fast 850 Jahren geschaffen, verändert und repariert wurden. Ursachen für die baulichen Veränderungen waren Folgen von Beschuss (z. B. in den Jahren 1306/07 Belagerung und Beschießung mit Wurfgeschossen [1], [2]), von Bränden (z. B. ausgelöst durch einen Blitzeinschlag in den Hauptbergfried 1318 (z. B. [1], [2])), durch Einsturz (z. B. eines nicht näher benannten Turmes 1477 [2]) sowie durch Abriss von Gebäuden und Mauern vor allem im 18. Jahrhundert [1]. Beginnend mit dem Jahr 1838 bis etwa 1890 erfolgten umfangreiche Baumaßnahmen auf der Wartburg [1]. Diese Bauten prägen neben dem Palas, Südturm, Torhaus, Ritterhaus und der Vogtei auch aktuell das Erscheinungsbild der Burg.

Seit dem Jahr 1922 werden der Unterhalt und der Erhalt der Burg durch die Wartburgstiftung koordiniert.

Nach den umfangreichen Baumaßnahmen im 19. Jahrhundert erfolgten nur in geringerem Umfang bauliche Veränderungen. Zu diesen gehört z. B. die Entfernung einer Außentreppe zum 1. Obergeschoss des Palas in den Jahren 1953/1954 [3].

Die Arbeiten an den Fassaden hatten vor allem Ausbesserungen von Schäden und partielle Erneuerungen an Verfugungen und Putzen sowie steinrestauratorische Maßnahmen zum Inhalt. Weiterhin erfolgten im Außenbereich Erneuerungen von Anstrichen auf Putzflächen und Schutzmaßnahmen an den sichtbaren Holzkonstruktionen.

Im nachfolgenden Beitrag werden Ergebnisse von Untersuchungen der MFPA Weimar, die seit 1995 an verschiedenen Gebäuden der Wartburg ermittelt wurden, kurz dargestellt. Weiterhin wird der Weg von den Voruntersuchungen über die Entwicklung eines Mörtelsystems für die Erneuerung von Verfugungen bis hin zu deren Anwendung aufgezeigt.

Auf Möglichkeiten der Steinrestaurierung an den Natursteinen der Wartburg soll im Folgenden nicht eingegangen werden. Hinweise finden sich in der Literatur (z. B. [4], [5]).

Parallel zur Entwicklung von Steinrestauriersystemen für die Natursteine im Sichtmauerwerk (siehe auch [4], [5]) sollten im Jahre 1995 Verfugmörtel für

das Sichtmauerwerk der Palaswestwand entwickelt werden. Als Basis wurden durch die Wartburgstiftung Ergebnisse mikroskopischer Untersuchungen an alten Verfugmörteln, die von einem Ingenieurbüro durchgeführt worden waren, übergeben. Zu diesem Zeitpunkt waren die Altmörtel an der Westfassade des Palas bereits aus den Fugen entfernt und es stand nur noch sehr wenig Material aus Rückstellproben für ergänzende Untersuchungen zur Verfügung. In den Fugenbereichen befanden sich teils noch Reste von Gipsmörteln. Daneben waren unterschiedliche Kalkmörtel und verschiedene Mörtel mit hydraulischen Bindemittelbestandteilen vorhanden. Eine Zuordnung der unterschiedlichen Mörtel zu definierten Teilflächen war nicht möglich und so musste die Forderung der rückstandsfreien Entfernung von Altverfugungen aufgestellt werden. Für die Nachstellung der Verfugung wurden Bindemittelarten (Romankalk, Sulfadur) spezieller Hersteller seitens des Auftraggebers vorgegeben. Die auf dieser Basis speziell entwickelten Mörtel für die Baustelle kamen aber nicht zum Einsatz. In der Zeit zwischen der Mörtelentwicklung und -erprobung an Musterachsen und dem Beginn der großflächigen Ausführung hatte der Kalklieferant den Romankalk aus dem Sortiment genommen. Die Mörtelrezeptur musste auf eine verfügbare Weißkalkhydratbasis (Kalkqualität CL90) umgestellt werden.

Nachfolgend wird auf den Erkenntnisgewinn im Umgang mit Verfugungen am Natursteinsichtmauerwerk aus Wartburgkonglomerat innerhalb eines Zeitraumes von ca. 20 Jahren, die daraus resultierenden Anforderungen an Verfugmörtelsysteme und Möglichkeiten der Entwicklung von Mörtelsystemen für Überarbeitungen an Sichtmauerwerk der Wartburg eingegangen.

2 Ausgangssituation Verfugung

Bereits auf dem Weg zur Wartburg fallen im Stadtgebiet von Eisenach rotbraune Natursteine mit stark wechselndem Kornbestand auf. Die dem Wartburgkonglomerat zuordenbaren Steine wurden vor allem in Sockel- und Kellerbereichen und für die Errichtung von Stützwänden als Quadermauerwerk oder in Quaderoptik verwendet.

Das Erscheinungsbild der Wartburg wird bereits aus der Ferne durch dieses Gestein mit bestimmt. Der Bergfried und die Gebäude im mittleren Bereich der Burganlage sowie die westlichen und südlichen Bereiche der Wehrmauern werden von diesem Stein dominiert. Er ist auch unter heute verputzten Oberflächen anzutreffen. Gewonnen wurde das Gestein in unmittelbarer Nähe der Wartburg. Im Bereich des

heutigen Parkplatzes sind noch Aufschlüsse vorhanden. Das Gestein ist auch im Bereich zwischen Torhaus und Dirnitz anstehend sichtbar.

Als weitere Gesteine sind Rätsandsteine anzutreffen. Großflächige Anwendungen als Sichtmauerwerk befinden sich an der Westseite des Palas. Anwendungen der Rätsandsteine sind weiterhin Eckquaderungen, Säulen, Treppenanlagen sowie Tür- und Fenstergewände. Die Rätsandsteine stammen aus der Region um Krauthausen/Madelungen (zwischen Eisenach und Creuzburg) und dem Bereich des Seebergs (bei Gotha). In geringerem Umfang sind auch Buntsandsteine (z.B. Ostseite des Palas) und Carbonatgesteine verbaut.

An den Fassadenflächen mit Sichtmauerwerk zeigten sich Mitte der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts unterschiedliche Schadbilder.

Die Fugen der Gebäude waren teils ausgewittert und teilweise fanden sich Hinweis auf mehrfache Überarbeitungen. Dabei war bereits optisch feststellbar, dass für Ausbesserungen Mörtel unterschiedlicher Zusammensetzungen zum Einsatz kamen.

Das Sichtmauerwerk der Wehrmauern und anderer rückseitig erdberührter Mauern war im Vergleich zu den Gebäuden oft deutlich stärker geschädigt. Die Ursachen waren sichtbar rückwärtig eindringende Wässer, über offene Fugen eindringende Wässer und Schichtwässer, die durch die Hangsituation in Richtung Wehrmauern geleitet werden. Zahlreiche Strebe Pfeiler an den Wehrmauern deuten auf Probleme mit deren Stabilität in der Vergangenheit hin. In Teilbereichen des Mauerwerks war starker Bewuchs mit Efeu und auch Baumbewuchs vorhanden. Die Durchwurzelungen führten zu Destabilisierungen, begünstigten Feuchteinträge und/oder verzögerten Austrocknungsprozesse.

An Steinoberflächen des Wartburgkonglomerats wurden bei Südexposition häufiger Abschalungen und Ausplatzungen festgestellt. Als Ursache wurde hier eine hohe thermische Beanspruchung bei Sonneneinstrahlung aufgrund der sehr dunklen Steinoberflächen angenommen. Bei Vorhandensein sehr grober Körner im Konglomerat kommt es zu Spannungen im Steinmaterial und den genannten Schadbildern. Beispielsweise erforderten die Oberflächenschäden am Südturm in Südexposition einen Verputz zum Schutz des Mauerwerks. Steinkonservatorische Behandlungen der Steinoberflächen und Neuverfugungen wären nur von kurzem Bestand und hätten keinen ausreichenden Schutz des Mauerwerks garantiert.

3 Voruntersuchungen am Mauerwerk

Im Laufe von etwa 20 Jahren ergaben sich im Rahmen sanierungsbegleitender Untersuchungen häufig Fragen zur Auswahl geeigneter Mörtel für Ausbesserungen am Mauerwerk und zur Verfugung von Sichtmauerwerk auf der Wartburg.

In Abbildung 1 befindet sich ein schematischer Grundriss der Wartburg mit der Kennzeichnung der Lagen von Untersuchungsbereichen am Mauerwerk.

Im Jahre 1996 drohten Teile der äußeren Schale der westlichen Wehrmauer unterhalb des Kommandantengrabens abzustürzen. Die Ursachen waren Durchwurzelungen infolge starken Baumbewuchses, dadurch verstärkte Wassereinträge und Frostschäden.

Untersuchungen zum Mauerwerksaufbau ergaben, dass in der äußeren Mauerschale zementhaltige Mörtel (mit etwa 15 M.-% Zementgehalt) als Mauer- und auch als Verfugmörtel vorlagen. In der Mauerschale dahinter waren Gipsmörtel (Gipsgehalte zwischen 70 und 80 M.-%) vorhanden. Treibmineral-

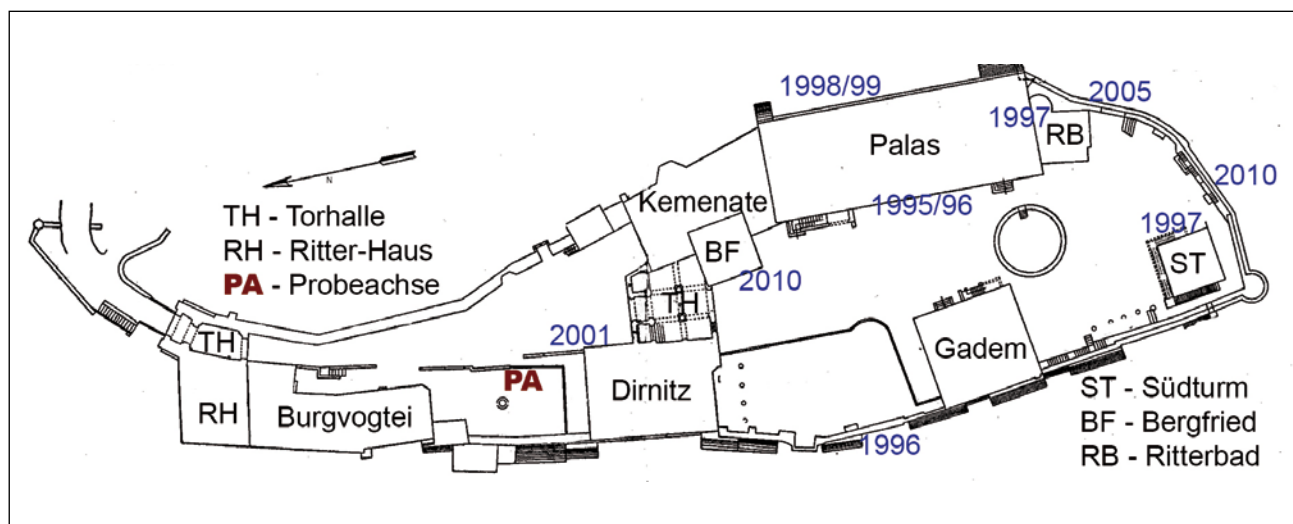


Abb. 1 Übersicht zur Lage der Untersuchungsbereiche auf der Wartburg

bildungen in den Kontaktbereichen zwischen den beiden Mauerschalen wurden in durchfeuchteten Bereichen nachgewiesen. Signifikante Belastungen mit Chloriden und Nitraten waren nicht nachweisbar.

Ebenfalls im Jahre 1996 erfolgten Untersuchungen zu umweltbedingten Veränderungen an Natursteinoberflächen auf der Westseite des Palas. Hierbei konnten Gipseinlagerungen in oberflächennahe Zonen der Sandsteine und Gipskrusten festgestellt werden. Neben den Einträgen aus Luftschadstoffen war auch von Umlagerungen aus gipshaltigen Mörteln im Mauerwerk auszugehen.

Untersuchungen am Südturm im Jahre 1997 ergaben u. a. die bereits oben erwähnten Schäden an Oberflächen des Wartburgkonglomerats bei Südexposition. In Verfugungen im Inneren des Turms (z. B. Deckenbereich) sind Gipsmörtel vorhanden. In den Sichtfugen des Außenmauerwerks waren verschiedene Mörtel nachweisbar. Es handelte sich dabei um Kalkmörtel, Kalk-Zement-Mörtel und hydraulische Kalke mit höheren Anteilen magnesiumhaltiger Bindemittelbestandteile. Letztere sind auch für partiell vorhandene höhere Anteile leicht löslicher Magnesiumsulfate verantwortlich. In Teilbereichen des Mauerwerks (z. B. an der Ostwand) waren zusätzlich hohe Belastungen mit Nitraten und Chloriden nachweisbar.

Ebenfalls im Jahre 1997 wurden am Südgiebel des Palas Untersuchungen durchgeführt. Es ergaben sich Hinweise auf unterschiedlichste Mauer- und Verfugmörtel. In Teilbereichen des Giebels, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts überarbeitet worden waren, sind gipshaltige Mörtel als Mauermörtel vorhanden. Die Verfugungen bestanden aus verschiedensten Mörteln, die mit denen des Südturms vergleichbar waren. Auffällig waren hier gelbliche bis bräunliche Mörtel, die scheinbar keine Gesteins-

körnungen enthielten. Relevante Salzbelastungen sind nicht festgestellt worden.

An der Ostfassade des Palas wurden in den Jahren 1998 und 1999 umfangreiche Untersuchungen zur Zusammensetzung von Mauer- und Verfugmörteln sowie zu Belastungssituationen durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen sind Mörtel mit bräunlicher Bindemittelmatrix, die unterschiedliche Anteile und Arten an Gesteinskörnungen enthielten (aus der Mitte des 19. Jahrhunderts), Kalkmörtel mit groben Gesteinskörnungen (teils noch aus der romanischen Bauzeit), Kalkmörteln mit Anteilen von Gipssteinkörnungen (ohne zeitliche Zuordnung), feine gipshaltige Mörtel (ohne zeitliche Zuordnung) und zementhaltige Mörtel (1926 und Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts) nachgewiesen worden. Die Mörtelarten (z. B. Abb. 2 und 3) spiegeln die unterschiedlichsten Bau- und Reparaturphasen wider und grenzen die Möglichkeiten der Auswahl von neuen Mörteln für Reparaturen stark ein.

Die Heterogenität der Kornzusammensetzungen der Gesteinskörnungen (Abb. 4) und auch die der chemischen Zusammensetzungen (Abb. 5) der verschiedenen Mörtel an der Ostfassade des Palas widerspiegeln auch die Heterogenität der insgesamt an den Gebäuden der Wartburg anzutreffenden Situation.

Im Bereich der Dirmitz waren großflächig gelbliche Mörtel als Verfugung vorhanden. Zu großen Teilen waren sie der Bauphase in der Mitte des 19. Jahrhunderts zuzuordnen. Die Errichtung des Mauerwerks erfolgte mit Kalkmörteln. Untersuchungen im Jahre 2001 ergaben Hinweise auf die Verwendung von Romanzementen bzw. Romankalken für die Verfugungen. Diese Hinweise fanden sich auch an anderen Bauwerken der Wartburg (siehe auch [6]).



Abb. 2 Der Mörtel WAP042.1 ist ein Gipsmörtel und der braune Mörtel enthält Romanzement als Bindemittel.



Abb. 3 Der Mörtel WAP042.3 befindet sich direkt neben dem braunen Mörtel und enthält sehr grobe Gesteinskörnungen.

Abb. 4
Siebdurchgangslinien für Gesteinskörnungen aus Mörteln von der Ostfassade des Palas

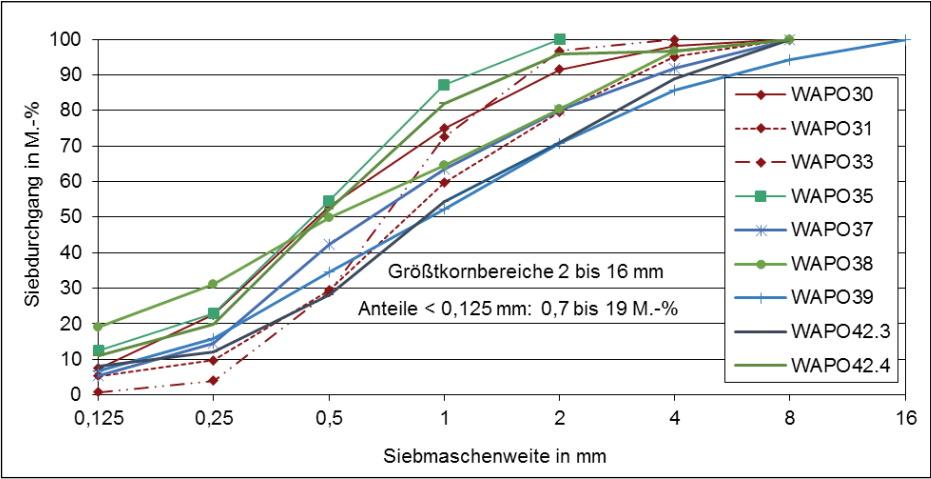


Abb. 5
Ergebnisse chemischer Analysen an Mörteln von der Ostfassade des Palas

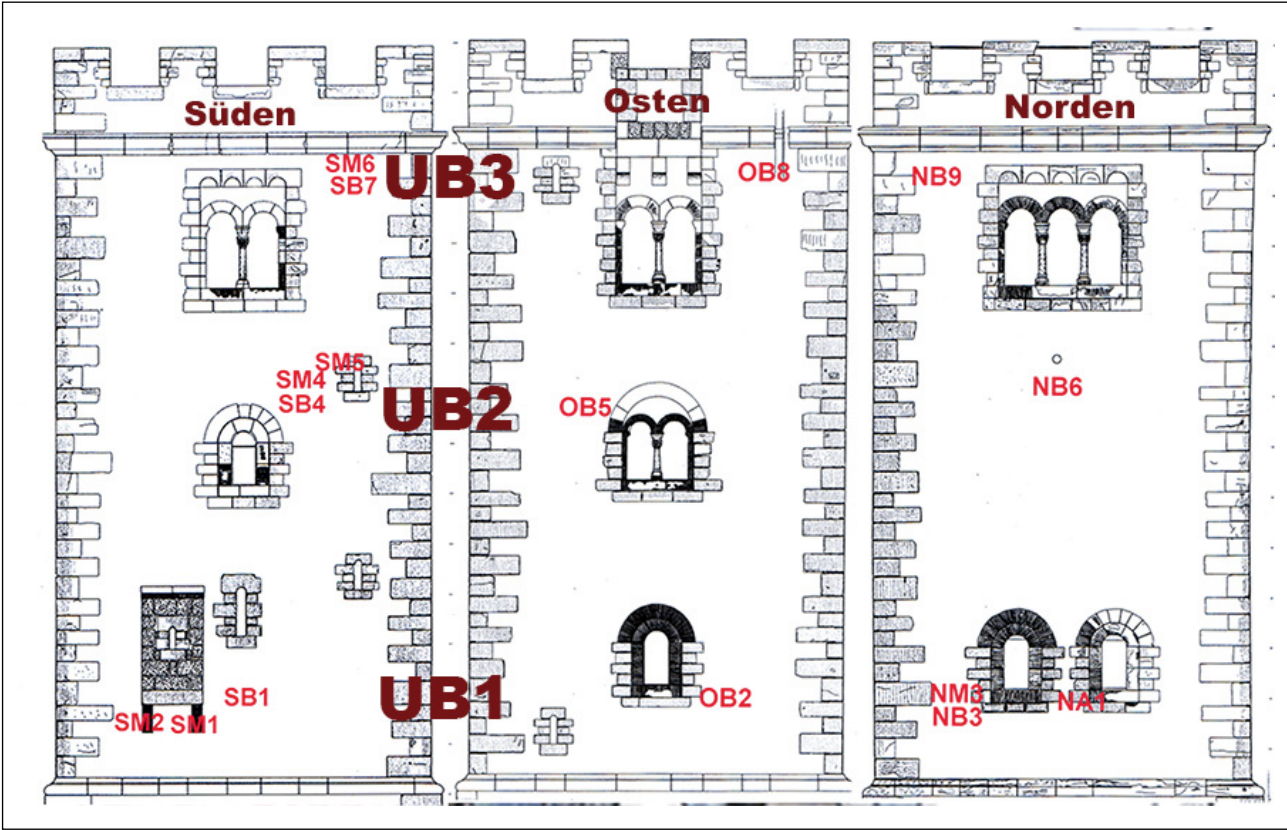
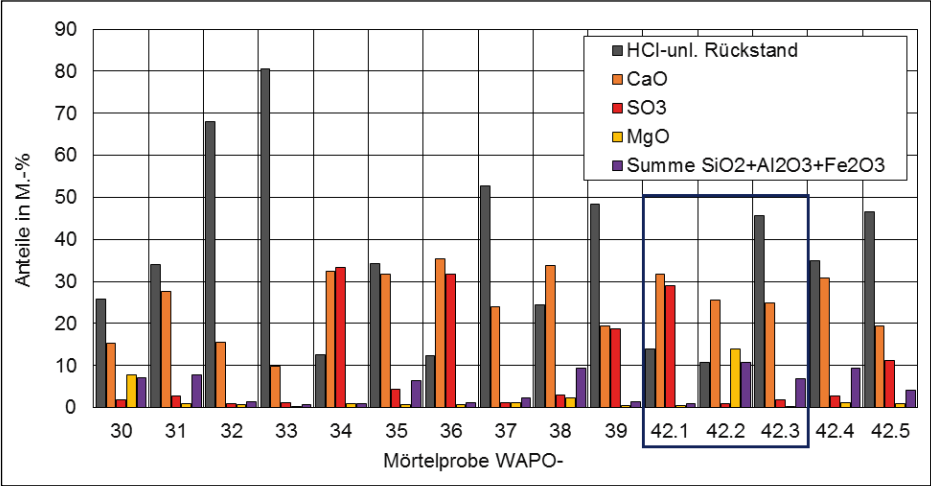


Abb. 6 Kennzeichnung der Probenahmestellen in Fugen des Bergfrieds



Abb. 7 Bereich an der Stelle NB9 in Abbildung 6

Ab 2005 erfolgten weiterhin Untersuchungen an den südlichen Wehrmauern und am Bergfried der Wartburg. Am Bergfried war die Situation mit der Dornitz vergleichbar. Die Belastung der Oberflächen und die Rückwitterungen waren auf Grund der Exposition jedoch stärker ausgeprägt. Im Inneren fanden sich an verschiedenen Stellen Gipsmörtel als Putz und als Mauermörtel. Die Fugenbereiche der südlichen Wehrmauer waren stark ausgewittert und verschiedene Mörtel, die zuvor auch an anderen Objekten der Wartburg identifiziert worden waren, sind hier ebenfalls vorhanden. Im Mauerwerk sind partiell gipshaltige Mörtel nachgewiesen worden. Ebenso waren Nitrat- und Chloridbelastungen vorhanden. Die Chloridbelastungen in den Wehrmauern waren teilweise auf die Verwendung von salzbelasteten Werra-sanden für Reparaturen und partielle Neuaufbauten zurückzuführen.

Sehr hohe Materialfeuchten wurden in den Proben südlicher Exposition (Abb. 8, SB7) ermittelt. Bedingt durch die angrenzende Bebauung kam es zu Abweichungen der Witterungsbeaufschlagung im Vergleich zu den regional üblichen Beanspruchungen.

Mit der Gebäudehöhe nehmen an der Nordwand (Abb. 9) auch die Materialfeuchten in den Bohrprofilen und somit im Mauerwerk zu. Über eine geeignete Verfüugung muss hier der Witterungsschutz wieder hergestellt werden.

Die wasserlöslichen Salze (Abb. 10 und 11) in den Mörtelproben des Bergfrieds werden durch Gips bestimmt. Neben Einflüssen aus der Umwelt ist partiell mit Umlagerungen aus dem Inneren des Bergfrieds (aus gipshaltigen Putzen) zu rechnen.

Es fällt bei den wasserlöslichen Bestandteilen häufig das Vorkommen von Magnesium auf. Mitte des 19. Jahrhunderts kamen mit den Romanzementen magnesiumhaltige Bindemittel zu Einsatz. Vergleichbare Situationen sind an nahezu allen Gebäuden auf der Wartburg anzutreffen.

Schäden an den Wehrmauern waren auch auf Wässer, die vor allem in erd- und felsberührten Mauerteile eindringen, zurückzuführen. Zur Reduktion der Feuchtebelastungen im Bereich der Burgmauern sind ab 2010 eine Vielzahl von Drainagebohrungen angelegt worden. Das dort gewonnene Bohrmateriale wurde gesichtet, untersucht und Informationen zu den vorhandenen Baustoffen aufgenommen.

Aus dem gewonnenen Bohrkernmaterial sind Mörtel- und Betonproben nach visueller Zuordnung entnommen und Tiefenbereichen zugeordnet worden. Zur orientierenden Einordnung der Proben erfolgten Bestimmungen der „fiktiven Gipsgehalte“ (nach [7]) durch stufenweise Trocknung bei 40 und 105 °C und elektrochemische Messungen an Eluat aus den Baustoffen.

Aus den Untersuchungen (Abb. 13) ergaben sich Hinweise auf relevante Gipsgehalte in Baustoffen und auch auf das Vorhandensein von Baustoffen mit hydraulischen Bindemitteln. Für die hier dargestellten Bohrungen zeichnet sich ab, dass in den unteren Tei-

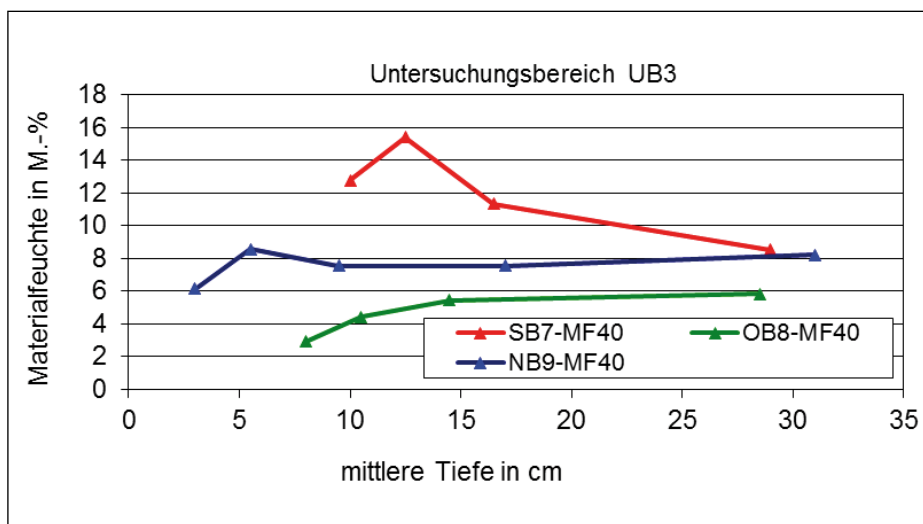


Abb. 8
Materialfeuchten in Mörteln im Untersuchungsbereich 3 (siehe auch Abb. 6)

Abb. 9
Materialfeuchten in Mörteln von der Nordwand (siehe auch Abb. 6)

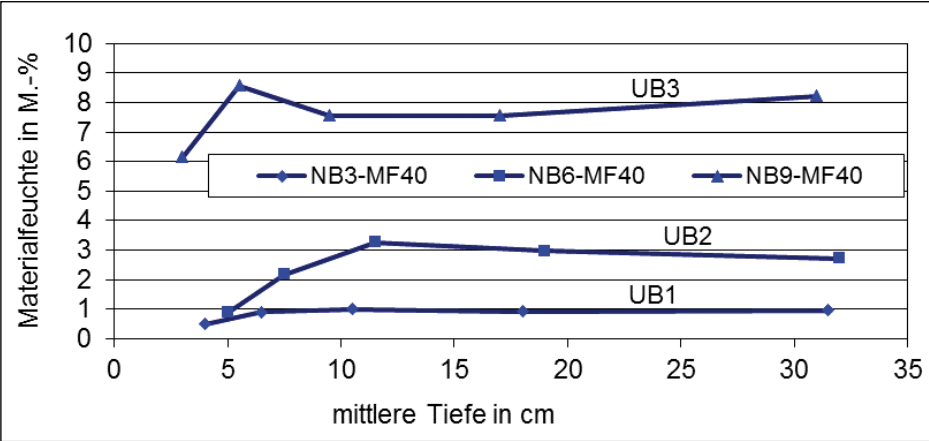


Abb. 10
Wasserlösliches Sulfat und Calcium in Mörteln vom Bergfried

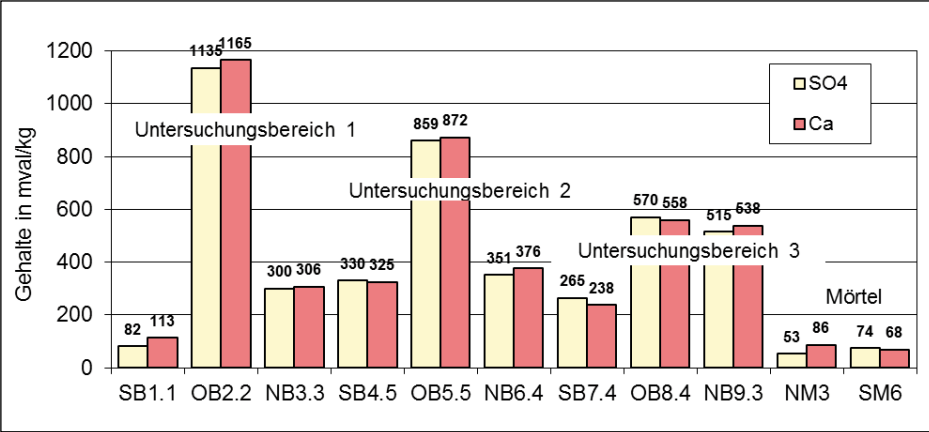


Abb. 11
Wasserlösliche Ionen in von Mörteln vom Bergfried

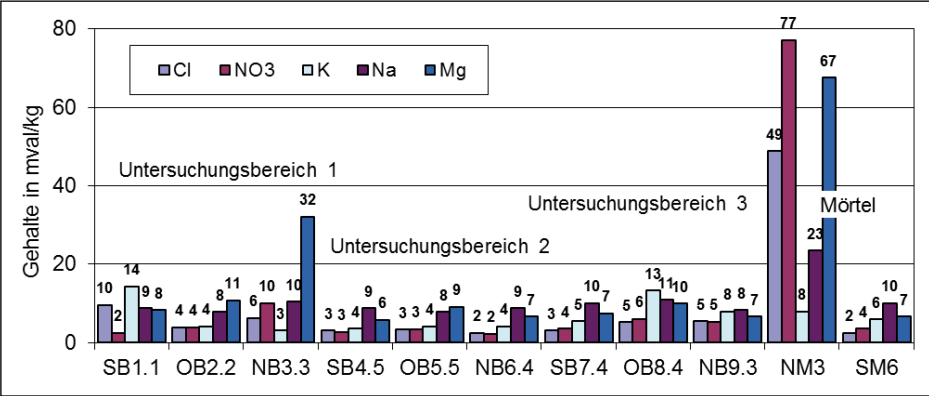
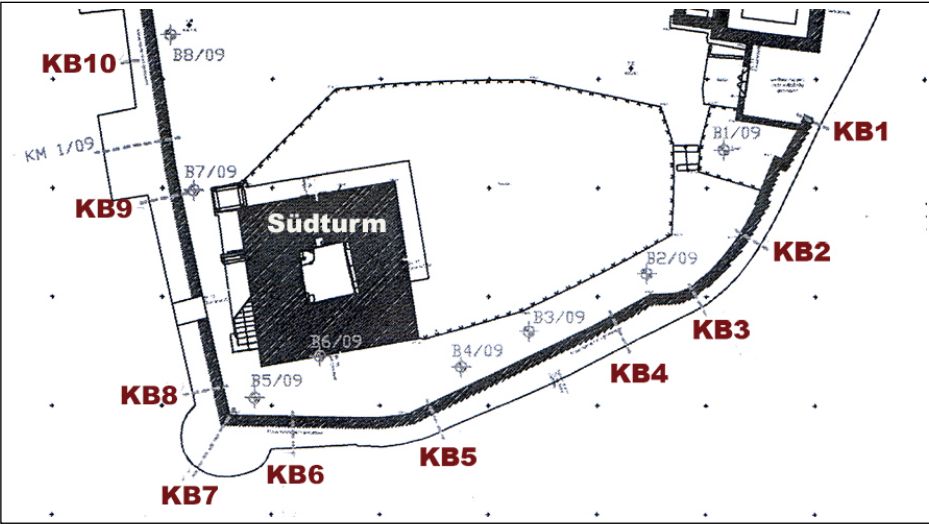
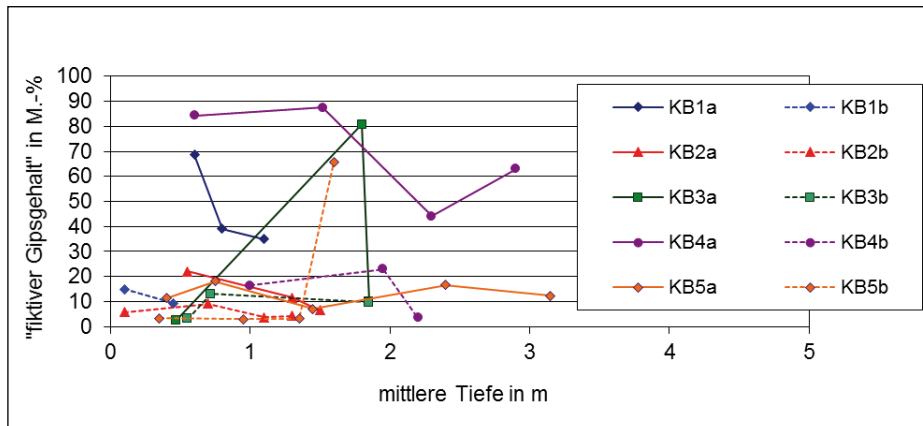
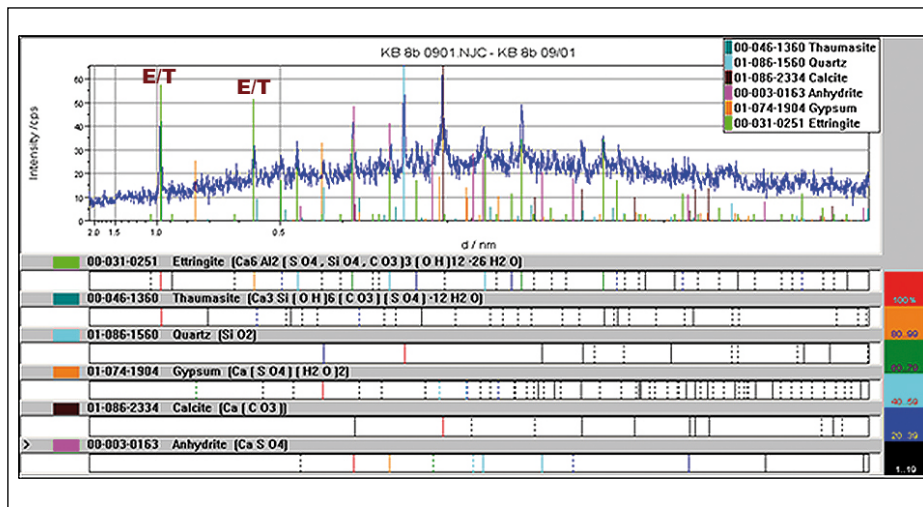


Abb. 12
Südliche Wehrmauer mit Kennzeichnung der Lagen von Drainagebohrungen



**Abb. 13**

„Fiktive Gipsgehalte“ in Proben aus der südlichen Wehrmauer (a – Mauerfuß; b – 3 m über a)

**Abb. 14**

XRD-Aufnahme einer Probe der Bohrung KB8 (E/T – Ettringit/Thaumasit)

len der Wehrmauern (Bohrungen „a“) mit dem Vorhandensein von Gipsmörteln zu rechnen ist. In den oberen erdberührten Mauerbereichen (Bohrungen „b“) sind es eher gipshaltige Mörtel und/oder hydraulisch gebundene Mörtel.

Zur Überprüfung wurden an einer Probenauswahl ergänzend zu den „fiktiven“ auch die realen Gipsgehalte bestimmt und die hohen Werte bestätigt.

Aus der XRD-Aufnahme in Abbildung 14 geht hervor, dass partiell mit der Bildung von Treibmineralen zu rechnen ist. Es handelt sich um eine oberflächennah entnommene Probe (0,1 bis 0,2 m unter der Wandoberfläche) aus einem Kontaktbereich zwischen einem gelblichen Mörtel und Beton.

4 Mörtelentwicklung – Baustellenmörtel

Ausgehend von den vorhandenen Informationen aus baubegleitenden Maßnahmen zwischen 1995 und 2001 wurde im Jahr 2001 mit der Entwicklung von Mörteln für die Verfügu von Mauerwerk, das überwiegend aus Wartburgkonglomeratquadern und/oder -bruchsteinen besteht, begonnen.

Hauptaufgabe der Mörtel musste der Schutz des Mauerwerks vor eindringenden Wässern sein. Beson-

dere Anforderungen für die Mörtelentwicklung stellten die gipshaltigen Mörtel und Gipsmörtel im Mauerwerk und in der Verfügu sowie das Vorhandensein von Romanzementen in Mörteln aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts dar. Partiiell hohe Feuchte- und/oder Salzbelastungen im Mauerwerk waren zusätzliche Belastungen, denen die Verfügmörtel standhalten mussten.

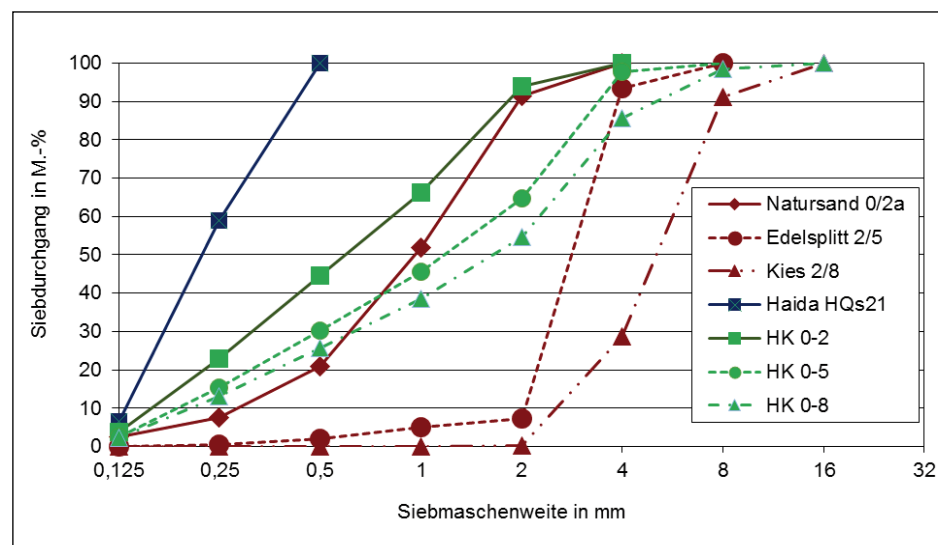
Die Vielzahl der Verfügmörtel im Bestand und deren heterogene Zusammensetzungen erlaubten keine „stofflich identischen Nachstellungen“ auf der Basis von Analysen eines „ausgewählten“ oder „typischen“ Mörtels und dessen Ausgangsstoffen.

Nach den Ergebnissen der Bestandsuntersuchungen durften keine natürlich hydraulischen Kalke, Trasskalke, Dolomitzalke oder Romankalke als Mörtelbindemittel zum Einsatz kommen. Luftkalk als alleiniges Bindemittel in den Verfügmörteln konnte keine ausreichende Witterungsbeständigkeit gewährleisten. Zement als alleiniges Bindemittel hätte den Feuchte-transport aus dem Mauerwerk heraus behindert und Schäden an den Steinflanken wären die Folge.

Aus den genannten Gründen fiel die Entscheidung auf ein Bindemittelsystem aus Luftkalkhydrat und Zement. Die Sieblinien der Gesteinskörnungen sollten

Tab. 1 Eigenschaftsauswahl von Mörteln („HK0-...“) und von Wartburgkonglomerat („WK“)

	WK	HK0-2	HK0-5	HK0-8
Zement in kg/kg Gesteinskörnung		0,108	0,100	0,100
Kalkhydrat in kg/kg Gesteinskörnung		0,130	0,130	0,130
Anmachwasser in kg/kg Gesteinskörnung		0,269	0,240	0,235
Mörteldruckfestigkeit in N/mm ²		5,7	7,1	7,4
Würfeldruckfestigkeit in N/mm ²	103,9/135,7			
Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m ² ·h ^{0,5}	0,36/1,24	1,23	0,88	0,73

**Abb. 15**

Sieblinien der Ausgangsstoffe und
Sollsieblinien HK0-2, -5, -8

den häufig im Bestand vorkommenden Körnungen entsprechen und auch deren Grundfarbigkeiten. Um Möglichkeiten von Salzeinlagerungen in die Mörtelstrukturen zu schaffen, mussten Poren erzeugt werden. In extremen Anwendungen sollten spezielle Zusätze zu den Grundrezepturen zur Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme, ohne deutliche Erhöhungen der Festigkeiten, möglich sein.

Recherchen zu geeigneten Gesteinskörnungen führten zu einer Lagerstätte bei Hohenkirchen (nahe Gotha), die sehr hohe Anteile Porphyry enthält und von der Farbigkeit den Anforderungen entsprach. Zur Variation der Sieblinien, die zur Steuerung der Mörtelzusammensetzung erforderlich war, wurden als Körnungen Natursand 0/2a, Edelsplitt 2/5 und Kies 2/8 ausgewählt. Die Abstimmung der Feinanteile in den Gesteinskörnungen erfolgte durch die Zugabe von Quarzsand HQs21 (Haida).

Als Bindemittel wurden Weißkalkhydrat (CL90) sowie Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand und niedrigem wirksamen Alkaligehalt gewählt.

Zur Modifizierung der Eigenschaften sind eine Reinacrylatdispersion und eine Methylcellulose aus-

gewählt worden. Zur Feineinstellung der Farbigkeit dienten fein granuliert Eisenoxidpigmente.

Vor dem Beginn von Laborversuchen wurden die Sieblinien („HK“) der Gesteinskörnungen (Abb. 15) festgelegt und Grundrezepturen für die Mörtel nach bekannten Ansätzen [8] berechnet. Zielgrößen der Berechnungen der Rezepturen für Kalk-Zement-Mörtel ohne Acrylatdispersionszusatz waren Druckfestigkeiten zwischen 5 und 8 N/mm².

Die Kennwertauswahl in Tabelle 1 zeigt, dass die Ziele für die Festigkeiten erreicht wurden.

Durch die Zugabe von Acrylatdispersion (0,015 bis 0,018 kg/kg Gesteinskörnung) verringerten sich die Druckfestigkeiten um 23 % und die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten vergrößerten sich um 37 %. Die Haftungen an den Steinflanken in den Fugenbereichen verbesserten sich signifikant.

Im Bereich des Zugangs zur Dornitz ist ein stark feuchtebelasteter Bereich westlich neben dem Hofzugang für Testflächen (Abb. 16) ausgewählt worden.

Die Mörtel sollten nach der Erprobung für Verfugarbeiten als Baustellenmischungen zum Einsatz kommen. Zur Steigerung der Effektivität wurden die Mörtel

von Verarbeitern – ohne Abstimmung mit den Mörtelentwicklern – vorkonfektioniert bzw. als Trockenmörtel bereitgestellt. Dabei kam es zum Austausch der farbigen Gesteinskörnungen durch Quarzsande und auch zu Fehlinterpretationen der Rezepturvorgaben.

5 Mörtelentwicklung – Werk trockenmörtel

Zur Vermeidung von Fehlern bei der Rezeptureinhaltung wurde ab 2009 der ausschließliche Einsatz von fertigen Trockenmischungen für die Herstellung von Verfugmörteln angestrebt. Das erste Objekt, an dem in Größenordnungen Neuverfugungen erfolgten, war das Wartburghotel. An diesem bestehen die gesamten Außenfassaden aus Wartburgkonglomeratmauerwerk und auch die Gefache sind mit dem gleichen Steinmaterial ausgemauert.

Es war kurzfristig ein geeigneter Trockenmörtel auf der Basis der zuvor beschriebenen Rezepturen für Baustellenmischungen zu entwickeln. Nach einer Recherche wurde ein Produzent in Thüringen, der geeignete Ausgangsstoffe – vor allem farbige Sande – für sein Standardsortiment verwendet, gefunden.

Die bereits mehrere Jahre stehenden Probeachsen zeigten, dass die Rezepturen HK 0-2, HK 0-5 und HK 0-8 eine gute Basis darstellten. Auf der Baustelle sollte dem Trockenmörtel bei Bedarf mit dem Anmachwasser Acrylatdispersion zugegeben werden können.

Nach der Analyse der beim gewählten Produzenten vorhandenen Ausgangsstoffe (Bindemittel, Gesteinskörnungen, Zusätze) und deren Charakterisierung (Sieblinien, Festigkeitsentwicklung, Verträglichkeiten mit den Anforderungen aus dem Bestand) wurden die Rezepturen der Baustellenmischungen durch die MFPA Weimar auf die Verhältnisse der konkreten Trockenmörtelproduktion angepasst.

Am Wartburghotel kam die Rezeptur „WART-MAX 1“ (Testfläche in Abb. 17) – basierend auf der Rezeptur HK 0-5 (4 mm Größtkorn) – in einer leicht pigmentierten Variante zum Einsatz. Basis für die farbliche Abstimmung war die Bruchfläche des Mörtels aus einem ungestörten Originalbefund. Zur Verringerung des Wasseraufnahmevermögens diente ein geringer Zusatz an Stearat.

Für die Anwendung an anderen Objekten der Wartburg waren feinere („WART-MAX2F“ Größtkorn 2 mm) und gröbere („WART-MAX3G“ Größtkorn 6 bis 8 mm) Trockenmörtel erforderlich. Für ein breites Spektrum der Oberflächengestaltung der Fugen sollten die drei Grundmörtel untereinander – bei Beibehaltung der Eigenschaften – in jedem Verhältnis mischbar sein, zur farblichen Anpassung an den jeweiligen Bestand waren Pigmentierungen erforderlich und für Anwendungen im Mauerkronenbereich erhöhte Anforderungen an die Wasserabweisung.

Für die weitere Entwicklung des Mörtelsystems wurden Druckfestigkeiten zwischen 3 und 5 N/mm² angestrebt. Die Baustellenmischungen sind zunächst auf die Ausgangsstoffe der Trockenmörtelmischungen umgerechnet worden. Für die orientierende Ermittlung der Rezepturparameter zur Erreichung der Druckfestigkeiten wurden bekannte Berechnungsansätze [8] genutzt und die Verarbeitbarkeit über Frischmörteluntersuchungen überprüft. Bei diesen Berechnungen sind Rezepturen ohne und mit Dispersionszusatz berücksichtigt worden.

Die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen (Abb. 18) zeigen, dass die Zielvorgaben für die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen Verfestigungsdauer erreicht werden. Zwischen den Druck- und Biegezugfestigkeiten ergaben sich lineare Zusammenhänge (Abb. 19). Lineare Zusammenhänge ergaben sich auch zum dynamischen E-Modul.



Abb. 16 Probeachse nach 10 Jahren Standzeit mit Baustellenmischung HK0-5



Abb. 17 Testfläche im Komplex des Wartburghotels auf der Basis „WART-MAX1“

Abb. 18
Druckfestigkeiten von Mörteln der Varianten „WART-MAX“

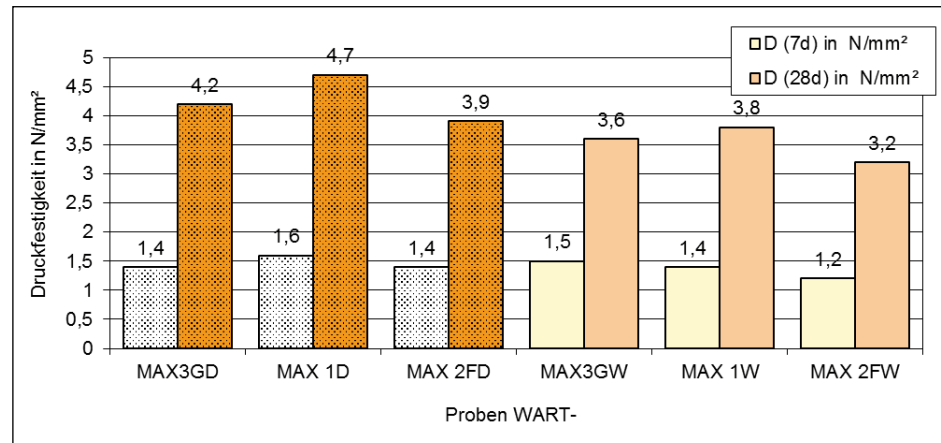


Abb. 19
Zusammenhang zwischen Biegezug- und Druckfestigkeit

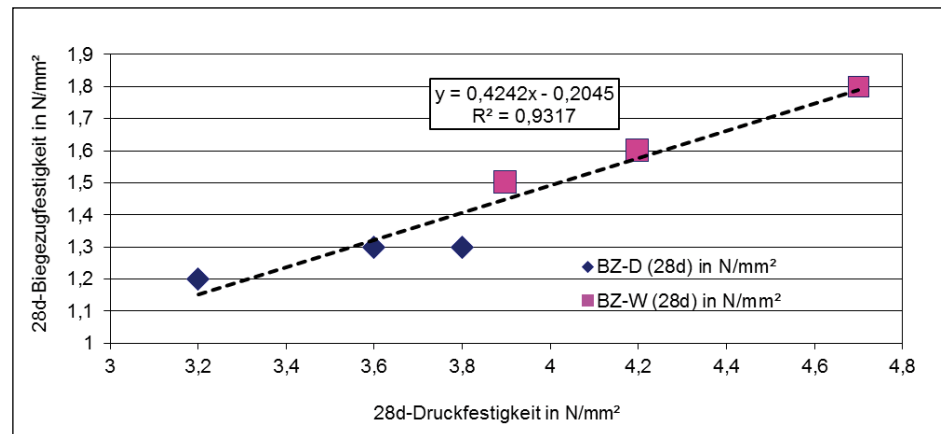


Abb. 20
Verhältnisse Druck-/Biegezugfestigkeit für Mörtel

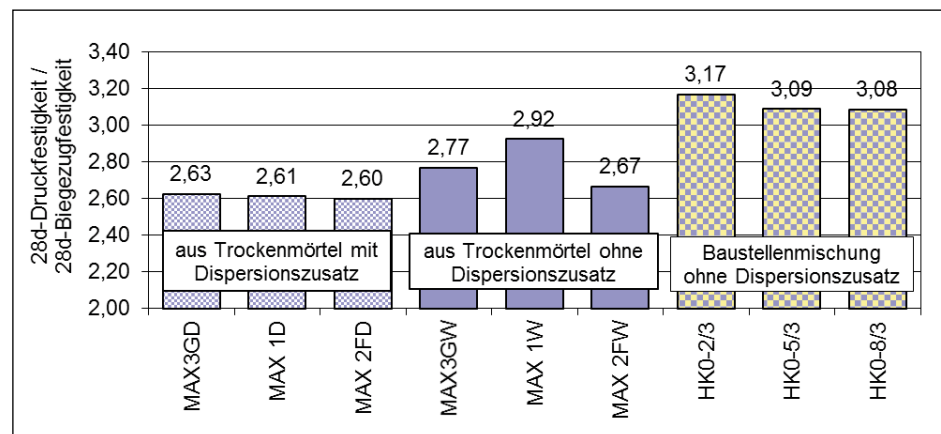
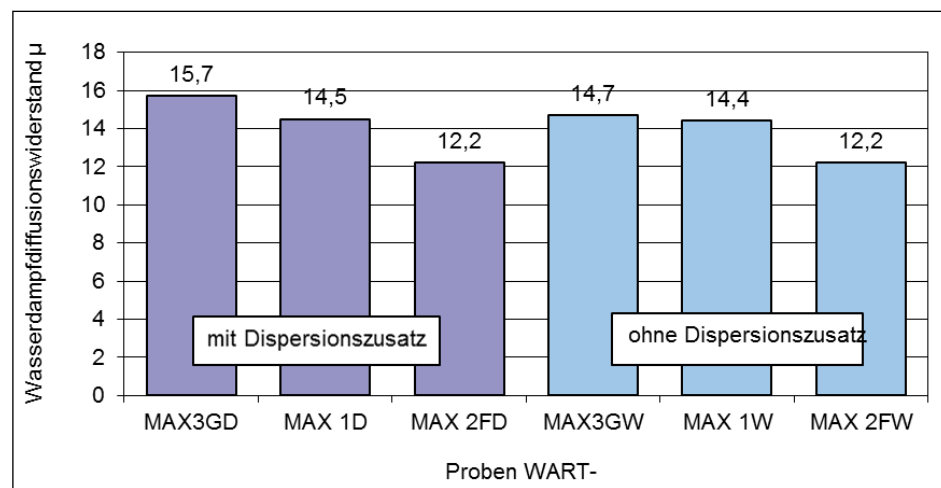


Abb. 21
Wasserdampfdiffusionswiderstand für Mörtel (trockene Proben)



Im Bereich der Denkmalpflege wird oft ein Verhältnis von Druck-/Biegezugfestigkeit <3 angestrebt. Für die Rezepturvarianten „WART-MAX“ wird diese Bedingung erfüllt (Abb. 20). Vor allem in den Rezepturvarianten mit Dispersionszusatz wird der Wert deutlich unterschritten. Durch den Zusatz der Acrylatdispersion (13 g 30 %-ige Dispersion/kg Trockenmörtel) kommt es zu keiner Verschlechterung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes (Abb. 21).

Die kapillare Wasseraufnahme (Prüfkörper Mörtelscheiben \varnothing 11 cm, Dicke 2 cm) war bereits durch Zusatz von 0,2 M-% Aluminiumstearat zum Trockenmörtel auf einen Bereich zwischen 0,5 und 2 kg/m²·h eingestellt worden. Durch den Zusatz von Dispersion verringern sich die Werte etwas (Abb. 22).

Um den Gestaltungsspielraum bei der Anwendung zu erweitern, wurde die Mischbarkeit der drei Trockenmörtelvarianten „WART-MAX1“, „WART-MAX2“ und „WART-MAX3“ geordert. Ergebnisse der Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Versuchen, in denen jeweils Mischungen 1 : 1, 1/3 : 2/3 und 2/3 : 1/3 untersucht wurden, enthält Abbildung 23. Die Werte bewegen sich in Größenordnungen mit denen der drei Ausgangsmörtel. Somit war eine Mischbarkeit der drei Trockenmörtel untereinander in jedem Verhältnis möglich.

Die Zinnen vor dem Gang der südlichen Wehrmauer sind mit großformatigen Natursteinplatten

abgedeckt. Diese verhindern dort den Eintrag von Wasser in das Mauerwerk. Aufgrund von denkmalpflegerischen Anforderungen musste aber die Mauerwerksstruktur an der Oberseite des Wehrganges erhalten bleiben und erforderte besondere Systementwicklungen. Die Festigkeit und Dichtheit der Vermörtel wurde durch geringfügige Erhöhung der Zementanteile und der Anteile an Stearat erhöht. Weiterhin ist die Technologie der Fugenabdichtung angepasst worden. Es erfolgte eine Tiefenverfugung, die etwa 2 bis 3 cm unter den Oberflächen der Steine des Wehrganges lag. Auf dieser Verfugung wurde eine Abdichtung mit einer Bitumenacrylatemulsion aufgebaut und abschließend erfolgte die Neuverfugung mit dem zuvor angeführten Mörtelsystem.

Für die drei verschiedenen Grundmörtel des Systems wurde eine Vielzahl an Farbmustern erarbeitet. Dabei war zu beachten, dass die Zugabe von Dispersion, die Bedingungen bei der Verarbeitung (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind), die Standzeiten der Mörtel und die unterschiedliche Bearbeitung der Oberflächen Einflüsse auf die Farbtöne haben.

6 Realisierung

Parallel zu den zuvor geschilderten Entwicklungen wurden Testflächen und Musterachsen angelegt. Diese dienten der technologischen Erprobung und auch

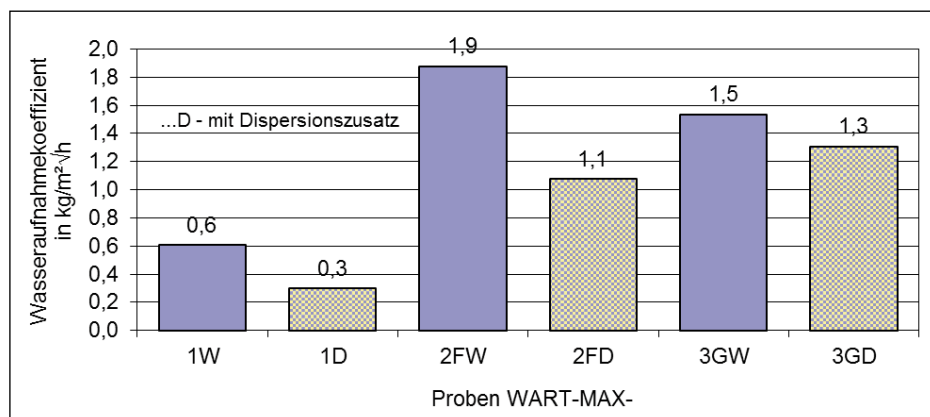


Abb. 22
Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten für Mörtel mit und ohne Dispersionszusatz

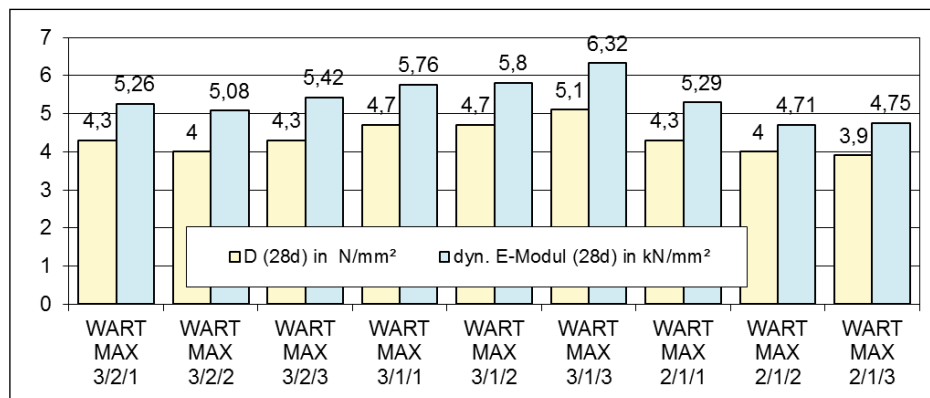


Abb. 23
Mechanische Kennwerte für Trockenmörtelmischungen



Abb. 24 Westliche Wehrmauer – putzartige Verfugung, anschließend gestrahlt



Abb. 25 Westliche Wehrmauer – Mörtel wie in Abbildung 24



Abb. 26 Altverfugung mit Romanzementmörtel und pigmentierte Neuverfugung WART-MAX2



Abb. 27 Hofseite der südlichen Wehrmauer

zum Abgleich der erhaltenen Ergebnissen mit den angestrebten Zielen.

Das erarbeitete Trockenmörtelsystem bot die Möglichkeit, eine gleichbleibende Mörtelqualität für die Ausführung der Verfugungen bereitzustellen. Die Arbeiten wurden von verschiedenen Firmen in mehreren Baulosen ausgeführt.

Die Abbildungen 24 bis 27 zeigen eine kleine Auswahl von unterschiedlichen Ausführungen der Verfugungen auf Basis des entwickelten Trockenmörtelsystems.

Weitere Beispiele zur Ausführung von Verfugungen auf der Wartburg und auch an anderen Objekten enthält ein Leitfaden für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerk [9].

Quellen

- [1] Voss, G.: Bau- und Kunstdenkmäler Thüringens. Die Wartburg. Heft XLI. Verlag von Gustav Fischer. Jena. 1917

- [2] Gabelentz, H.v.d.: Die Wartburg – Ein Wegweiser durch ihre Geschichte und Bauten. 3. Auflage. Verlag F. Bruckmann. München. ca. 1940
- [3] Schuchardt, G.: Wiederherstellung und Aufbau der Wartburg zum national-dynastischen Denkmal im 19. Jahrhundert. In: Die Schwind-Fresken auf der Wartburg. Arbeitshefte des Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege. Heft 14. 1998. S. 8–14
- [4] Zier, H.-W., Seifert, F.: Steinerergänzungsmörtel mit Acrylatdispersion als Bindemittel. In: Boué, A.: Steinerergänzung. Fraunhofer IRB Verlag. 1999. S. 64–81
- [5] Seifert, F., Zier, H.-W.: Zusammenfassende Darstellung zum Stand der Entwicklung des acrylatdispersionsgebundenen Steinerergänzungssystems. In: Qualitätssicherung in der Steinkonservierung Arbeitsheft der Thüringischen Landesamtes für Denkmalpflege. Neue Folge 1. 2001. S. 29–59

- [6] Weise, G., Zier, H.-W.: Produktion von Romanzementen in Thüringen und Beispiele für deren Anwendung. In: Hydraulische Bindemittel im 19. Jahrhundert auf dem Gebiet der heutigen Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen. IFS-Bericht Nr. 43. 2012. S. 31–38
- [7] Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden. WTA-Merkblatt. 2-11-2007/D. S. 9
- [8] Zier, H.-W., Weise, G.: Untersuchungen zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Mischungsverhältnissen, Zuschlagparametern und Druckfestigkeiten bei Putzmörteln. In: Bontotechnik. Heft 1. 1989. S. 27–30
- [9] Dreuse, H., Zier, H.-W., Grassegger-Schön, G.: Leitfaden für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerk. Fraunhofer IRB Verlag. 2015

Abbildungen

Abb. 2–5, 7–11, 13–27: Zier, Hans-Werner, MFPA Weimar,

Abb. 1: Vorlage aus [2],

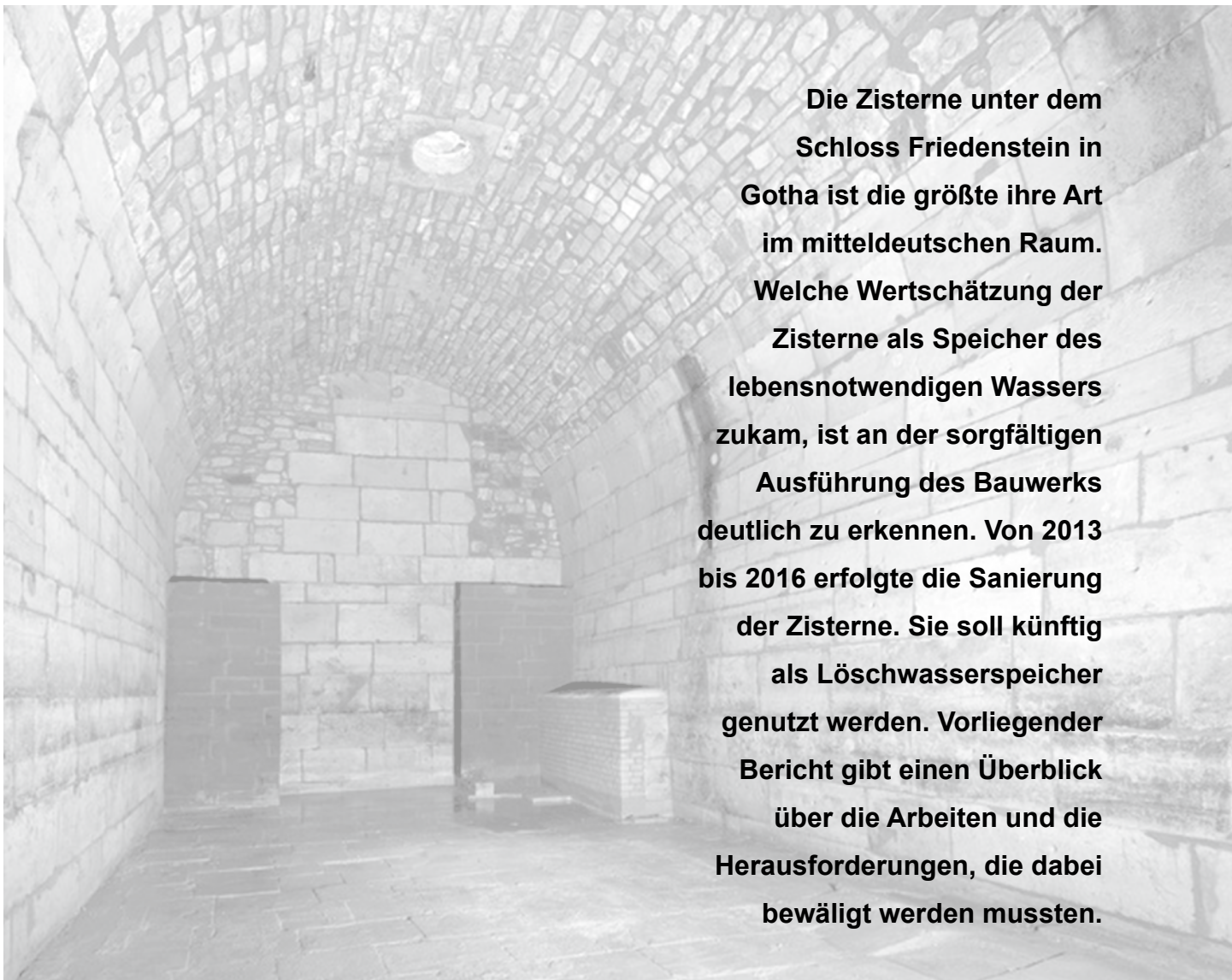
Abb. 6: Vorlage von der Wartburgstiftung Eisenach bereitgestellt,

Abb. 12: Vorlage durch Ingenieurbüro für Geotechnik Gotschol Mühlhausen bereitgestellt

Verborgenes vom Grimmenstein

Die Sanierung der Zisterne unter Schloss Friedenstein in Gotha

von Heike Kirsten



Die Zisterne unter dem Schloss Friedenstein in Gotha ist die größte ihre Art im mitteldeutschen Raum. Welche Wertschätzung der Zisterne als Speicher des lebensnotwendigen Wassers zukam, ist an der sorgfältigen Ausführung des Bauwerks deutlich zu erkennen. Von 2013 bis 2016 erfolgte die Sanierung der Zisterne. Sie soll künftig als Löschwasserspeicher genutzt werden. Vorliegender Bericht gibt einen Überblick über die Arbeiten und die Herausforderungen, die dabei bewältigt werden mussten.

1 Einleitung

Im nordöstlichen Teil des Hofes des frühbarocken Schlosses Friedenstein in Gotha befindet sich eine mächtige, als Tonnengewölbe ausgebildete, unterirdische Zisterne. Diese wurde 1541 bis 1543 für den Vorgängerbau, die Festung Grimmenstein, errichtet und mit dem Bau von Schloss Friedenstein leicht verändert. Die Zisterne diente seit dem 16. Jahrhundert der Versorgung der Schlossanlage mit Brauchwasser und wurde von den Regenwasserleitungen der Dächer gespeist. Sie ist bis auf den südlichen Schildbogen und den Plattenbelag des Fußbodens fast vollständig aus der Bauzeit erhalten geblieben. Verstärkungen, Umbauten und Reparaturen fanden 1643 und 1774 statt. Die Nutzung der Zisterne als solche ist von 1542 bis 1876 nachgewiesen, danach verfüllte man sie zu zwei Dritteln mit Schutt. In den Jahren 2013 bis 2016 wurde die Zisterne vollständig freigelegt, grundlegend saniert und abgedichtet, um sie als Löschwasserreservoir zu nutzen.

2 Objektbeschreibung und Konstruktion

Aufbau und Konstruktion der Zisterne waren in der Planungsphase zu Beginn der Baumaßnahmen nur



Abb. 1 Blick zur nördlichen Schildwand vor Beräumung der Zisterne

im eingeschränkten Maße bekannt. Durch die Verfüllung mit Bauschutt war das Bauwerk nicht begehbar. Nur kletternd konnte man über Schuttberge Teile des Gewölbes und der nördlichen Schildwand erreichen (Abb. 1). Der Zugang war nur über einen 90×90 cm breiten und 1,40 m tiefen Schacht möglich, der auf eine überwölbte Treppe an der Ostseite in die Zisterne führte.

Glücklicherweise gab es jedoch eine sehr gute Aktenlage, die durch einen Bauforscher im Vorfeld

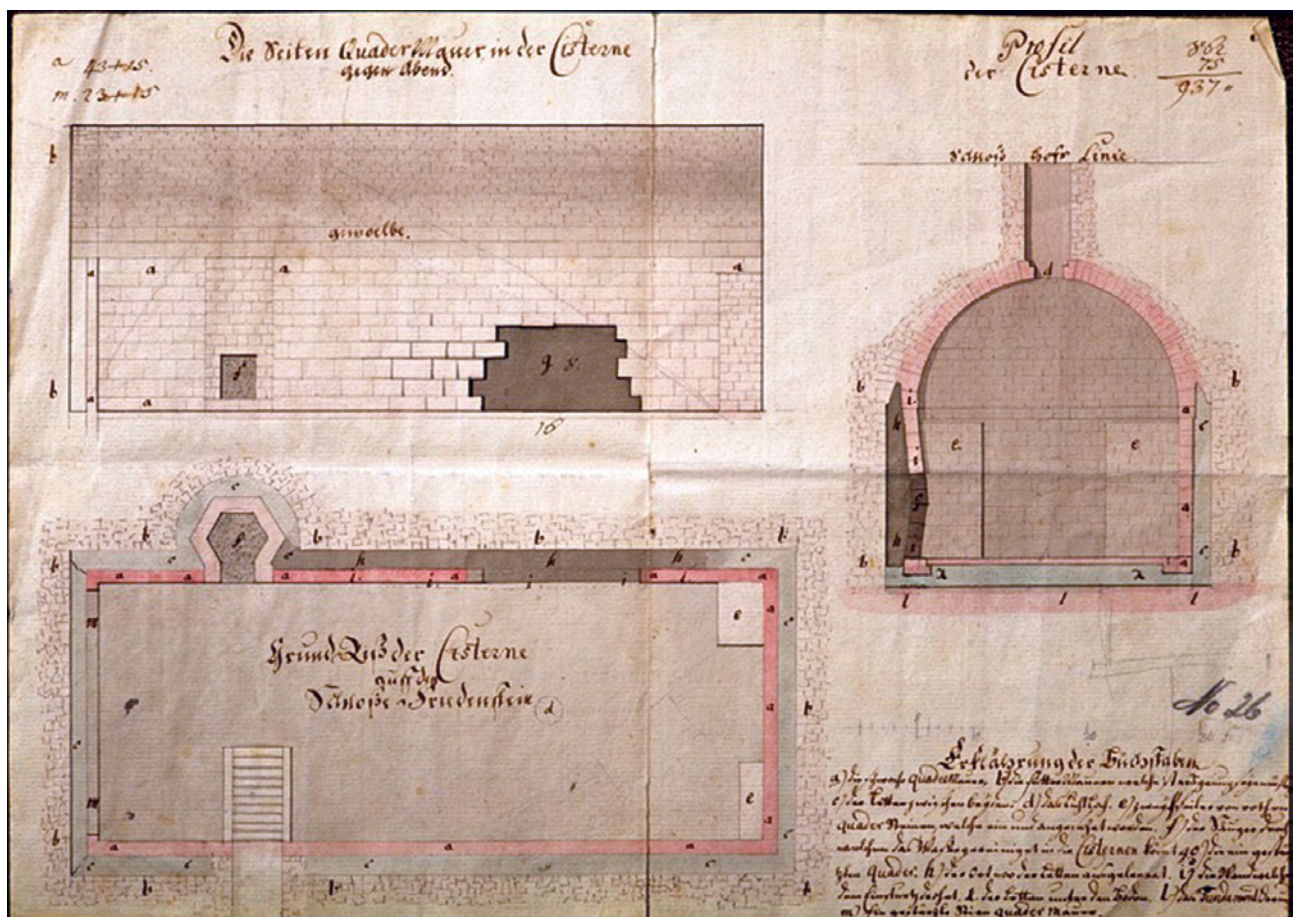


Abb. 2 Grundriss und Schnitte der Zisterne in einer Bestandszeichnung von 1772



Abb. 3 Freigelegter Filterschacht mit Kopfstück einer Steinrinne, über die die Wasserzufuhr erfolgte



Abb. 4 Schöpfschacht im Scheitel des Gewölbes (Blick von unten)

recherchiert worden war [1]. Eine Bestandszeichnung aus dem 18. Jahrhundert, die anlässlich einer Reparatur angefertigt worden war, erwies sich bis ins Detail hinein als zutreffend (Abb. 2) [2].

Die Zisterne ist als Tonnengewölbe ausgeführt und hat eine Grundfläche von $16,30 \times 6,45$ m bei einer lichten Höhe von 7,30 m. Die Kämpferlinie liegt bei ca. 3,80 m. Da die Zisterne zur Wasserversorgung der Festung Grimmenstein errichtet worden war, musste die Überwölbung bombensicher sein.

Das heutige Fußbodenniveau befindet sich etwa 10 m unter dem des Schlosshofes, damit ergibt sich eine fast 3,00 m starke Überdeckung der wichtigen Wasserversorgungsanlage. Allein die Gewölbekappe besteht aus bis zu 80 cm starken Sandsteinen. Die Bauausführung bis zur Kämpferlinie des Tonnengewölbes ist zweischalig. Die innere Schale besteht aus hochkant versetzten, mächtigen Sandsteinplatten mit einer Stärke von 25 bis 35 cm, in die eine umlaufende Nut eingearbeitet wurde. In diese Nut waren zur Abdichtung der Stoß- und Lagerfugen, Hanf und Unschlitt (tierischer Talg) eingebracht und mit einer Mischung aus Wachs, Pech und Harz „verkittet“. Hinter diesen Platten gibt es eine zweite Mauerschale aus Muschelkalkbruchsteinen mit einer Wandstärke von bis zu 1,50 m, der dazwischen liegende ca. 40 cm starke Hohlraum ist mit Ton ausgestampft (Abb. 7). Für den Fußboden der Zisterne wurden gefälzte Sandsteinplatten verwendet, die wiederum auf einem abdichtenden Tonboden liegen.

Von den bauzeitlichen Wassereinläufen haben sich nur einige Bauteile erhalten, die in einen 9,50 m tiefen, aus Sandsteinquadern gemauerten Filterschacht an der Westseite der Zisterne münden (Abb. 3). Von diesem sechseckigen Schacht aus, der eine lichte Weite von $1,50 \times 1,80$ m hat und mit Kies gefüllt war, führt schließlich eine 20×30 cm große Öff-

nung in einen gemauerten Sandfang in die Zisterne. Die Schöpföffnung liegt im nördlichen Teil des Gewölbescheitels und war oberirdisch verschüttet (Abb. 4).

Im südlichen Bereich der östlichen Längswand befindet sich eine weit in die Zisterne hinein ragende stiegenähnliche Sandsteintreppe, von der lediglich der Anfang der Treppengeländer zu erkennen war.

3 Materialbestand

Das Mauerwerk der Zisterne stellt sich zweigeteilt als Quader- und Schichtenmauerwerk dar. Das Quadermauerwerk erstreckt sich vom Boden bis über den Kämpferbereich des Gewölbes. Dabei handelt es sich um die bereits erwähnten, senkrecht (auf Spalt) stehenden Werksteine, die als „Verblendersteine“ vor die Tonabdichtung gestellt wurden. Als Steinmaterial wurde Seeberger Sandstein verwendet. Das Gewölbe oberhalb des Quadermauerwerks besteht aus hammergerechten Steinen, ebenfalls überwiegend aus Seeberger Sandstein. Im Mauerwerk hinter der Tonabdichtung wurden Bruchsteine aus Muschelkalkstein und Seeberger Sandstein verbaut.

Im östlichen Treppengewölbe, in der nördlichen Schildwand und im Filterschacht an der Westseite befinden sich rotbraune Sandsteine aus der geologischen Formation des Unteren Keupers (Lettenkeupersandsteine). Die Bodenplatten der Zisterne bestehen ebenfalls vollständig aus diesem Material.

Seeberger Sandstein

Der Seeberger Sandstein entstand in der geologischen Formation des Oberen Keupers (Rätsandstein). Sein Vorkommen liegt am Großen Seeberg südöstlich von Gotha. Der überwiegend feste Sandstein tritt in Bänken bis zu 2 m Stärke bei einer Kluftbildung in Abständen von einigen Metern auf. Der Seeberger

Sandstein besitzt eine gelb- bis gelbbraune, teilweise auch weißgelbe Farbe und ist häufig braun geadert. Je nach Bank ist er fein- bis mittelkörnig ausgebildet. Das Bindemittel besteht überwiegend aus Quarz, außerdem Tonen und Eisenverbindungen.

Die technischen Eigenschaften des Seeberger Sandsteins variieren je nach Ausbildung (Bank) mehr oder weniger stark. Seine Druckfestigkeit liegt zwischen 80 und 100 N/mm², seine Biegezugfestigkeit zwischen 11 und 18 N/mm². Der Seeberger Sandstein besitzt eine gute bis sehr gute Verwitterungsbeständigkeit. Nur geringer zementierte Partien neigen zum Absanden [3].

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden Materialkennwerte von Proben aus der Zisterne ermittelt und mit Werten des Seeberger Sandsteins verglichen (Tab. 1).

Es wird deutlich, dass die in der Zisterne verbauten Steine die unteren Grenzwerte der üblichen technischen Kennwerte des Seeberger Sandsteins nicht bzw. nicht mehr erreichen. Möglicherweise ist es aufgrund der bereits lange andauernden hohen Durchfeuchtung des Mauerwerks zu einer sukzessiven Entfestigung des Steinmaterials gekommen.

Lettenkeupersandstein

Bei den in Gotha vorkommenden Lettenkeupersandsteinen handelt es sich um meist rötlich-braune, feinkörnige, feldspatreiche Sandsteine aus mehreren ehemaligen Steinbrüchen im heutigen Stadtgebiet. Sie sind gekennzeichnet durch tonig-ferritisches Bindemittel, hohen Feldspatanteil und eine eher mäßige Kornbindung.

Resultierend aus den petrographischen Merkmalen ergeben sich ungünstige technische Eigenschaften, wie relativ geringe Festigkeiten sowie eine hohe Porosität und Wasseraufnahme. Die Verwitterungsbeständigkeit ist überwiegend als schlecht zu bezeichnen. Typische Schadbilder sind, je nach Belastungsfall und Exposition, Absandungen, Abschuppungen und oberflächenparallele Schalenbildungen. Bei stärkerer Feuchtigkeitsbelastung kommt es zu einem Festigkeitsabfall von bis zu 50 % im Sandstein. Die Lettenkeupersandsteine sind für Wasserbauwerke, wie die Zisterne, eher nicht geeignet. Ihre Verwendung ist in der Zisterne auch nur für Ausbesserungen aus dem 17. Jahrhundert nachgewiesen [6].

Für die Lettenkeupersandsteine wurden ebenfalls Materialkennwerte von Proben aus der Zisterne ermittelt und eingeordnet. Es wird deutlich, dass die in der Zisterne verwendeten Sandsteine bereits stark an Festigkeit verloren haben (Tab. 2).

Versatz- und Fugenmörtel

In den Fugen der Werksteine und als Versatzmörtel konnten nur Kalkmörtel festgestellt werden [9]. Aufgrund der hohen Durchfeuchtung waren die Fugenmörtel des Gewölbemauerwerks überwiegend stark zersetzt und von tonigen Bestandteilen der Hinterfüllung durchdrungen. Die Fugen der Quadersteine in den Wänden der Zisterne waren überwiegend als Pressfugen ausgebildet. Das Bruchsteinmauerwerk der äußeren Mauerschale war erstaunlich gut in den Versatzmörtel eingebettet. Anhand von Bohrkernen konnte eine fast lückenlose Umhüllung der Bruchsteine festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass der

Tab. 1 Ausgewählte technische Kennwerte des Seeberger Sandsteins in der Zisterne und Vergleichswerte

Gesteinsart	Druckfestigkeit [N/mm ²]	W _{ath} [Gew.-%]
Sandstein aus dem Quadermauerwerk der Zisterne [4]	44,3	4,76
Sandstein aus dem Gewölbemauerwerk der Zisterne [4]	25,5	–
Seeberger Sandstein, Horizont „Grund“ [5]	93,0	4,95
Seeberger Sandstein, Horizont „Wappen“ [5]	86,0	5,91
Seeberger Sandstein, Horizont „Schersand“	58,0	7,39

Tab. 2 Ausgewählte technische Kennwerte des Gothaer Lettenkeupersandsteins in der Zisterne und Vergleichswerte

Gesteinsart	Druckfestigkeit [N/mm ²]	W _{ath} [Gew.-%]
Lettenkeupersandstein aus der Zisterne [7]	trocken: 10,5–12,5	9,10
Gothaer Lettenkeupersandstein [8]	trocken: 30,57 wassergesättigt: 16,38	10,43

Mörtel relativ dünnflüssig eingebracht oder sogar vergossen wurde (Abb. 5). Kalkmörtel fanden sich aber nicht nur in den Fugen, sondern auch auf den Oberflächen der Gewölbesteine. Dabei handelt es sich Überreste des Versatzmörtels, der bei der Herstellung des Gewölbes aus den Fugen gequollen und auf der Schalung des Gewölbes breit gelaufen ist (Abb. 6).

4 Schadenssituation

Das Mauerwerk der Zisterne war sehr stark durchfeuchtet. Zum Zeitpunkt der ersten Begutachtung (Januar 2013) lief ständig Wasser durch Steine und Fugen des Gewölbes. Die gesamte Oberfläche des

Gewölbemauerwerks war durch die Feuchtigkeit stark korrodiert und narbig bzw. streifig ausgewaschen. Weiterhin gab es zahlreiche weiße Kalkaussinterungen, die aus Lösungsvorgängen im Versatz- und Fugenmörtel resultierten (Abb. 6). Aufgrund der Durchfeuchtung war der gesamte Fugenmörtel sehr stark zurückgewittert und sehr weich. Der kraftschlüssige Verbund der Steine war dadurch nicht mehr gewährleistet und es drohte ein Herabstürzen von Steinen (Abb. 7). Im Gewölbe gab es zahlreiche großflächige Ausbruchstellen bis ca. 30 cm Tiefe (Abb. 8).

Einige Werksteine im Kämpferbereich waren stark ausgebrochen, so dass das Widerlager der Gewölbesteine gestört war (Abb. 9).

Abb. 5

Bohrkerne aus dem Mauerwerk, die den Wandaufbau zeigen
A = Quader aus Sandstein (25 bis 35 cm),
die die inneren Mauerschale zum Wasserbecken bilden
B = Tonschicht (20 bis 40 cm),
die zwischen den Mauerschalen liegt und zur Abdichtung dient
C = Bruchsteinmauerwerk (bis 1,50 m dick)
aus Muschelkalk und Ziegelbrocken, das mit Kalkmörtel nahezu lückenlos vermörtelt ist



Abb. 6

Fugen- und Versatzmörtel des Bruchsteinmauerwerks. Bei den putzähnlichen Mörtelresten handelt es sich um die Reste des überschüssigen Versatzmörtels, der bei der Herstellung des Gewölbes aus den Fugen gequollen und auf der Schalung des Gewölbes breit gelaufen ist. Im unteren Bildabschnitt sind Kalksinter zu erkennen.





Abb. 7 Sehr stark geschädigte Verfugung, die zu einer Lockerung von Steinen geführt hat. Die Steine wurden während der Beräumung der Zisterne verkeilt.



Abb. 8 Ausbrüche im Gewölbemauerwerk



Abb. 9 Ausbruch an einem Werkstein des Kämpfers

Das Mauerwerk und die Stufen der Zugangstreppe in die Zisterne waren relativ gut erhalten (Abb. 10). An der Sandsteinstiege, die in das Zisternenbecken führt, waren die Wangen und mehrere Stufen zerbrochen (Abb. 11).

Am Werksteinmauerwerk der Seitenwände und der Schildbögen gab es ebenfalls Ausbrüche, wenn auch nicht in dem hohen Umfang wie am Gewölbemauerwerk. Der Zustand unterhalb der Schuttverfüllung konnte zunächst nicht eingeschätzt werden. Kernbohrungen an zugänglichen Quaderplatten der östlichen Längswand ergaben einen größeren Hohl-



Abb. 10 Zugangstreppe in die Zisterne



Abb. 11 Zerbrochene Treppe im Zisternenbecken

raum zwischen der Sandstein- und der Futtermauer. Die Tonabdichtung im Zwischenraum fehlte hier nahezu vollständig.

5 Instandsetzung der Zisterne

Ziel der Instandsetzung war die Sanierung der Zisterne und ihre Nutzung als Löschwasserreservoir. Dabei sollte eine rein konservatorische Bearbeitung erfolgen, d. h. Bestandssicherung und -erhalt, ohne weitere Eingriffe in das Bauwerk und ohne Rekonstruktion verloren gegangener Bauteile. Es war nicht beabsichtigt die Funktionstüchtigkeit der steinernen Zulauf- rinnen oder des Filterschachtes wieder herzustellen. Die Befüllung mit Wasser sollte einmalig mittels Wassersschläuchen vorgenommen und nur im Bedarfsfall nachgefüllt werden. Durch die Archivrecherchen war bekannt, dass die Zisterne vor ihrer Verfüllung mit Schutt nicht mehr wasserdicht war. Eine Instandsetzung der Tonschicht wäre jedoch ohne den Rückbau der vorderen Mauerschale nicht möglich gewesen, so

dass von vornherein eine zusätzliche Abdichtung des Wasserbeckens vorgesehen war.

Voraussetzung für die Sanierung der Zisterne war weiterhin eine Isolierung der Gewölbetonne gegen die eindringende Feuchtigkeit von oben und eine Beräumung des gesamten Schutts, der seit Ende des 19. Jahrhunderts eingefüllt worden war. Um diese Arbeiten durchführen zu können, waren ein besserer Zugang und eine Sicherung des Mauerwerks während der Beräumung erforderlich. Planungsarbeiten für die eigentliche Sanierung waren im Vorfeld nur bedingt möglich, weil der Zustand des Mauerwerks nicht ausreichend bekannt war. Fast alle Entscheidungen mussten daher baubegleitend getroffen werden.

5.1 Erschließung, Beräumung und oberirdische Abdichtung der Zisterne

Der Einstieg zur Zisterne war so eng, dass eine Belieferung mit Gerüst- und Baumaterial nicht möglich war. Deshalb erfolgte zunächst eine Vergrößerung des Zugangsschachtes auf 1,65 × 1,15 m. Durch den

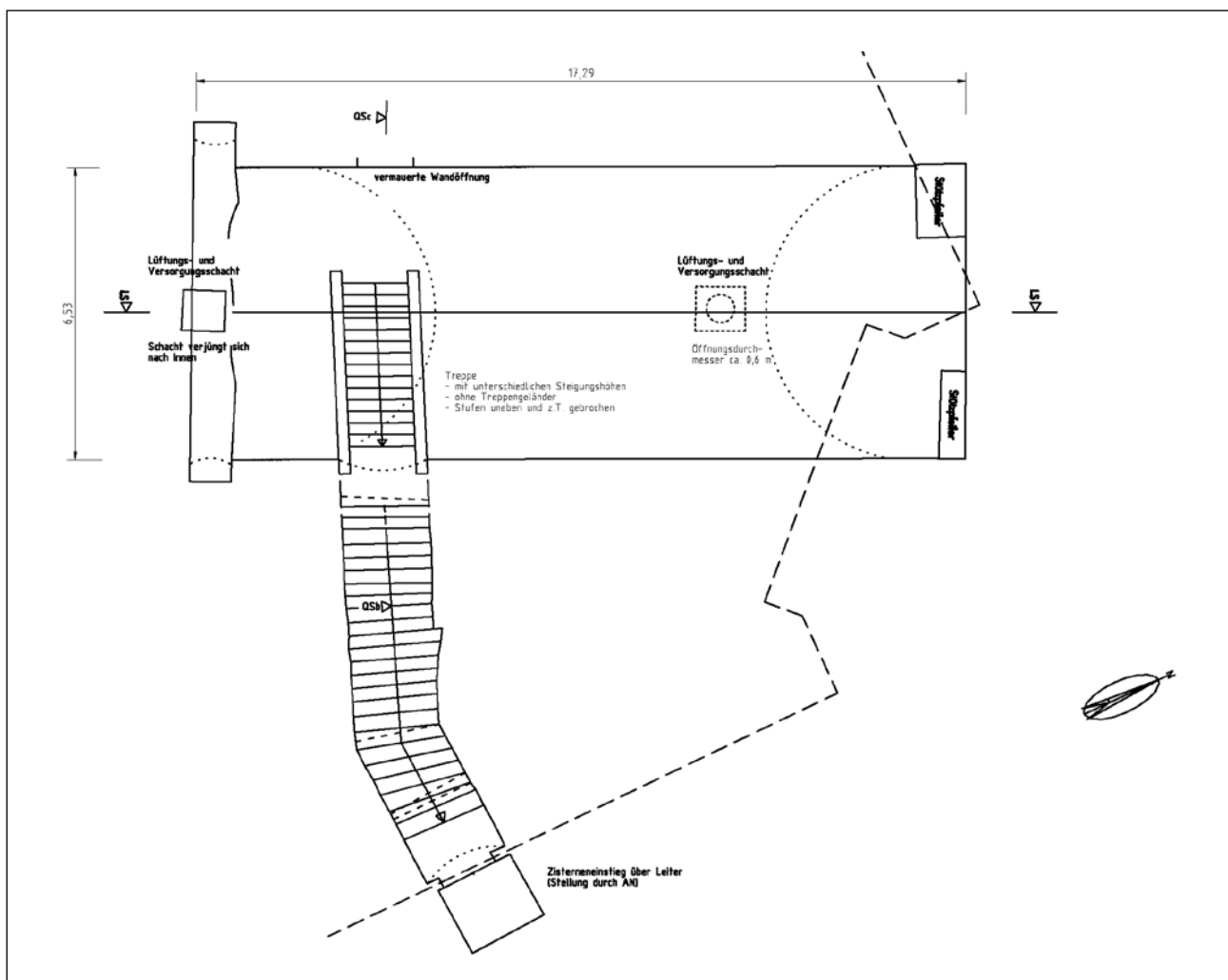


Abb. 12 Grundriss der Zisterne mit Zugang und Schachttöffnungen



Abb. 13 Vergrößerter Zugangsschacht

Rückbau der zwei oberen Stufen der Zugangstreppe war eine Absenkung des Bodenniveaus möglich, so dass der Schacht und das Treppengewölbe aufrecht stehend begangen werden konnten (Abb. 13). Zusätzlich wurde die alte Schöpföffnung im Gewölbescheitel freigelegt und eine weitere Öffnung oberhalb des südlichen Schildbogens für die Entsorgung des Bauschutts genutzt (Abb. 12).

Für die Beräumung des Schutts in der Zisterne und im Filterschacht konnten keine Maschinen benutzt werden, die gesamte Verfüllung wurde mittels Menschenkraft ausgegraben. Die Entsorgung des Schutts erfolgte über einen Transportbehälter, der mit einem Flaschenzug durch die südliche Schildbogenöffnung nach oben gezogen wurde (Abb. 14).

Die Arbeiten wurden durch Feuchtigkeit, die immer wieder in die Zisterne eindringen konnte, sehr erschwert. Über weite Abschnitte war die Verfüllung nass, verklebt und verdichtet. Während der Beräumung erfolgte eine ständige Kontrolle durch den Statiker, der teilweise Zwischensicherungen im Mauerwerk veranlassen musste. So wurden Fugen im Bereich lockerer Steine ausgekeilt (Abb. 9) und entlang der Ostseite engmaschige Vernadelungen vorgenommen. Insgesamt wurden 670 m³ Schutt über einen Zeitraum von fünf Monaten aus der Zisterne geräumt. Interessante archäologische Befunde konnten dabei leider nicht gemacht werden.

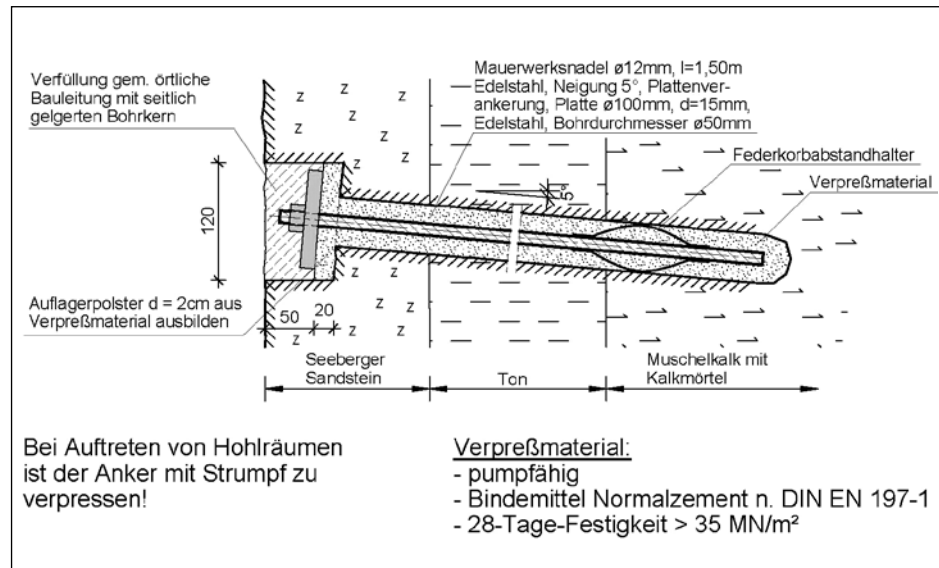


Abb. 14 Entsorgung des Bauschutts

Die Abdichtung der Zisterne gegen eindringende Feuchtigkeit von oben erwies sich als sehr schwierig. Ursprünglich befand sich hier das Brauhaus der Festung Grimmstein. Reste von Mauerwerk und steinernen Wasserrinnen aus dem 16. Jahrhundert kreuzten den Bearbeitungsbereich. Zahlreiche Versorgungsleitungen des 20. Jahrhunderts, insbesondere eine dicke Abwasserleitung aus Beton, verhinderten darüber hinaus eine Freilegung der Gewölbeoberseiten.



Abb. 15 Eingebaute und verdichtete Tonabdichtung

**Abb. 16**

Detail der Mauerwerksnadel und der Nadelkopfausbildung (Ingenieurbüro für Baustatik und Grundbau, Auszug aus Plan Ü2 vom 09.05.14)

Aus diesem Grund entschieden wir uns für eine Isolierung mittels einer Tonpackung. Zur Anwendung kam eine DERNOTON®-Fertigmischung. Das ist eine einbaufertige Tonmischung für nachträgliche Abdichtungsarbeiten an Bauwerken. Durch eine spezielle Rezeptierung treten keine Schrumpfungen und Rissbildungen und damit Dichtungsverlust auf. Der Einbau und die Verarbeitung von DERNOTON® sind relativ einfach. Zunächst wurde der Boden oberhalb der Zisterne bis in eine Tiefe von 80cm abgetragen und der Untergrund verdichtet. Im Anschluss wurde die Tonmischung gleichmäßig verteilt und mittels eines Benzinstampfers auf 97 % Proctordichte verdichtet. Im verdichteten Zustand muss die Stärke der Abdichtungsschicht 15 bis 20cm betragen. Schichtstärke und Verdichtungsgrad wurden kontrolliert. Auf die fertige Tonabdichtung wurde ein Schutzvlies verlegt. Darüber kam eine 40 cm starke Sandpackung, die als Unterbau für ein später einzubauendes Naturstein-

pflaster dienen soll. Sämtliche in die Abdichtungsebene hineinragenden Bauteile, wie z.B. die historischen Mauerreste und der Schöpfschacht sowie Leitungs- und Rohrdurchdringungen wurden mit eingedichtet (Abb. 15).

5.2 Sanierung der Zisterne/statische Sicherung

Für die Sanierung war ein Raumgerüst erforderlich, das durch den freigelegten ehemaligen Schöpfschacht in die Zisterne herabgelassen wurde. Es erfolgte eine Hochdruckreinigung (Kärcher) aller Steinoberflächen und der Bodenplatten, das anfallende Waschwasser wurde abgepumpt.

Sanierung des Gewölbemauerwerks

Die Sanierung des Gewölbes erfolgte durch Ausmauern der schadhaften Bereiche und eine tiefgreifende, kraftschlüssige Neuverfugung des gesamten Mauerwerks.

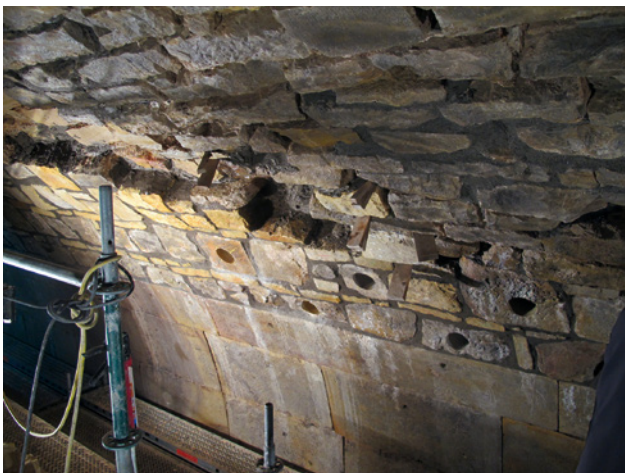


Abb. 17 Ausgemauerte Gewölbeabschnitte im Kämpferbereich. Die Kernbohrungen markieren die Lage der Mauerwerksnadeln.



Abb. 18 Neue Werksteinquader aus Seeberger Sandstein im Kämpferbereich. Oberhalb der Quader sind die Bohrkernverschlüsse der Vernadelung zu erkennen.

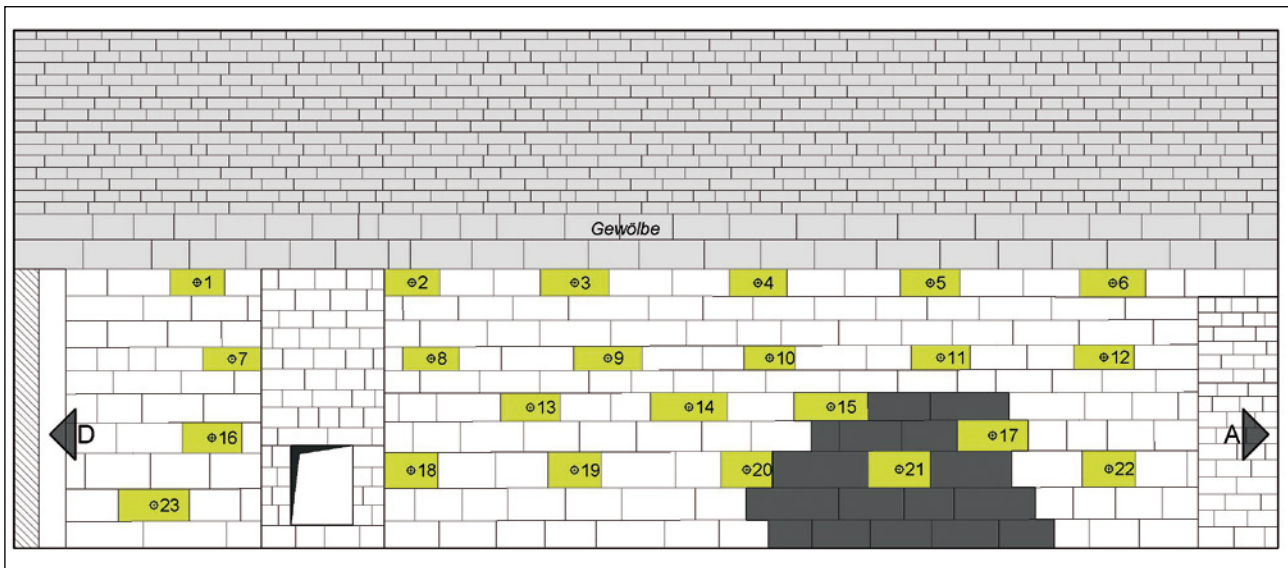


Abb. 19 Anordnung der Nadelanker an der westlichen Längswand der Zisterne
(Ingenieurbüro für Baustatik und Grundbau, Auszug aus Plan Ü2 vom 09.05.14)

Da es sich überwiegend um Überkopfarbeiten handelte, mussten Schalungen gebaut werden, um die Steine während des Abbindens des Versatzmörtels zu fixieren. Zusätzlich wurden die ausgemauerten Bereiche mit Mauerwerksnadeln (Länge 60 cm, Durchmesser 12 mm) fixiert.

Die immer noch im Mauerwerk vorhandene hohe Feuchtigkeit behinderte ein Abbinden des ursprünglich vorgesehenen Kalkmörtels erheblich, so dass auf einen Schachtbaumörtel (maxit mur 927) zurückgegriffen werden musste. Das ist ein Mauermörtel der Mörtelklasse M 20 EN 998-2 (MG IIIa DIN 1053), auf der Basis von sulfatbeständigem Zement und speziellen Sanden mit Stützkorn.

Im Kämpferbereich erfolgte über die gesamte Wandlänge in zwei Steinlagen eine Vernadelung der vorderen Mauerschale mit dem Kernmauerwerk. Dafür wurden 1,50 m lange Nadeln mit einem Durchmesser von 12 mm verwendet. Die Nadelkopfausbildung erfolgte versenkt im Werkstein und wurde mit dem zuvor entnommenen Bohrkern abgedeckt (Abb. 16 und 17).

Weiterhin wurden stark schadhafte Sandsteinquadern durch neue Werksteine ausgetauscht (Abb. 18). Durch diese Maßnahmen wurde das Widerlager des Tonnengewölbes grundlegend ertüchtigt.

Sanierung der Wand- und Bodenflächen

Die Werksteine der Wandflächen waren weitgehend gut erhalten, kleinere Ausbrüche spielten für die Erhaltung des Bestandes keine Rolle. Kernbohrungen in den Umfassungswänden ergaben allerdings mehrere Hohlräume zwischen Quadermauerwerk und Bruchsteinmauer. Teilweise konnte ein Ausbeulen

von Werksteinen und eine Verwerfung von Bodenplatten festgestellt werden (Abb. 20).

Aus diesem Grund waren bereits während der Beräumung sukzessive mit dem Schuttatrag Vernadelungen an den Wänden vorgenommen worden, die nach der Freilegung der Zisterne ergänzt wurden (Abb. 19). Die Ausführung der Vernadelung erfolgte analog der Arbeiten im Kämpferbereich mit 1,50 m langen Nadeln durch die Tonschicht bzw. den Hohlraum hindurch (Abb. 16).

Zusätzlich wurde bis in Höhe des künftigen Wasserstandes (2 m oberhalb des Zisternenbodens) eine Verpressung der Hohlräume vorgenommen. Auf den Fußboden wurde ein seitlich aussteifender Estrich in einer Stärke von 20 cm aufgebracht. Das war auch erforderlich, um einen ebenen Untergrund für die noch einzubringende Abdichtung zu schaffen, die aufgrund der Verschiebungen von Bodenplatten nicht gewährleistet war. Um den historischen Plattenbelag zu schützen, wurde zwischen Estrich und Fußboden bzw. Wandanschlüssen eine trennende Folienschicht verlegt.

Sanierung der Treppe

Die mehrfach zerbrochenen Treppenwangen erhielten eine Stützkonstruktion aus verzinktem Stahl. Dabei gab es eine Änderung der Anordnung, weil aus verschiedenen Gründen – anstelle des historischen Standortes – ein Schacht für die künftige Wasserpumpe errichtet werden musste. Die Neuordnung der Treppe erfolgte um 90° gedreht im Anschluss an den Pumpenschacht. Die Wangen und Stufen wurden restauratorisch bearbeitet, geklebt und ergänzt. Vor dem Einbau der Treppe musste eine Abdichtung un-

ter den Auflagepunkten der Treppe angebracht werden (Abb. 22 und 23).

6 Funktionsherstellung als Löschwasserreservoir

Die Zisterne soll künftig als Löschwasserspeicher genutzt werden. Im Brandschutzkonzept ist eine Mindestwassermenge von 200 m³ vorgesehen. Das bedeutet, dass in der Zisterne ein Wasserstand von 2 m abgesichert werden muss.

Die ursprüngliche Abdichtung aus Ton hinter dem Quadermauerwerk der Wände ist nicht mehr intakt, so dass neue Abdichtungsmöglichkeiten gefunden werden mussten. Seitens der Denkmalbehörden gab es die Auflage eine Abdichtung anzubringen, die re-

versibel ist und das Mauerwerk nicht schädigt. Wir haben uns daher für eine Folienabdichtung aus thermoplastischem, flexiblem Polyolefin (FPO) entschieden. Das sind Kunststoffbahnen, die in Dicken von 1,5 bis 2,0 mm hergestellt und mit einem Synthetischgewebe armiert werden. Die Verarbeitung erfolgt wie bei sonstigen Speicherbecken. An der Oberkante der künftigen Abdichtung wurden FPO-beschichtete Blechstreifen befestigt. In diese Bleche wurde ein Schutzvlies festgeklebt, mit dem die gesamte Fläche ausgekleidet wurde. Anschließend konnte die Abdichtungsfolie durch Aufschweißen an den Blechstreifen fixiert werden. Die restliche Fläche wurde ausgelegt und alle Ecken und Anschlussnähte in Handarbeit verschweißt.

Abb. 20

Zisterne nach der Sanierung des Gewölbes und der Wandflächen (Blick nach Norden). Rechts sind ausbeulende (gesicherte) Wandbereiche zu erkennen und davor verschobene Bodenplatten.

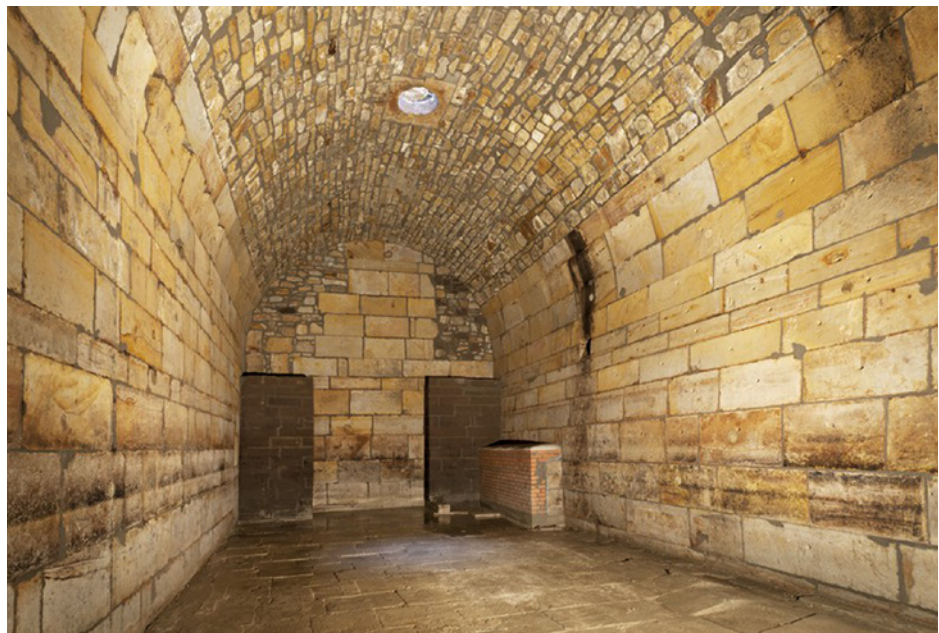


Abb. 21

Zisterne nach der Sanierung (Blick nach Süden). Im Hintergrund ist die Unterkonstruktion der noch einzubauenden Treppe zu sehen.

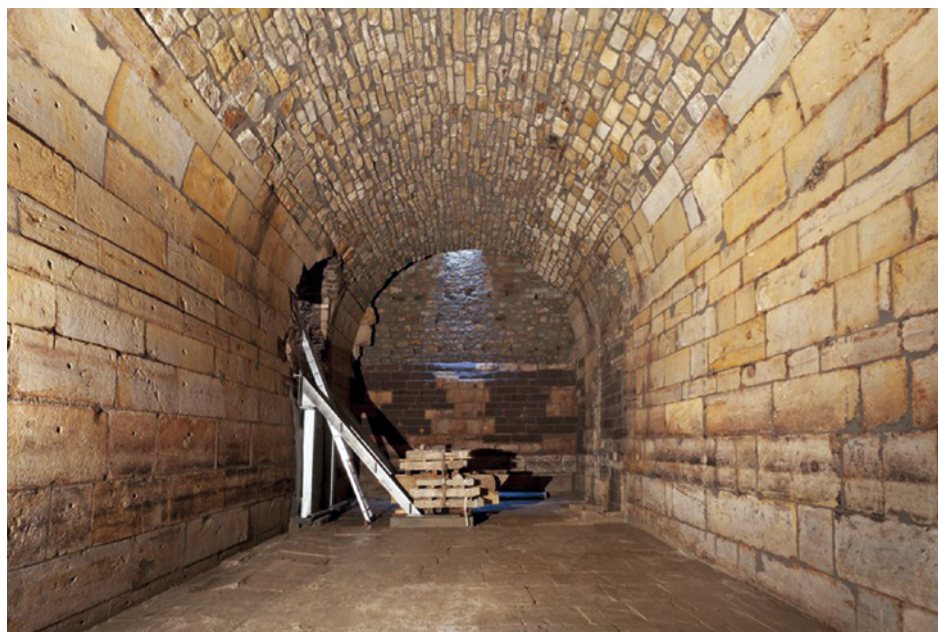




Abb. 22 Unterkonstruktion der Treppe



Abb. 23 Fertig eingebaute Treppe, ohne Geländer



Abb. 24 Fixierblech und Schutzvlies befestigt

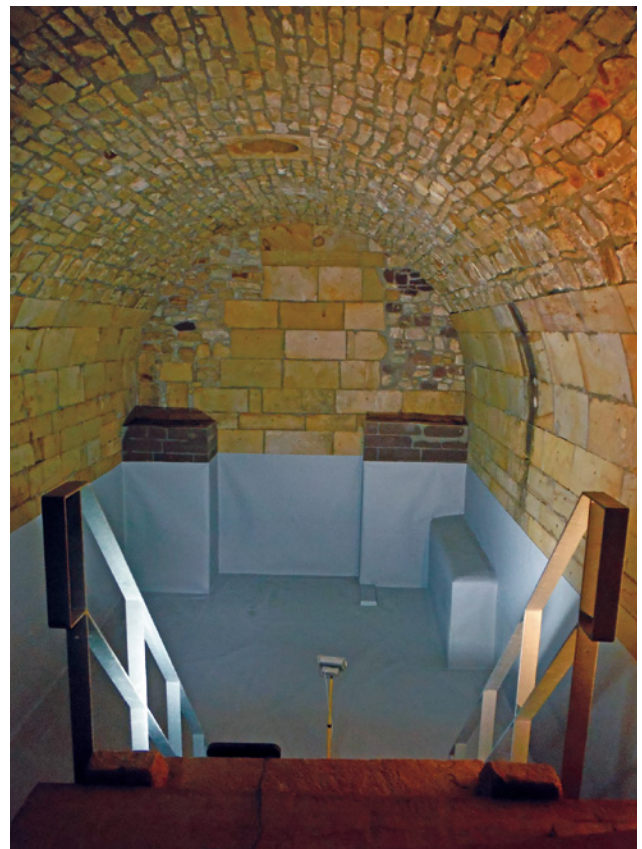


Abb. 25 Blick auf die fertige Abdichtung

Wegen der Tiefe der Zisterne (Fußboden ist 10m unter der Hofoberfläche) kann die Feuerwehr das Löschwasser nicht direkt über den früheren Schöpf-schacht auspumpen. Es ist erforderlich, eine separate Pumpe zu installieren, die das Wasser an eine Übergabestelle im oberen Zugangsschacht pumpt. Weiterhin muss eine netzunabhängige Stromversorgung installiert werden, die im Brandfall weiter funktioniert. Die technische Ausstattung der Zisterne ist gegenwärtig in Arbeit, die Übergabe der Zisterne ist für März 2016 vorgesehen.

7 Zusammenfassung

Die Zisterne unter dem Gothaer Schlosshof ist nicht nur ein bedeutendes Zeugnis neuzeitlicher Bau- und Ingenieurskunst, sie ist auch der größte bekannte Wasserspeicher ihrer Art aus dem 16. Jahrhundert im mitteldeutschen Raum. Welche Wertschätzung der Zisterne als Speicher des lebensnotwendigen Wassers zukam, ist an der sorgfältigen Ausführung des Bauwerks deutlich zu erkennen. Von 2013 bis 2016 erfolgte die Freilegung, Sanierung und Abdichtung der Zisterne. Wegen der hohen Durchfeuchtung des Mauerwerks und Einschränkungen der Baufreiheit mussten Technologien und Sanierungsmaterialien immer wieder neuen Erfordernissen angepasst werden. Mit der Nutzung als Löschwasserreservoir kann das Bauwerk wieder seiner ursprünglichen Bestimmung übergeben werden.

Literatur und Quellen

- [1] Hopf, U.: Die Zisterne des Schlosses Grimmenstein unter dem Hof des Schlosses Friedenstein in Gotha, Archivalische Recherchen, unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten, 12/2012
- [2] Grundriss und Schnitte der Zisterne, Johann David Weidner 1772, SSF, Inv. Nr. C-1.56
- [3] Hoppe, W.: Vorkommen und Beschaffenheit der Werk- und Dekorationssteine in Thüringen, Union Deutsche Verlagsgesellschaft Roth & Co., Berlin 1939, S. 123–128
- [4] Materialtechnische Bewertung des IMF (Instituts für Materialprüfung und -forschung GmbH) für mehrere unterirdische Anlagen des Schosses, u. a. für die Zisterne vom 19.12.2001, unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten, Blatt 10
- [5] Katzschmann et al: Natursteinkataster Thüringen – IFS-Bericht Nr. 23, Mainz 2006, S. 154
- [6] Hopf, U.: Die Zisterne des Schlosses Grimmenstein unter dem Hof des Schlosses Friedenstein in Gotha, Archivalische Recherchen, unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten, 12/2012
- [7] Materialtechnische Bewertung des IMF (Instituts für Materialprüfung und -forschung GmbH) für mehrere unterirdische Anlagen des Schosses, u. a. für die Zisterne vom 19.12.2001, unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten, Blatt 10
- [8] Kirsten, H.: Herkunft, Eigenschaften und Konservierungsmöglichkeiten von Lettenkeuper- und Schilfsandsteinen an Baudenkmalen in Thüringen, Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar 2009, Anhang II, S. 109
- [9] Materialtechnische Bewertung des IMF (Instituts für Materialprüfung und -forschung GmbH) Nordhausen für mehrere unterirdische Anlagen des Schosses, vom 19.12.2001, unveröffentlichter Untersuchungsbericht für die Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten, Blatt 11

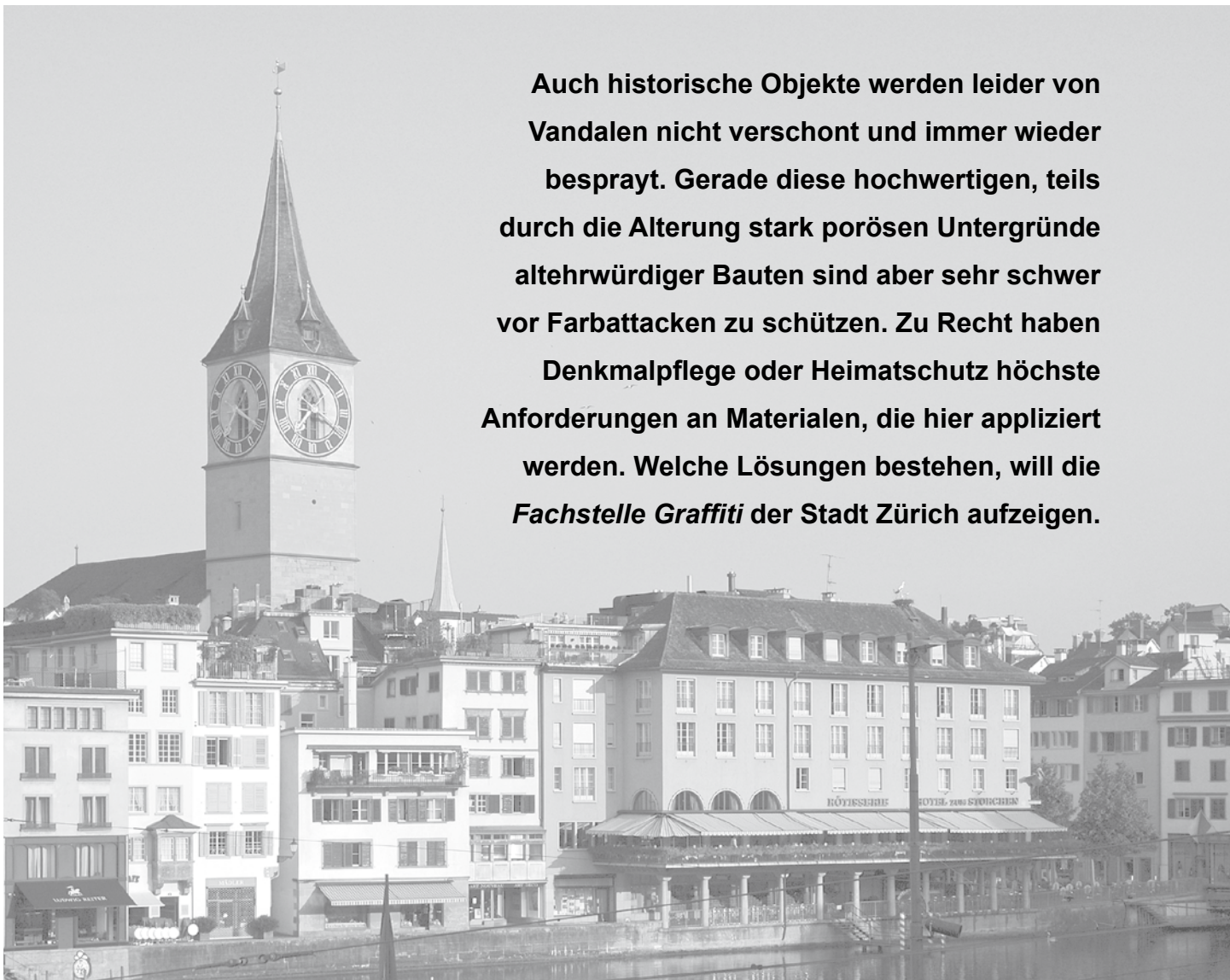
Abbildungen

Alle Abbildungen stammen von der Autorin mit folgenden Ausnahmen:

- Abb. 2: Johann David Weidner 1772, SSF, Inv. Nr. C-1.56
- Abb. 12: Zeichnung der Autorin auf Grundlage eines Plans des Büros für Bauten- und Kunstgutforschung Erfurt 2002
- Abb. 16, 19: Ingenieurbüro für Baustatik und Grundbau Erfurt, Auszug aus Plan Ü2 vom 09.05.14
- Abb. 20, 21: Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten

Praxiserfahrung und Anwendungsbeispiele mit einem selbst entwickelten Graffitischutz der Stadt Zürich

von Priska Rast



Auch historische Objekte werden leider von Vandalen nicht verschont und immer wieder besprayt. Gerade diese hochwertigen, teils durch die Alterung stark porösen Untergründe altherwürdiger Bauten sind aber sehr schwer vor Farbattacken zu schützen. Zu Recht haben Denkmalpflege oder Heimatschutz höchste Anforderungen an Materialien, die hier appliziert werden. Welche Lösungen bestehen, will die *Fachstelle Graffiti* der Stadt Zürich aufzeigen.

1 Wie funktioniert Graffitienschutz

1.1 Zweck Graffitienschutz

Spraylack, Filzstifte, Tinte oder andere Farben werden von porösen Untergründen wie von einem Schwamm aufgesogen und dringen tief ein. Um Farben von dort wieder zu lösen muss meist mit Lösungsmitteln und/oder mechanischer Einwirkung gearbeitet werden. Beides ist aufwändig und hinterlässt häufig Schäden und sichtbare Spuren auf den empfindlichen Untergründen. Graffitienschutz soll davor schützen, dass Farbe in poröse Untergründe eindringt und eine Reinigung ohne schädigende Eingriffe zulassen.

Um Farben wieder restlos vom Untergrund entfernen zu können, ist ein Graffitienschutz empfohlen. Diese transparenten Schutzschichten sind grundsätzlich zwei Systemen zuzuordnen. Einerseits gibt es semipermanente und permanente Systeme, welche mehrere Reinigungszyklen überdauern und der Bewetterung besser Stand halten (max. sechs Jahre). Andererseits gibt es sogenannte Opferschicht-Systeme, welche jeweils zusammen mit der Sprayfarbe abgewaschen und danach lokal neu aufgetragen werden. Sie sind empfindlicher gegenüber Witterungseinflüssen und halten diesen nur rund drei Jahre Stand.

1.2 Ansprüche und Belastungen

Leider enden die Ansprüche an Graffitienschutz häufig damit, Graffiti möglichst preisgünstig wieder entfernen zu können. Dabei werden Belastungen für Fassaden oder Gewässer ignoriert. Die Mehrzahl der Anbieter begnügt sich deswegen damit, möglichst alle Graffiti wieder entfernen zu können – ganz egal wie die Wirkung auf Untergrund und Gewässer ist.

Aus Sicht eines Eigentümers, der sein Objekt möglichst nachhaltig gepflegt wissen möchte, sind Produkte und Methoden zu meiden, die bekannt dafür sind, mittel- bis langfristig Schäden zu verursachen. Wird Graffitienschutz eingesetzt, sind deshalb auch sei-

ne bauphysikalischen Auswirkungen zu beachten. Die Denkmalpflege stellt zu Recht hohe Anforderungen an verwendete Produkte. Eigentlich müsste das jeder Eigentümer auch tun.

Die wichtigsten Anforderungen der Denkmalpflege sind einerseits die vollständige Reversibilität (keine irreversible Verbindung mit dem Untergrund wie z. B. Hydrophobierungen dies tun) und andererseits die Vermeidung von Kollateralschäden (z. B. Abplatzungen wegen Feuchtigkeitssperren).

Leider wirken fast alle bestehenden Graffitienschutzprodukte hydrophobierend. Auch wenn der hydrophobierende Anteil in einzelnen Produkten mit ca. zwei bis drei Prozent gering ist, kumuliert sich die Schicht durch ihre Irreversibilität bei jeder Erneuerung des Schutzes (alle drei bis sechs Jahre) bald zu einer dichten Barriere.

Einzig die Produktfamilie der Polysaccharide hält den Ansprüchen der Denkmalpflege stand. Leider aber nicht denen des Unterhalts. Polysaccharide quellen bei Regen um das 40-fache und werden so leicht ausgewaschen. Es gibt keine garantierte Mindeststandzeit. Sollte ein Anbieter das Gegenteil behaupten, fügt er den Polysacchariden hydrophobierende Stoffe zu.

Hydrophobierungen können auf verschiedene Arten Schäden verursachen. Einerseits kommt es häufig vor, dass hinterlaufendes oder aufsteigendes Wasser gefriert, sich ausdehnt und so Material abplatzen lässt. Andererseits kann auch ein Materialstau zu Abplatzungen führen. Dieser entsteht, wenn der reine Wasserdampf bei hohem Druck eine Hydrophobierung durchdringt, aber die vielen im Wasser gelösten Stoffe bei der Verdampfung hinter der Barriere zurück lässt. Dies führt über die Jahre zu einer Akkumulation von Mineralien und Salzen, welche ebenfalls einen beträchtlichen Druck erzeugen. Die weissen Rückstände der Ablagerungen sind auf der Abbildung 1 zu sehen.

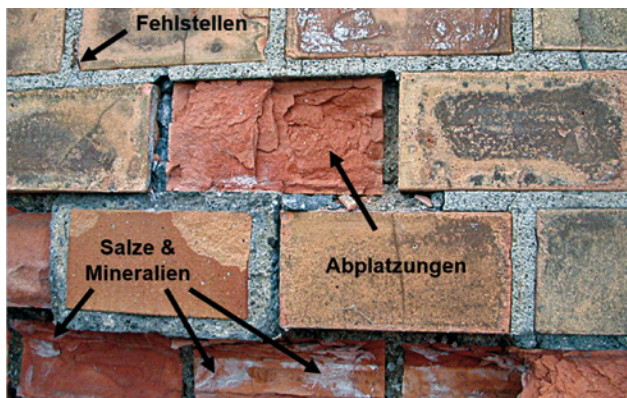


Abb. 1 Fehlstellen, Abplatzungen sowie sichtbare Rückstände von Salzen und Mineralien

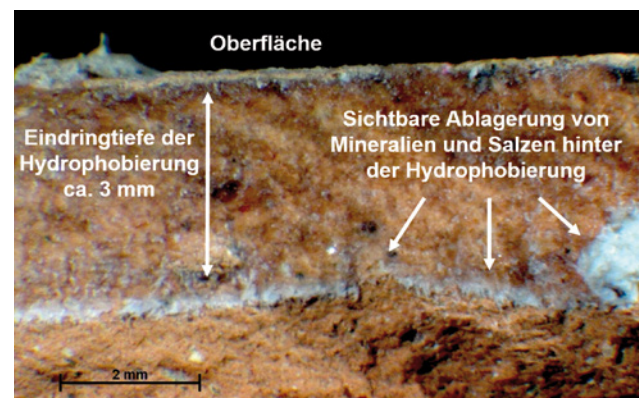


Abb. 2 Querschnitt Hydrophobierung

Mehr als 50 Jahre verbleiben Hydrophobierungen mehrere Millimeter tief im Gestein (Abb. 2). Sie gelten als irreversibel. Nur die obersten Mikrometer (μm) werden durch UV-Licht und andere Einflüsse abgebaut. Durch Risse und Fehlstellen kann Wasser hinter die Hydrophobierung gelangen und so zur Gefahr werden. Deshalb müssen einmal hydrophobierte Flächen periodisch nach-hydrophobiert werden, um das Risiko zu minimieren. Das Problem der aufsteigenden Feuchtigkeit aber bleibt.

In der Regel werden die Sockelbereiche bis auf eine Höhe von ca. 2,50 Metern gegen Graffiti Schäden beschichtet. Gerade diese Bauteile sind jedoch im Vergleich zur gesamten Gebäudehülle erhöhten Belastungen durch Feuchtigkeit und Salze ausgesetzt. Graffitienschutzmassnahmen, welche den Wasserdurchgang im Sockelbereich verändern, können zu Schäden oder zu einer Verlagerung bereits bestehender Schadensprozesse führen.

2 Produkt-Angebote im Markt

Es gibt unzählige Graffitienschutz- und Reinigungsprodukte auf dem Markt. Da dieser spezielle Markt aber insgesamt doch eher klein ist, gibt es keine Richtlinien von massgebenden und unabhängigen Stellen wie z. B. dem Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA).

Die vorhandenen Merkblätter z. B. von eingetragenen Vereinen sind teilweise nicht als unabhängig zu werten und/oder werden an – aus bauphysikalischer Sicht – zu niedrigen Anforderungen gemessen. Dazu kommt, dass sie in der Regel nicht frei zugänglich sind und so keine Verbreitung finden, um z. B. Bauherren oder Eigentümern bei der Ausschreibung von Graffitienschutz zu dienen.

Eines der Ziele im Beratungsauftrag der *Fachstelle Graffiti* ist es, Wissen rund um das Thema Graffiti aufzubauen und öffentlich zur Verfügung zu stellen. In Bezug auf den Einsatz von Produkten besteht der Anspruch der *Fachstelle Graffiti* darin, schädliche Stoffe zu meiden. Und dies nicht nur bei denkmalgeschützten Bauten. Es kann nicht sein, dass zum Schutz vor Graffiti ein Stoff aufgetragen wird, der selbst Schäden am Untergrund hervorruft.

In Zusammenarbeit mit dem Bauökologen wurde daher bestimmt, dass Biozide ebenso wie Halogene und höher konzentrierte Lösungsmittel in Produkten gemieden werden sollen. Diverse Produkte im bestehenden Markt zeigen, dass diese Anforderungen zu erfüllen sind. Schwieriger wird es bei den ebenfalls zu meidenden Methoden der Hydrophobierung oder der Nanotechnologie. Sie gehen eine irreversible Verbindung mit dem Untergrund ein und verändern und belasten diesen bauphysikalisch ungünstig.

Tab. 1 Ansprüche an Graffitienschutz aus denkmalpflegerischer Sicht und aus Sicht des Unterhalts

Ansprüche an Graffitienschutz aus denkmalpflegerischer Sicht	
Anspruch	Bemerkungen
vollständige Reversibilität von allen Untergründen	schließt Hydrophobierungen aus
keine negative Beeinflussung der bauphysikalischen Gegebenheiten – auch bei Entfernung	keine belastenden Stoffe in den Produkten während des ganzen Zyklus
optische Einfügung in den Bestand	transparent, nicht glänzend
unproblematisch für Menschen und Gewässer	biologisch abbaubar

Ansprüche an Graffitienschutz aus Sicht des Unterhalts	
Anspruch	Bemerkungen
Schutz gegen die gängigen Sprayer-Materialien	z. B. gegen Spraylack, perm. Marker, Tinte, Isoliergrund
einfach zu verarbeiten und unterhalten	All-in-one-Produkt
Witterungsbeständigkeit mind. 3 Jahre	UV-beständig, kälte-/hitzeresistent

Hier wird die Schwierigkeit in der Beratungssituation deutlich:

- Aus bauphysikalischer Sicht sollen nicht nur denkmalgeschützte Bauten mit einem Graffitienschutz bearbeitet werden, der keine Schäden verursacht. Alle Bauten sollten in diesen Genuss kommen. Kein Hauseigentümer will wegen Graffitienschutz Bauschäden riskieren.
- Die bisher einzige Produktfamilie, welche von der Denkmalpflege zugelassen war, hält im Unterhalt der Bewetterung nur dann Stand, wenn das Produkt hydrophobiert wird. Dies wiederum macht alle guten Produkteigenschaften im Sinne der Bauphysik wieder nichtig.
- Es fehlt also grundlegend an einem Produkt, welches bauphysikalisch unbedenklich ist, als Graffitienschutz aber seinen Dienst tut und mehrere Jahre der Bewetterung trotzt.

2.1 Entwicklung neuartiger Schutz durch die Stadt Zürich

Aus dem bestehenden Dilemma heraus hat die Stadt Zürich einem bauphysikalischen Labor den Auftrag zur Entwicklung eines neuartigen Schutzproduktes gegeben, welches erstmals allen genannten Ansprüchen genügt. Partner in der Entwicklung und Finanzierung war die Denkmalpflege der Stadt Zürich. Sie empfiehlt nun erstmals mit gutem Gewissen, an historischen oder geschützten Bauten einen Graffitienschutz anzubringen.

Nach rund dreijähriger Entwicklungs- und Testzeit (Abb. 3) hat die Stadt Zürich im Sommer 2015 begonnen, das Schutzprodukt für den Eigenbedarf selbst herzustellen. Die Zusammenarbeit mit dem Hersteller für den freien Markt (Keimfarben AG) ist im Aufbau. Ab Mitte 2016 ist *Aravel®* frei auf dem Markt zu

beziehen. Neben dem schweizer Markt wird auch der deutsche Markt beliefert.

Das Graffitienschutzprodukt der Stadt Zürich trägt den eingetragenen Markennamen *Aravel®* (lateinisch Ara: Denkmal, Vellus: Vlies in der Bedeutung von „das Goldene Vlies“). Die Produktbasis bildet neben Zellulose auch Polyvinylacetat (PVAc), was im Bereich transparenter Graffitienschutz-Produkte gänzlich neu ist.

2.2 Einsatz von *Aravel®*

Aravel® ist dazu geeignet, alle porösen Untergründe vor Graffiti zu schützen. Nicht nur die Sprayfarben vermögen den Schutz nicht zu durchdringen, sondern auch die darin enthaltenen Lösungsmittel werden davon abgehalten, in den Untergrund einzudringen.

Bisher sind keine negativen Auswirkungen von *Aravel®* bekannt. Es kann höchstens zu dick aufgetragen werden und wird dann sichtbar (glänzend, leicht weisslich). In diesem Fall kann es restlos entfernt und neu aufgetragen werden. Am besten wird es in dünnen Schichten aufgesprüht (Airlessgerät o. ä.).

Aravel® haftet auf allen porösen Untergründen, meist auch auf Resten von anderen, vorgängig aufgetragenen Produkten. Dadurch dass *Aravel®* nicht wasserlöslich ist, sondern mit Alkohol gelöst werden muss, ist es in der Bewetterung sehr viel beständiger als andere temporäre Produkte. Der Alkohol stellt weder für den Untergrund noch für die Gewässer eine nennenswerte Belastung dar.

Nach rund sechs bis acht Jahren kann eine Prüfung der Schutzwirkung (Benetzungsprobe) vorgenommen werden. Wenn die Schutzwirkung nicht mehr voll gegeben ist, wird *Aravel®* mit einem Alkoholreiniger vorbehandelt und restlos abgewaschen. Danach werden die zwei oder drei Schichten (je nach Porosität) neu aufgetragen.

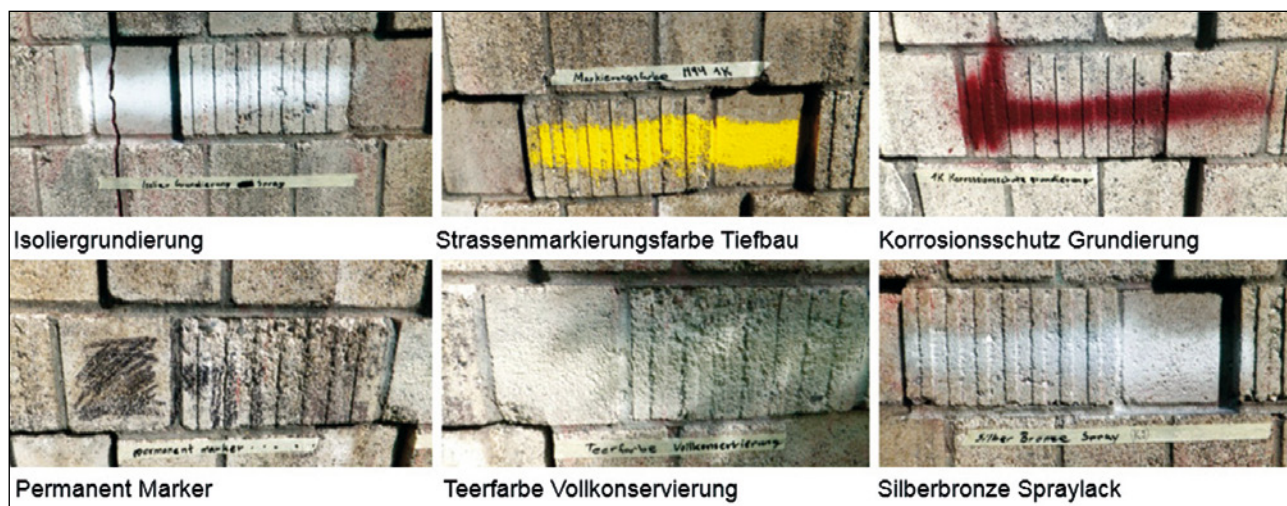


Abb. 3 Testlauf mit verschiedenen Farben auf einer Stützmauer

2.3 Eigenschaften von Aravel®

Aravel® setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

Hauptbestandteile: Cellulose und Polyvinylacetat (PVAc)

Im Weiteren: Mattierungsmittel, Steinöl und Wasser

In Tabelle 2 werden die Produkteigenschaften vorgestellt.

Bei Fragen dazu (Details Bestandteile, Eigenschaften oder Messmethoden etc.) wenden Sie sich bitte an die *Fachstelle Graffiti*.

Tab. 2 Eigenschaften Aravel®

Produkttyp	Eigenschaften Aravel®
Kategorie Schutzprodukt	temporäres, transparentes Opferschichtsystem
Einsatzmöglichkeiten	auf allen Untergründen, die mindestens leicht porös sind: Steine aller Art, Beton, Holz, Backstein, Eternit, Klinker, Ziegel etc.
Entfernung	mit Entferner auf Alkoholbasis und Wasser (biologisch und bauphysikalisch unproblematisch)
Standzeit	6 bis 8 Jahre
Widerstandsfähigkeit gegen Regen und Nässe	unproblematisch da nicht wasserlöslich, im nassen und trockenen Zustand schützend

Bauphysik	Eigenschaften Aravel®
bauphysikalisches Verhalten	einwandfrei, keine Hydrophobierung
Reversibilität	100 % reversibel, keine Rückstände
biologisch abbaubar	unproblematisch (Schutzprodukt und Entferner)
Wasserdurchlässigkeit	uneingeschränkt möglich, zeitlich leicht verzögertes Nachdunkeln/Aufklaren
Verhalten bei Löse- und Verdünnungsmitteln	Löse- und Verdünnungsmittel dringen nicht in Untergrund ein. Sie werden vom Schutz aufgefangen.
Algen-/Pilzbewuchs	kein Nährboden für Bewuchs vorhanden

Verarbeitung	Eigenschaften Aravel®
Applikation	Untergrund anfeuchten, im Sprühverfahren (Airless o. ä.) abwechselnd vertikal/horizontal auftragen; mäßig poröser Untergrund: 2 Schichten, stark poröser Untergrund: 3 Schichten auftragen
Materialverbrauch	0,2 l/m ² bei 2 Schichten
Verarbeitungstemperatur	zwischen 5° und 30 °C Umgebungstemperatur
Wiederbehandelbarkeit	unproblematisch da 100 % reversibel, haftet auch auf vorbehandelten Untergründen
Viskosität	einstellbar, z. B. für wettergeschützte Situationen (Cellulose-Anteil erhöhen)
Haltbarkeit Produkt	nach dem Öffnen max. 12 Monate

Optik	Eigenschaften Aravel®
Transparenz	Ja, bei zu dickem Auftragen wird es weißlich – deshalb fein sprühen und nicht rollen oder pinseln.
Glanzgrad	matt und einstellbar
Farbveränderung	Untergrund wird leicht dunkler.
UV Strahlen	stabil, nicht vergilbend

2.4 Alternative zum transparenten Graffiti-schutz – reversible Farbanstriche

Reversible Farbanstriche sind bauphysikalisch meist unbedenklich. Sie werden auf die Farbe des Untergrundes abgetönt und deckend aufgetragen (Abb. 4, 5). Dies kann auch als präventive Maßnahme direkt auf dem sauberen Untergrund (bereits gestrichen oder auch Naturstein, Beton o.ä.) geschehen. Im Schadensfall wird das Graffiti zusammen mit dem reversiblen Farbanstrich abgewaschen bzw. abgebürstet und der Farbanstrich neu aufgetragen.

Reversible Farbanstriche sind relativ witterungsbeständig (ca. drei Jahre) und beginnen dann auszukreiden. Kalkschlämme oder Kalkkasein können abgebürstet werden. Abwaschbar hingegen sind Anstriche aus wasserquellbarer Zellulose und Polyurethan oder das temporäre Organsilikat.

Die Anwendung von reversiblen Farbanstrichen ist vor allem für verputzte und gestrichene Fassaden gedacht. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob die Anwendung sinnvoll ist – weniger wegen des Schutzanstrichs selbst, sondern wegen dessen Entfernung. Auf weichen Kalkputzen und Kalkfarben beispielsweise macht ein Schutz nur Sinn, wenn bei der Reinigung im Scha-

densfall der Untergrund erhalten werden kann. Sonst kann auch direkt der weiche Putz entfernt (z. B. abgebürstet) und neu aufgetragen werden. Dasselbe gilt auch bei stark strukturierten Putzen (z. B. Kellenwurfputz). Kann wegen der starken Struktur ein Graffiti zusammen mit der Schutzschicht nicht einfacher entfernt werden, macht der Schutz wenig Sinn.

Auf relativ harten Verputzen (Zement/hydraulischer Kalk) und kunststoffvergüteten Farbfassungen hingegen ist ein reversibler Farbanstrich optimal geeignet. Kalkschlämme können auf allen mineralischen Untergründen eingesetzt werden. Je nach Untergrund empfiehlt es sich, die Bindemittelzusammensetzung zu variieren (mit hydraulischem Kalk und/oder Weißzement).

Schlämme sind reversibel und können dem jeweiligen Untergrund bezüglich der Härte individuell angepasst werden. Sie können nach Belieben eingefärbt und nach Bedarf mit Steinmehl ergänzt werden, um eine möglichst optimale Einfügung in den Bestand zu erreichen. Der Unterhalt erfolgt nach Bedarf und lokal anhand von Trockenwerksmischungen, welche am Objekt an Lager sein sollten.

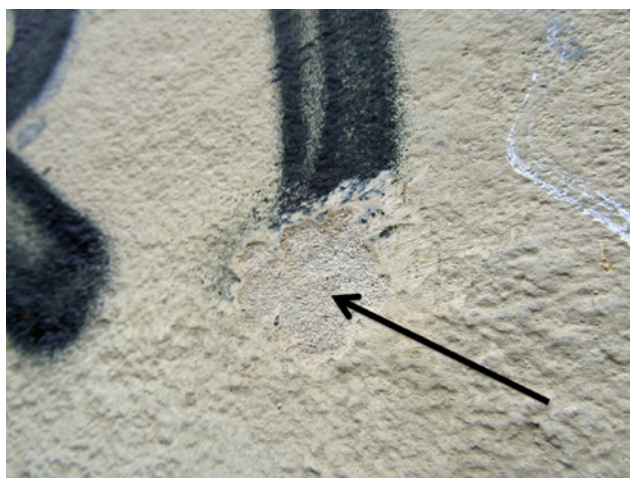


Abb. 4
Kasein-Anstrich auf Sandstein – kann im Schadensfall abgebürstet werden



Abb. 5
Marmor-Gips-Mehl – auch eine reversible Farbe, kann abgebürstet werden

2.5 Übersicht Typen Graffitienschutz

Zur besseren Übersicht erfolgt in Tabelle 3 eine Zusammenstellung aller Typen im Graffitienschutz.

Tab. 3 Übersicht Typen Graffitienschutz – Eigenschaften und Eignung der verschiedenen Graffitienschutz-Systeme

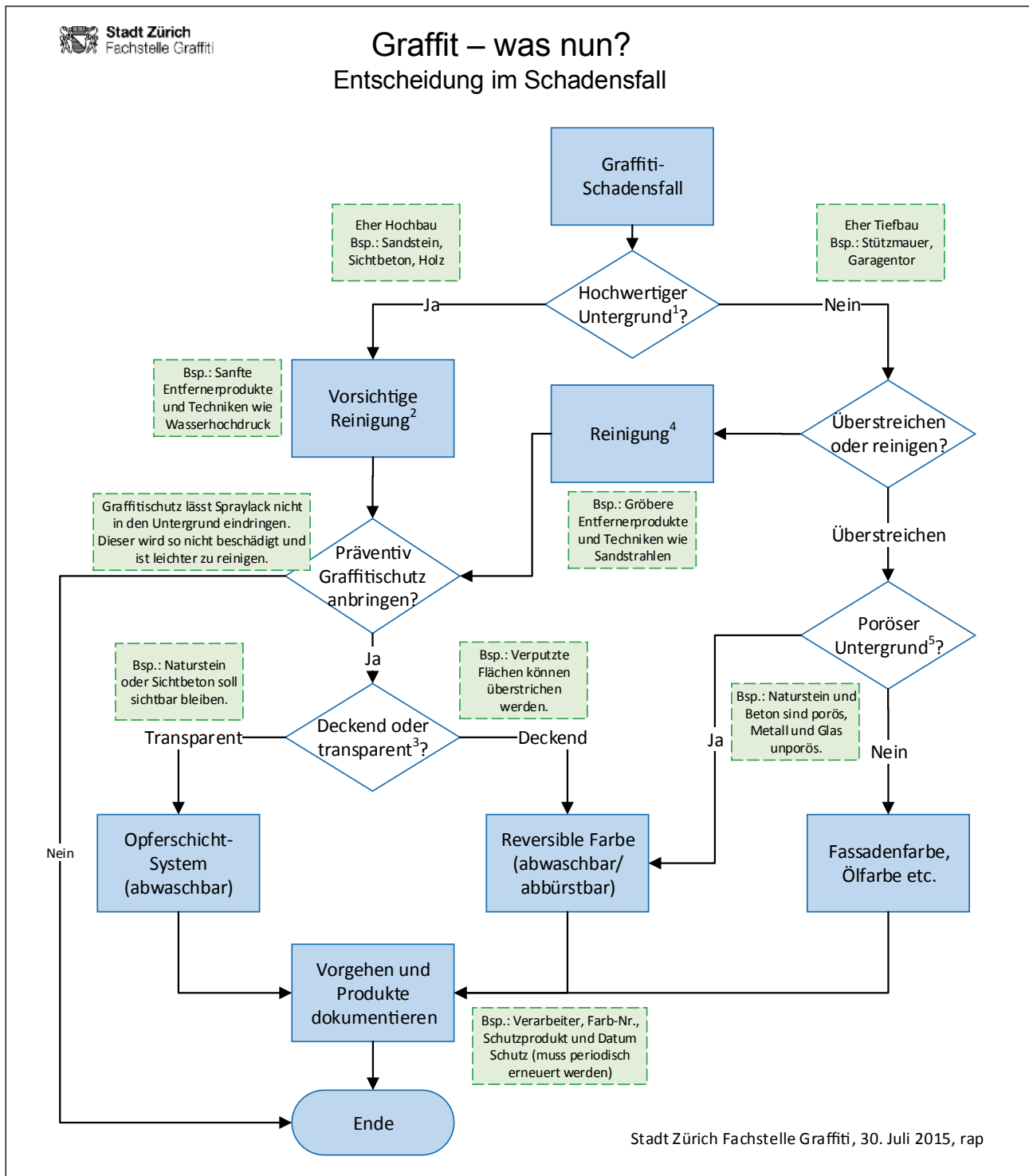
transparenter Graffitienschutz der Untergrund bleibt sichtbar				Eigen- schaften	deckender Graffitienschutz der Untergrund wird deckend gestrichen		
Opferschicht- systeme nicht hydrophobierend*		Opferschicht- systeme hyd- rophobierend*	(semi-)perma- nente Syste- me hydropho- bierend*	Typen	Fassaden- farbe	abbürstbare Farbe	abwasch- bare Farbe
Poly- vinyl- acetat	Poly- saccha- rid	„Wachs- oder Acryl-Disper- sion, Emulsion, Polymere“	2K PU, Silan, Siloxan	Beispiele Produkt- familien	Dispersion	„Kasein, Schlämme, Marmor-Gips- Mehl“	Organo- silikat
Eignung aus bauphysikalischer Sicht							
poröse Un- tergründe <u>mit</u> Anspruch an gute Wasserdampf- diffusion		poröse Unter- gründe <u>ohne</u> Anspruch an gute Wasser- dampfdiffusion	„unporöse Untergründe (Metall, Glas, Keramik etc.)“	geeignet für	„unporöse Untergründe (Metall, Glas, Keramik etc.)“	gestrichene Flächen	
beheizte Hochbauten		Tiefbauten, nicht beheizte Bauten, Spielgeräte		„Beispiele Bauteile“	gestrichene Metallrahmen	beheizte Hochbauten	
gut		problematisch – Hydrophobie- rung irreversibel		Wasser- dampf-Diffs- uion	problema- tisch – Dampf- diffusion verringert	gut	
keine	rein ver- wendet keine**	„auf Wasserbasis oder Löse- mittelfrei (<1 % Lösemittel). halogen- und biozidfrei (Filmkonservierung)“		problemati- sche Inhalts- stoffe	halogen- und biozidfrei (Filmkonser- vierung).	„unproblematisch; ohne Zusätze verwenden“	
100 %		nicht 100 % reversibel	nur schwer reversibel	Reversibilität	bei Fassaden- sanierung	100 %	
Eignung aus Sicht Unterhalt							
6–8 Jahre	wäscht bei Regen aus**	3 Jahre	6 Jahre	Witterungs- beständigkeit	10 Jahre	3 Jahre	3 Jahre
Werden im Schadensfall lokal mit Graffiti abgewaschen und neu aufgetragen.			Überdauert mehrere Reini- gungszyklen. Reinigung im Schadensfall mit Lösungs- mitteln	Anwendung	Überstreichen mit Fassaden- farbe führt zu einem dichten Schichtaufbau	mit Messing- bürste abbürsten – kann durch Bewitterung auskreiden	mit Wasser- hochdruck abwa- schen – kann durch Bewitterung auskreiden

* Eine Hydrophobierung unterbindet mehr oder weniger stark die Wasserdampfdiffusion. Es kann zu Staunässe, Schimmel oder Abplatzungen kommen. Entgegen der Aussagen von Anbietern wirken alle Produkte der hier genannten Produktfamilien leicht hydrophobierend. Nach einigen Zyklen (neu Schützen nach drei Jahren) ist mindestens eine mässig starke hydrophobierende Wirkung vorhanden.

** Da Anbieter ein Produkt nicht verkaufen können, das sich bei Regen direkt auswäscht, mischen sie hydrophobierende Stoffe unter (meist ohne Deklaration), was die guten bauphysikalischen Eigenschaften zu Nichte macht.

2.6 Vorgehen im Schadensfall

Diese vereinfachte Darstellung zeigt den Ablauf im Schadensfall auf. Welche Fragen sind zu stellen und welche Variante ist zu wählen?



3 Schlusswort

Die Stadt Zürich leistet sich eine Fachstelle zum Thema Graffiti, welche unter anderem den Auftrag hat, Wissensaufbau und Informationsvermittlung zu betreiben. Durch die gute stadtinterne Zusammenarbeit mit der Denkmalpflege und der operativen Graffitientfernung wurde das beschriebene Dilemma sehr deutlich. Eine entsprechende Marktanalyse durch das BWS Labor (bauphysikalische Beratung und Konzepte) bestätigte die Befürchtungen um die Unzulänglichkeit des Produktangebots. Das Ergebnis dieser in Auftrag der *Fachstelle Graffiti* durchgeführten Marktanalyse ist in der Broschüre „Graffitischutz auf historischen Bauten“ nachzulesen.

Die *Fachstelle Graffiti* hat deshalb im Jahr 2011 zusammen mit ihren städtischen Partnern die Anforderungen an einen guten Graffitischutz neu definiert. Dazu gehören nebst der Schutzwirkung vor Farben auch unbedenkliche bauphysikalische Eigenschaften sowie ein gutes Verhalten im Unterhalt (Standzeit, Optik, Kosten, Verarbeitungsaufwand).

Da bisher kein Graffitischutz diese Ansprüche erfüllen konnte, ist die Stadt Zürich in die Entwicklung gegangen und setzte dabei bewusst auf unabhängige Partner ohne Vorwissen im Bereich Graffitischutz. Dieser für die öffentliche Hand ungewöhnliche Schritt zeigt den grossen Leidensdruck auf.

Die *Fachstelle Graffiti* hat wie bereits erwähnt den Auftrag zu Wissensaufbau und Informationsvermittlung. Das Zusammenbringen aller Anspruchsgruppen stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Erst eine Empfehlung, die alle Ansprüche berücksichtigt, hilft Bauherren und Eigentümern, das richtige Produkt zu finden. Die dafür nötigen Informationen sollen frei und für jedermann zugänglich sein. Dieses Ziel verfolgt die *Fachstelle Graffiti* mit ihren Kommunikationsmitteln.

Literatur und Quellen

Alle Inhalte im Beitrag sind durch die *Fachstelle Graffiti* selbst oder in ihrem Auftrag erarbeitet worden. Es werden keine Werke von Dritten zitiert. Die Inhalte finden sich in Publikationen der *Fachstelle Graffiti* wieder:

Rast Priska (2008): Graffiti – was nun? Handbuch, Bezugsquelle: graffiti@zuerich.ch

Rast Priska und Nydegger Bernhard, BWS Labor AG (2012): Graffitischutz auf historischen Bauten. Broschüre, Bezugsquelle: Download von Homepage


Homepage *Fachstelle Graffiti*

www.stadt-zuerich.ch/graffiti

Das Grabmal von Adolf Guyer-Zeller in Bauma, Zürich

Schadensbild und Schadensentwicklung der Marmoroberflächen

von Michael Hauser



Der vorliegende Beitrag liefert einen Einblick in den aktuellen Zustand des Grabmales von Adolf Guyer-Zeller in Bauma. Dabei wurden die verschiedenen Phänomene der Marmoroberfläche analysiert und weitestgehend auf ihre Kausalität untersucht. Die relativ schnelle Verschmutzung bzw. Wiederbesiedelung von organischem Material nach der letzten Restaurierung (1998) sollte verstanden werden. Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen geben Ansatzpunkte bzw. Grundlagen für weitere Konzepte für spätere Restaurierungen und den zukünftigen Umgang, um eine langfristige Erhaltung gewährleisten zu können. Dieser Beitrag basiert auf der Masterthesis des Autors an der Hochschule der Künste Bern aus dem Jahr 2014.

1 Abriss zum Werdegang Adolf Guyer-Zellers

Adolf Guyer wurde am 1. Mai 1839 in Neuthal bei Bauma, Zürich geboren (Abb. 1). Sein Vater war der Spinnereibesitzer Johann Rudolf Guyer, in dessen Spinnerei (gegr. 1826) er nach einem Geologiestudium und diversen Reisen, u. a. besuchte er den Bau des Suezkanales, im Jahre 1863 eintrat. 1866 wurde er Teilinhaber und 1874 Alleininhaber des Betriebes. Erkenntnisse aus der Zeit seiner Auslandsaufenthalte führten bezüglich Ausbau und Modernisierung der eigenen Industrieanlagen bisweilen zu Meinungsverschiedenheiten mit seinem Vater [1].

Im Jahre 1868 heiratete er die Tochter einer angesehenen Zürcher Industriellenfamilie, Anna Wilhelmmina Zeller, und nannte sich von nun an Guyer-Zeller. Nach dem Umzug nach Zürich gründete er im Jahre 1869 eine Import- Export Firma mit Namen J.R. Guyer und handelte mit Textilien. Für eine Expansion mit weltweiten Beziehungen war Zürich aufgrund des aufstrebenden Handelsplatzes von Vorteil. An der Ecke Bahnhofstraße/Börsenstraße ließ Guyer-Zeller 1885 das, damals als eines der schönsten Häuser Zürichs bezeichnete, Haus Gryffenberg bauen. Er blieb jedoch seiner Heimat stets treu und wurde im Wahlkreis Bärenswil von 1869 bis 1889 als Vertreter der liberalen Partei Kantonsrat. Zudem ließ er zur Erholung der Fabrikarbeiter in der Spinnerei die nach ihm benannten Guyer-Zeller-Wanderwege

im Zürcher Oberland errichten. Guyer-Zeller war Förderer der aufkommenden Eisenbahn und setzte sich als Kantonsrat für die Subvention der Gotthardbahn ein, obwohl 1876 eine Eisenbahnkrise aufgrund der massiven Kostenüberschreitung beim Bau derjenigen eintrat. Die Krise, wie auch die hohen Bauausgaben der Nordostbahn (NOB), führten zu fallenden Dividenden der NOB-Aktien, worauf Massenverkäufe dieser NOB- und Gotthardbahn-Aktien stattfanden. Guyer-Zeller konnte diese zu Spottpreisen kaufen und legte damit den Grundstein seiner späteren Machtposition bei der NOB [1].

Sein größtes Projekt war die Jungfraubahn. 1893 reichte Guyer-Zeller ein Konzessionsgesuch für den Bau der Bahn auf das Jungfraujoch ein. Dies wurde zunächst als Aprilscherz betrachtet, obwohl es nicht das erste Mal war dass ein derartiges Projekt eingereicht wurde. Die Konzession wurde Guyer-Zeller am 21. Dezember 1894 erteilt, worauf er die Guyer-Zeller-Bank gründete um die Kosten der ersten Bauetappen decken zu können. Die erste Etappe konnte am 19. September 1898 feierlich eingeweiht werden. Guyer-Zeller erlebte die Fertigstellung der Jungfraubahn im Jahre 1912 jedoch nicht. Er starb im Alter von 60 Jahren am 3. April 1899 in Folge einer Lungenentzündung [2]. Adolf Guyer-Zeller zählt zusammen mit Alfred Escher (1819–1882, Erbauer der Gotthardbahn) zu den großen Förderern des Eisenbahnbaus in der Schweiz.

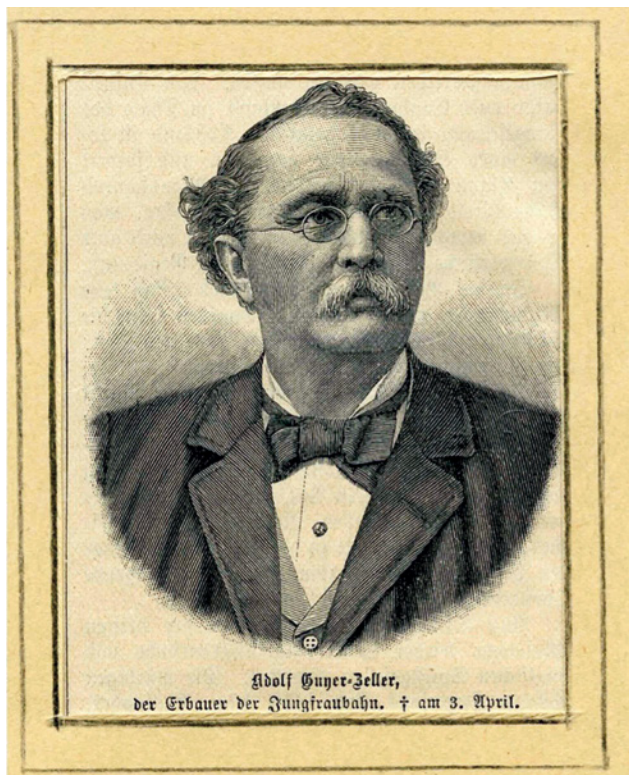


Abb. 1 Konterfei von Adolf Guyer-Zeller. Womöglich das Vorbild für das Relief vom Grabmal

2 Beschreibung des Grabmales

Es handelt sich um eine Familiengrabanlage aus weißem, griechischem Marmor (Penteli) mit schwarzen Inschriftenplatten aus Syenit bei einer Grundfläche von 10×6 Meter (Abb. 2). Diese monumentale Anlage ist mit Stilelementen und Materialien der Griechischen Antike im Jahre 1900 entstanden. Die eigentliche Grablegungsfläche ist als Vorraum zu dem zentral gelegenen griechischen Tempel in neoklassizistischem Stil gestaltet. Sie weist auf jeder Seite der alles überragenden Aedikula, gerundete Flügelwände (Exedren) auf, die von mit Akroterien bekrönten Pilastern gegliedert und einem Pfeiler (Obeliskstumpf der ebenfalls mit Akroterien bekrönt ist) abgeschlossen werden. Die ganze Anlage ist gegen Vorne durch eine rechteckige Brüstung aus Marmor abgeschlossen.

Der Mittelrisalit (Aedikula) hat dabei die Gestalt eines griechischen Tempelchens in dorischer Ordnung. Die Aufteilung mit den zwei Säulen, dem Architraven, Methopen und Tryglyphen, sowie dem Tympanon folgen dieser antiken Tradition. In der zentralen

Schriftenplatte ist die marmorne Portraitbüste von Adolf Guyer-Zeller eingebracht.

Bauwerke wie der Parthenon auf der Akropolis inspirierten Architekten und Bauherren der verschiedenen Epochen und so auch die Grabanlage in Bauma, wobei gar eine direkte Verbindung mit dem Parthenon gemacht werden kann. Die Säulen sind mit ihren schmucklosen Kapitellen sowie der fehlenden Basen im griechisch-dorischen Stil gehalten, was einen gewollten Bezug zu demjenigen darstellen könnte (Auch mit dem Hintergrund, dass Guyer-Zeller griechischer Generalkonsul war). Das Grabmal ist voll von mythologischen Bedeutungen der Totenkulte, welche sich als Fackelaufsätze oder den Palmettenreliefs manifestieren.

1998 wurde das Grabmal in das überkommunale Inventar als Schutzobjekt von kantonaler Bedeutung aufgenommen [3]. Aufgrund der Einzigartigkeit in unseren Gefilden ist deshalb die Grabanlage von Adolf Guyer-Zeller fast einmalig und unbedingt schützenswert.

2.1 Die Erbauer des Grabmales

Die Grabanlage wurde von der Zürcher Firma „Schmidt & Schmidweber, Marmor-Granit- & Syenit-Industrie“ hergestellt (die Signatur ist eingemeißelt). Die Firma existierte von 1895 bis 1962 und beschäftigte um die Jahrhundertwende ca. 100 Arbeiter [4]. Die geschaffenen Marmorobjekte fertigte die Firma nach Entwürfen von Architekten oder Bildhauern aus Zürich an [5]. Unklar bleibt aber der Urheber des Entwurfes des Grabmales. Einige Quellen erwähnen den Zürcher Architekten Albert Müller (1846–1912, ehemaliger Schüler von Gottfried Semper), was aber nicht weiter belegt werden konnte.

Der Erschaffer der Portraitbüste von Adolf Guyer-Zeller war Baptist Hoerbst (die Büste ist signiert). Er war ein Zürcher Bildhauer und wurde am 1. Dezember 1850 in Riedbach (ZH) geboren († 1927 in Affoltern am Albis). Sein Werdegang führte ihn 1866 nach Frankfurt am Main zur Bildhauerwerkstatt von Johann Dielmann, dem Erschaffer des dortigen Schillerdenkmales, zur königlichen Akademie der bildenden Künste in München und in das Atelier von Ferdinand Schlöth. Ab 1880 fertigte er zahlreiche private und öffentliche Portraitbüsten an. Darunter finden sich Bildnisse von Dr. Oswald Heer, Paläontologe und Botaniker (Botanischer Garten Zürich), Dr. Arnold Bürkli, Quai-Ingenieur (Alpenquai in Zürich) oder Dr. Ferdinand Keller, Altertumsforscher (schweizerisches Landesmuseum).

Die Gartenarbeiten zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Grabanlage wurden vom damals führenden Unternehmer dieses Fachs, Otto Fröbel (1844–1906), geplant und durchgeführt. Otto Fröbel und sein Vater Theodor Fröbel (1810–1893) gehörten zu den wichtigsten Schweizer Gartengestaltern des 19. Jahrhunderts. Ihre Arbeit prägt bis heute das Stadtbild von Zürich mit seinen Parks und Quaianlagen [6]. Dabei ist von der Grabanlage als einziges zeitgemäßes Dokument ein Aufrissplan erhalten, auf welchem die Gartengestaltung verzeichnet ist (Abb. 3).

Viele Angaben von Material und Personen zum Grabmal decken sich mit dem Bau des Guyer-Zeller Sitzes in Zürich, dem Haus Gryffenberg von 1885. Auch da war Baptist Hoerbst mit den Portraitbüsten der Arkaden-Schlusssteine beschäftigt, wie auch die Verwendung desselben Marmors (Penteli) kam in dem Haus zum Einsatz. Bei dem Bau gilt Albert Müller als dessen Architekt.



Abb. 2
Das Grabmal von Adolf Guyer-Zeller in Bauma. Hauptansicht im Zustand 2014

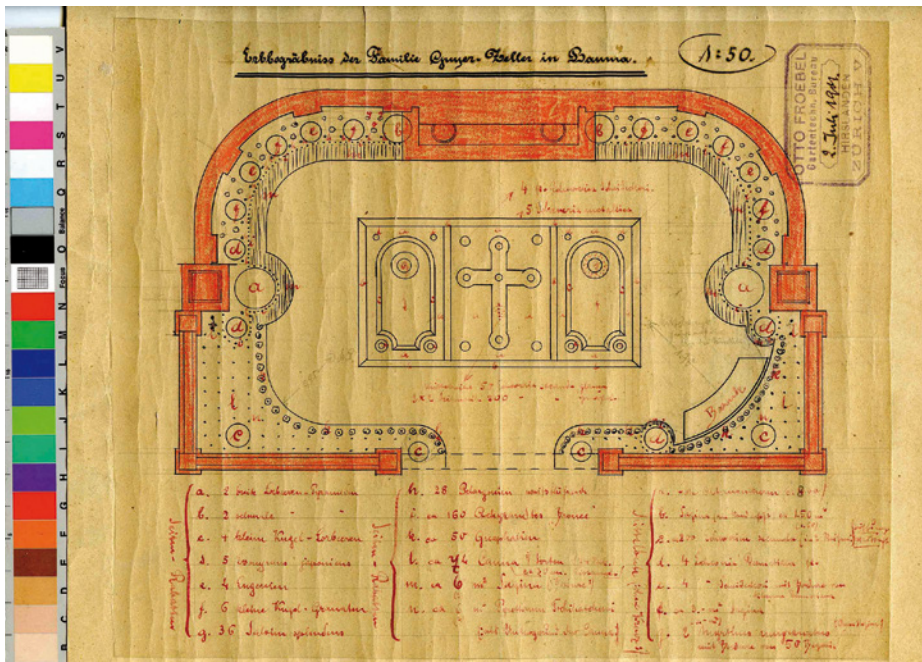


Abb. 3

Planaufsicht des Grabmales von Adolf Guyer-Zeller. Auf dem Plan sind Bezeichnungen und die Standorte der Bepflanzung vermerkt. Es ist das einzige noch erhaltene Dokument das direkt mit dem Bau des Grabmales zu tun hat.

2.2 Die verwendeten Gesteine am Grabmal und die Konstruktion

Pentelischer Marmor (griechisch: Pentelikē marmaros Πεντελική μάρμαρος) wird auf dem 1106m hohen Berg Penteli nahe Athen abgebaut und ist Teil eines 20km langen, metamorphen, nord-ost laufenden Felsformation. Diese Region gehört zum attisch-kykladisch-metamorphen Gürtel. Er ist der klassische griechische Marmor und ist in seinem Erscheinen eine weiße, feine bis mittelfeine Varietät mit einer maximalen Korngröße von 1mm (mit \varnothing 300 μ m) [7, 9]. Er weist ein equigranular-homoblastisches Gefüge auf (Abb. 4). Publierte petrographische Analysen geben eine Mineralzusammensetzung aus weißem Glimmer (Muskovit), Chlorit, Pyrit, Eisenoxid, Dolomit und sehr geringen Anteilen an Quarz (ca. 0,2%) an, was gesamthaft bis zu 10% Akzessorien bedeuten

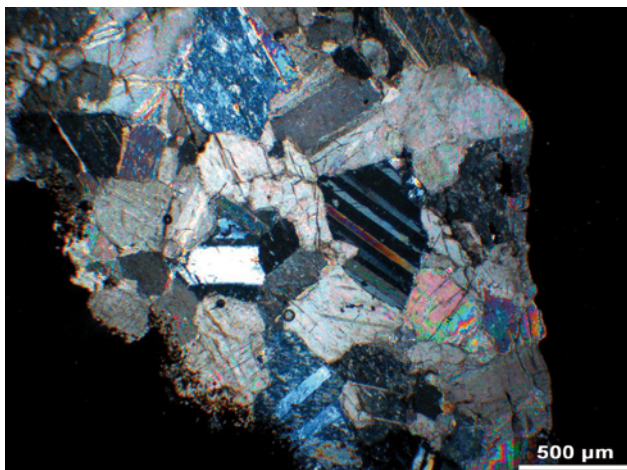


Abb. 4 Dünnschliff-Mikroskopie, Polarisationsoptik, X-PL, 5x, Probe 15 mit schön ausgebildeten Kalzitkristallen

kann. Der Hauptbestandteil ist jedoch Kalziumkarbonat (CaCO_3).

Die Oberfläche des Marmoraufbaus war mit hoher Wahrscheinlichkeit poliert. Dies war eine gängige Maßnahme dem Stein seine Rauigkeit zu nehmen und ihn so resistenter gegen eine Anhaftung von Staubpartikel oder biokorrosiven Organismen zu machen.

Auf den ersten Blick fällt das völlige Fehlen von Mörtelmaterial in den Fugen auf. Bei der Sockelpartie (gebänderter Marmor) ist der Mörtel noch völlig vorhanden. Jedoch können noch vereinzelt Mörtelreste in den Fugen wie auch abgebrochene Mörtelstücke auf dem Fugengrund gefunden werden. Dies lässt auf eine ursprünglich Verfugte Grabanlage schließen.

Der Sockel wird fälschlicherweise in diversen Dokumenten als Verzasca Gneis bezeichnet. Die gesamte Sockelzone besteht jedoch ebenfalls aus Marmor, wenn auch nicht in der gleichen Varietät wie der obere Aufbau, wobei dies mit Dünnschliff-Mikroskopie und Salzsäure-Tests (HCl) bewiesen werden konnte. Das Gestein des Sockels besteht aus einem gebänderten Marmor mit einer Kornstruktur von 1–2mm. Zusätzliche morphologische Besonderheiten anhand Fotos des gereinigten Sockels und eine Strukturanalyse haben gezeigt, dass es sich um einen quarzhaltigen Marmor handelt, wobei die Provenienz unklar bleibt und hierbei nicht näher darauf eingegangen wurde.

Die Grabplatten auf denen die Lettern der Inschrift (Bronze) befestigt sind, bestehen aus Odenwälder Syenit (Südwest Deutschland). Seine Zusammensetzung beinhaltet Feldspat, wenig Quarz und we-

nig Glimmer. Bei den Feldspäten überwiegt der Anteil der Kalifeldspäte (Ortoklas) im Gegensatz zum Plagioklas. Kalifeldspäte nehmen einen Anteil von bis zu 90 % der Zusammensetzung des Syenits ein. Untergeordnet treten im Syenit auch sog. mafische Minerale (Ma = Magnesium/f = Ferrum), also magnesium- und eisenhaltige, dunkle Mineralien auf. Die Syenitplatten weisen eine intakte Politur und keine Schäden auf.

3 Restaurierungsgeschichte

Restauratorische Maßnahmen sind erst ab 1998 aufgrund des 100. Todestag Guyer-Zellers dokumentiert. Reinigungen oder Behandlungen vor der großen Instandsetzung von 1998 können aber nicht ausgeschlossen werden. Laut dem Ortschronisten von Bauma, Walter Sprenger, war der Marmor vor 30 Jahren (um 1965) noch mehrheitlich weiß, nun (1995) in schlechtem Zustand mit schwarzen Bereichen und einer porösen Oberfläche. Darauf fand 1995 ein erster Augenschein im Hinblick auf die Sanierung statt (mit Dr. Paul Raschel (EMPA St. Gallen) und Dr. Andreas Arnold (ETH Zürich), wobei eine Expertise zu biokorrosiven Vorgängen angefertigt sowie Vorschläge für weiteres Vorgehensweisen gegeben wurden.

Invasive Arbeiten wurden vom Frühjahr bis Ende August 1998 vorgenommen, wobei beim Marmor wie folgt vorgegangen wurde: Reinigung mit Hochdruck, Wasserstoffperoxid Behandlung mit Bürsten, Desinfektion mittels Perflutex Albaex STH 79 (ein Natriumhypochlorit (Aktivchlor)), Fixieren der losen Teile mit Fugenmörtel-Favodur 124 und 126 (Zement-Epoxidbasis), Schließen von Rissen-PCI Fugenweiß (Zementbasis), Hydrophobieren-Aqua Protector, Firma BL System (flüssiges Kieselsäure Präparat).

Bald darauf, im Jahre 2011, wurde aufgrund der erneuten Verschwärzungen eine neue Expertise eingeholt. Dabei kam es insgesamt zu gleichen Ergebnissen wie jene von 1995 (Auftreten von Grünalgen, Dematiaceen-Pilzen, Flechten (*Lecanora campestris*) und Moose), jedoch mit einem zusätzlichen Vorkommen von roten Belägen und dunklen, kreisrunden Verfärbungen.

Die Marmorblöcke weisen erneut Verrückungen auf, wobei auch gekittete Stellen (von 1998) Risse aufweisen und in den damals erneuerten Fugen zwischen Marmor und Syenitblöcken teilweise größere Risse im Mörtel entstanden sind. Zusätzlich sind erste Materialverluste in Form von Abbrüchen und auch baldigen Verluste zu beklagen. Das Grabmal ist demnach seit spätestens 2011 in gefährdetem Zustand.

4 Technologische Untersuchungen des Grabmales

Der sehr rasche Befall und die Veränderungen der Farbe des Biofilms (neue Spezies) deuten auf ein besseres Nahrungsmittelangebot hin. Ob dieses aus den eingesetzten Stoffen bestand oder durch feuchtere Oberfläche aufgrund der Hydrophobierung 1998 verursacht wurde sollte geklärt werden.

Dazu wurden verschiedenste Untersuchungen vor Ort, wie auch durch Probenahme vorgenommen.

Aufgrund der 100-jährigen Exposition und den damit verbundenen zahlreiche Frost-Tau-Wechseln sowie diesem starken biogenen Befall muss von einer oberflächlichen Auflösung, (bzw. sog. Verzuckerung des Gefüges) des Marmors ausgegangen werden. Auch zeigen sich starke Rissbildungen der Oberfläche. Solche Bereiche mit höherer Degradation konnten mittels der Erfassung der Insolation (Sonnenbestrahlung) zeitgleich mit Infrarotaufnahmen (Grad der Oberflächentemperatur in Falschfarben) abgeglichen werden.

Zur Bestimmung der Insolation und dem damit verbundenen Aufheizungsgradient wurde das Grabmal während eines Tages stündlich fotografiert und die Oberflächentemperatur gemessen. Dies sollte Aufschluss über Tendenzen der Verschmutzungen sowie das Schadenspotential erbringen. Zusätzlich wurde zusammen mit Jens Heinrichs vom KIT (Karlsruher Institut für Technologie) organographische Analysen mittels PAM-Fluorometrie (Puls-Amplituden-Modulierte Fluorometrie) in situ angestellt, wobei der Effekt der Chlorophyll Fluoreszenz durch Bestrahlung (660nm) genutzt wird. Damit konnte die Aktivität der Biofilme genau erfasst werden. Die Auflockerung des Gefüges wurde mittels Ultraschall Messungen untersucht.

Auch wurden die Beregnung und der einhergehende Wasserverlauf am Grabmal sowie die Feuchteverteilung im Gestein mittels Kapazitäts-Leitfähigkeitsmessungen genau untersucht und die physikalischen Schäden wie auch Verfärbungen (Biofilm) kartiert.

Für die analytischen Methoden wurden von biogen kontaminierten Bereichen der Oberfläche sowie von intakten, weißen Oberflächen einzelne Proben bzw. Bohrkerne entnommen, um diese analytisch zu untersuchen und auch den Biofilm näher bestimmen zu können.

Dank dem Team um Prof. Dr. Andreas Gerdes vom KIT war es möglich diese Bohrkerne vom Grabmal mit diversen analytischen Methoden zu untersuchen. Bei den dabei angewendeten Methoden wurden so-

weit als möglich immer Oberflächen zwischen biogen kontaminierten (verfärbten) und weißen, biogen unbewachsenen Bereichen beprobt und verglichen. Dabei kamen die Analysemethoden, u. a. der Quecksilberporosimetrie (HgD) für Porositätsanteil in %, Environmental Scanning Electron Microscop (ESEM) zur Abbildung der Oberfläche mit integrierter Elementenanalyse (EDX (Röntgenfluoreszenzanalyse), Röntgendiffraktion (XRD) zur Feststellung der Kristallstruktur (Kristallographie), Termogravimetrie (TG) (Masseänderung einer erhitzten Probe in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit) und nicht zuletzt mikroskopische Analysen von Mikroskopie-Dünnschliffen zum Einsatz. Um unbekannte Behandlungen der Oberfläche nachweisen zu können wurden kleinstproben für eine FTIR Analyse (Infrarot Interferometrie) entnommen, dies auch um oberflächliche Unterschiede unter der UV Beleuchtung (Ultraviolettlicht um 370 nm) erklären zu können.

4.1 Zustand des Marmorgefüges

Das Phänomen der starken Auflockerung des Marmorgefüges, v. a. nördlich der Alpen, wurde vielfach beschrieben und kann auch anhand der Oberfläche des Grabmales gut beobachtet werden. Die Oberfläche fühlt sich meist rau an, wobei einige gut witterungsgeschützte Stellen noch eine relativ glatte Oberfläche aufweisen. Auch hier muss jedoch zusätzlich von einer aufgelockerten Matrix bis in den Kern ausgegangen werden (Abb. 5).

Bereiche mit intaktem Gefüge und Bereiche mit bereits geschädigtem Gefüge liegen nah beieinander, wie dies die Ultraschallmessung zeigt (Ultraschallmessung im Minimum bzw. Maximum: $V_{pmin.} = 2,35 \text{ km/s}$, $V_{pmax.} = 5,85 \text{ km/s}$). Besonders auch

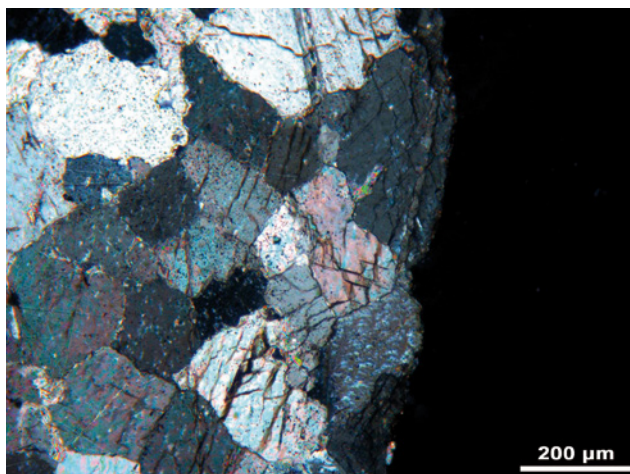


Abb. 5 Dünnschliff-Mikroskopie, Polarisationsoptik, X-PL, 10x, Probe 16 mit voranschreitender Verzuckerung, bzw. Gefügauflockerung. Dies ist als kleine Risse zu erkennen.

dünnere Bereiche, wie die der Brüstung, haben einen tiefen Durchschnitt bei der Laufzeit der Logitudinalwellen und entfernen sich zunehmend von einem intakten Gefüge. Messungen an Bereichen mit höherem Abstand zur Außenfläche bewegen sich im Bereich akzeptablerer Ultraschall-Laufzeiten. Wenn die Grenze von passablen US-Laufzeiten zwischen 3–4 km/s liegen [10], dann liegt min. 50,04 % des Gesteines im mittelmäßig verwitterten Bereich.

Bei Betrachtung der vergleichenden Quecksilberdruckporositätsmessung (HgD) von 0,34 % bis 2,13 % und einer dadurch verursachten möglichen exponentiellen Schädigung des Materials sollte der Zustand des Grabmales anhand dieser Daten als kritisch betrachtet werden. Bei der HgD-Analyse erhält bruchfrischer Marmor einen Wert von 0,4 %, verwitterter einen Wert von 2 % und bei starker Entfestigung bis zu 12 % [14]. Mit bereits gelockertem Gefüge, wie in diesem Fall, haben die Temperaturwechsel, welche ursprünglich den Schaden herbeiführten, auf das Voranschreiten des Zerfalls nur noch einen kleinen Einfluss. Ergo werden anisotropische Effekte mit Ausdehnung der einzelnen Kalzitkristalle (Parallel zur c-Achse dehnt sich ein Kristall um $25,6 \mu\text{m/m}$ pro °C Temperaturerhöhung, senkrecht zur c-Achse jedoch schrumpft der Kristall um $5,7 \mu\text{m/m}$ pro °C [16]) und die damit einhergehende Hysterese (nicht wieder vollständige Rückführung in den ursprünglichen Zustand) als gesteinschädigende Einflüsse von der zunehmenden Gesteinsfeuchte aufgrund des begünstigten Penetrationsvermögens erheblich erhöht [10, 11]. Dünnschliffe der Gesteinsoberfläche bestätigen die Ergebnisse von Ultraschall und Porositätsmessungen.

Bereiche des kalzitisch reineren Gesteines zeigen sich beständiger, hingegen in der Bänderung eingelagerte Akzessorien meist mit schnellerer Degradation des Gefüges (Auswaschungseffekte). Nach Termogravimetrischen, Röntgendiffraktometrischen und ESEM-EDX Analysen konnte nur reiner Kalzit (CaCO_3) in den Bohrkernen nachgewiesen werden. Nebengemengteile (Akzessorien) sind lediglich als Porphyroblasten als Bänderung eingelagert und kaum homogen im Gefüge. Auf der Oberfläche konnte mittels EDX der silikatische Anteil der Behandlung von 1998 nachgewiesen werden.

Die zuvor untersuchte Gesteinsoberfläche mit UV-Licht wies Unterschiede in der Reflektion (Violett und weiß) auf (Abb. 6, 7). Die Oberflächenanalyse mittels FTIR (Abb. 8, 9) zeigte leichte Spuren von Paraffinwachs, wobei behandelte Bereiche die Marmoroberfläche weiß reflektierten, unbehandelte Bereiche violett.

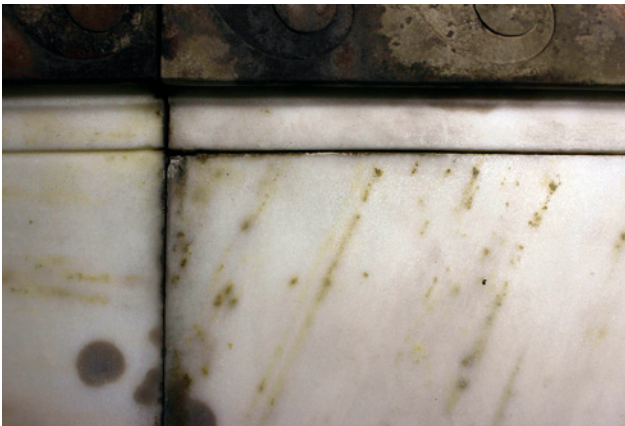


Abb. 6 VIS-Aufnahme. Die Marmorfläche erscheint homogen weiß (abgesehen von Wellenormament). Lokalisierung: unter der ersten Syenitplatte bzw. Wellenormament neben dem Mittelteil, Vorderseite, rechter Flügel (Bildhöhe ca. 30 cm)

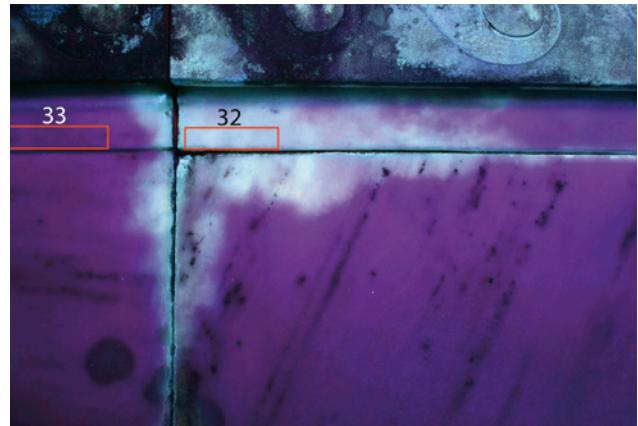


Abb. 7 UV Aufnahme. Mit Pos.32-33 als Schabproben für FTIR. Kreisrunde Wolkungen zeigen keinen Unterschied unter UV-Beleuchtung (linke, untere Bildecke) (Bildhöhe ca. 30 cm). Gerät: UVA 250 BL Handstrahler

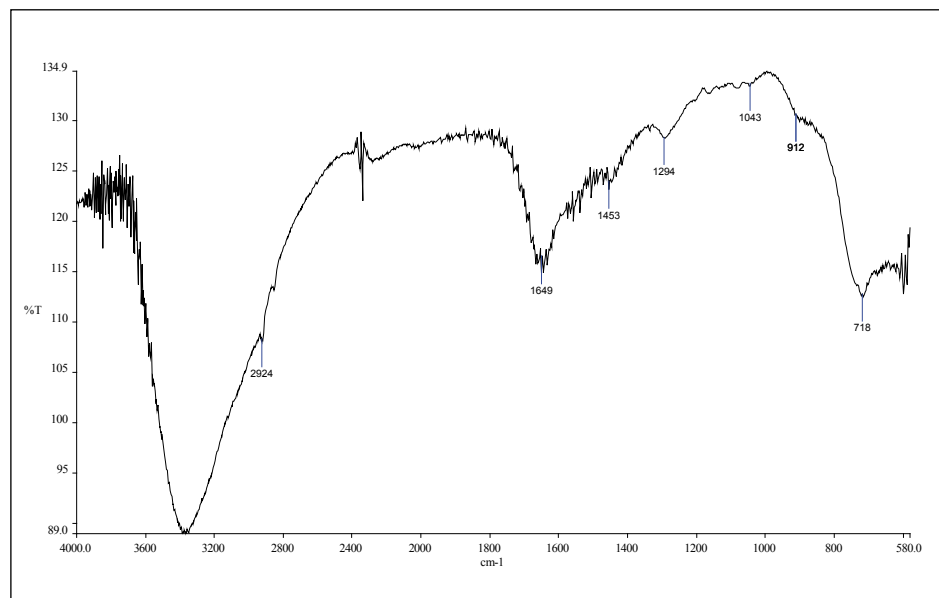


Abb. 8

Diese Probe wurde aus dem Probefeld 33 (siehe Abb. 7) entnommen. Es handelt sich dabei um violett erscheinende Bereiche bei UV-Beleuchtung. Das Spektrum zeigt die Probe nach SF₄ Derivatisierung (Schwefeltetrafluorid-Begasung) um das Carbonat auszulösen.

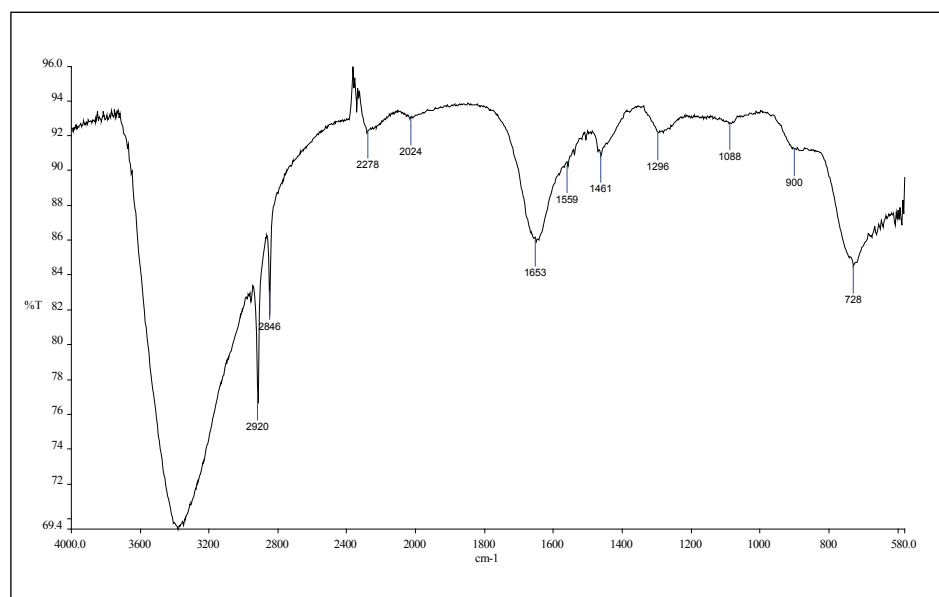


Abb. 9

Diese Probe wurde aus dem Probefeld 32 (siehe Abb. 7) entnommen. Es handelt sich dabei um weiß erscheinende Bereiche bei UV-Beleuchtung. Das Spektrum zeigt die Probe nach SF₄ Derivatisierung (Schwefeltetrafluorid-Begasung) um das Carbonat auszulösen.

4.2 Biogene Ablagerungen und deren Schäden

Biogener Befall muss nicht unbedingt Schäden hervorrufen. In jüngster Zeit wurden viele Beispiele publiziert, welche sich mit der Oxalatbildung (CaC_2O_4) und der damit einhergehenden höheren Resistenz des Gesteins gegen Wasserauflösung auseinandersetzen. Anhand von ESEM und weiteren Untersuchungen wurden hier jedoch erstaunlicherweise überhaupt keine Oxalate gefunden. Eine positive Beeinflussung des Gesteins durch den biologischen Befall kann demnach ausgeschlossen werden. Somit wird im Folgenden das Augenmerk lediglich auf die schädigende Wirkung des Bewuchses gerichtet. Dazu schreibt Krumbein [12] von einer um 20 % erhöhten Temperatur bei Sonneneinstrahlung von *Dematiaceae*-Pilz befallenen Marmor-Probekörper im Gegensatz zu unbefallenen. Ist ein Objekt von biogenem Bewuchs betroffen, müssen für deren Wachstum drei grundlegende Einflüsse gewährleistet sein. Das Vorhandensein von Nahrung, das Vorhandensein von Feuchtigkeit und das Vorhandensein des Organismus [13]. Verschmutzungs- bzw. Besiedelungshorizonte sind daher durch Beregnung oder Abtropfung der Dachpartie entstanden.

Im Allgemeinen sind die meisten calcitischen Gesteinsoberflächen, vor allem solche die der Witterung ausgesetzt sind, endolithisch (dabei häufig euendolithisch) besiedelt. Dazu zählen vor allem die Cyanobakterien, Grünalgen, Pilze und Flechten [15], welche anfangs dabei mit den durch metabolische Prozesse erzeugten organischen und anorganischen Säuren problematisch auf Carbonatgestein wirken. Die am Grabmal stark auftretenden Oberflächenverfärbungen haben demnach hauptsächlich ihren Ursprung in mikrobiologischen Vorgängen und Befällen. Dabei können kreisrunde, flächig werdende dunkle bis schwarze Bewachsungen auftreten. Sie bilden eine dünne Schicht auf der Marmoroberfläche. Die schädigende Wirkung des biogenen Befalls kann anhand von Dünnschliffen gut beobachtet werden. Dabei scheinen die Organismen das Gefüge des Marmors, genauer des Calcites, aufzulösen und tragen so zum Abbau bei. Das Gestein wird in Form kleiner Löcher (Mikropitts) von außen langsam abgebaut (Abb. 10).

Besonders beunruhigend ist, dass das organische Material in das Steingefüge eingedrungen ist und damit nicht mehr einfach entfernt werden kann. Zur Bestimmung der Aktivität wurden mittels PAM-Fluorometrie Untersuchungen der Biofilme gemessen. Dabei konnte eine passive aufliegende Bioschicht mit einer aktiven, darunterliegenden Bioschicht festgestellt werden (Abb. 11, 12). Versuche mit Wasserstoff-

peroxyd zeigen nach 30 min Einwirkzeit noch immer eine aktive Fluoreszenz der Algen.

Durch die mikroskopische Analyse und Bestimmung der Gattungen mit Hilfe von Dr. Paul Raschle konnten die schwarzen Bereiche als *Dematiaceae* (Schwärzepilze), die roten Bereiche als *Trentepholia* (rote Grünalge) und die Flechten als *Verrucaria* festgelegt werden.

Dematiaceae Pilze gelten als Materialzerstörer aufgrund der Ausscheidung organischer Säuren (Oxalsäure). Bei *Trentepholia* handelt es sich um eine kurzfädige Form der Grünalgen mit Bildung von orangegelben bis leuchtend roten Überzügen (hoher β -Carotin Gehalt) auf Gebäudeoberflächen, Pflanzen oder Steinen. Die Flechte *Verrucaria* tritt gern auf karbonatischem Gestein auf (Kalkflechten), wobei ihre Fruchtkörper (<0,6 mm breite Perithezien) kleine Grübchen in das Gestein einsäuern, worauf die Flechte im Alter abfällt und kleine Löchlein hinterlässt.

5 Zusammenfassende Analyse

Die teilweise bedrohlich weit geöffneten Fugen lassen bei einer oberflächlichen Betrachtung den Schluss zu, dass das Grabmal schlecht fundiert ist oder aufgrund der Hanglage in Bewegung geraten ist. Der sehr intakte Sockel widerspricht aber klar solchen Annahmen. Es handelt sich dabei nur um den Marmoraufbau auf dem Sockel. Die unterschiedlichen Fugenöffnungen und auch Rissöffnungen können gut mit Bereichen erhöhter Insolation in Verbindung gebracht werden (Abb. 13, 14). Somit spielen Warm-Kalt-Zyklen eine erhebliche Rolle, wobei verschwärzte Bereiche

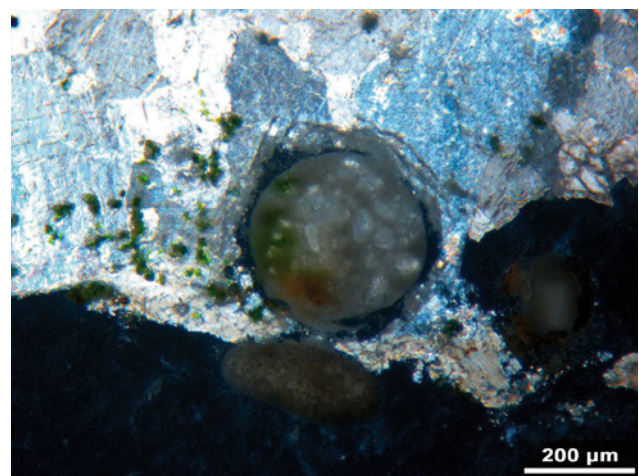


Abb. 10 Dünnschliff-Mikroskopie, Polarisationsoptik, X-PL, 10x, Probe 9 der Marmoroberfläche. Endolithischer Mikroorganismus in Marmormatrix vom Grabmal. Bläulich ist die Gesteinsmatrix (Kalzitkristalle), grüne Punkte links sind Algenzellen.

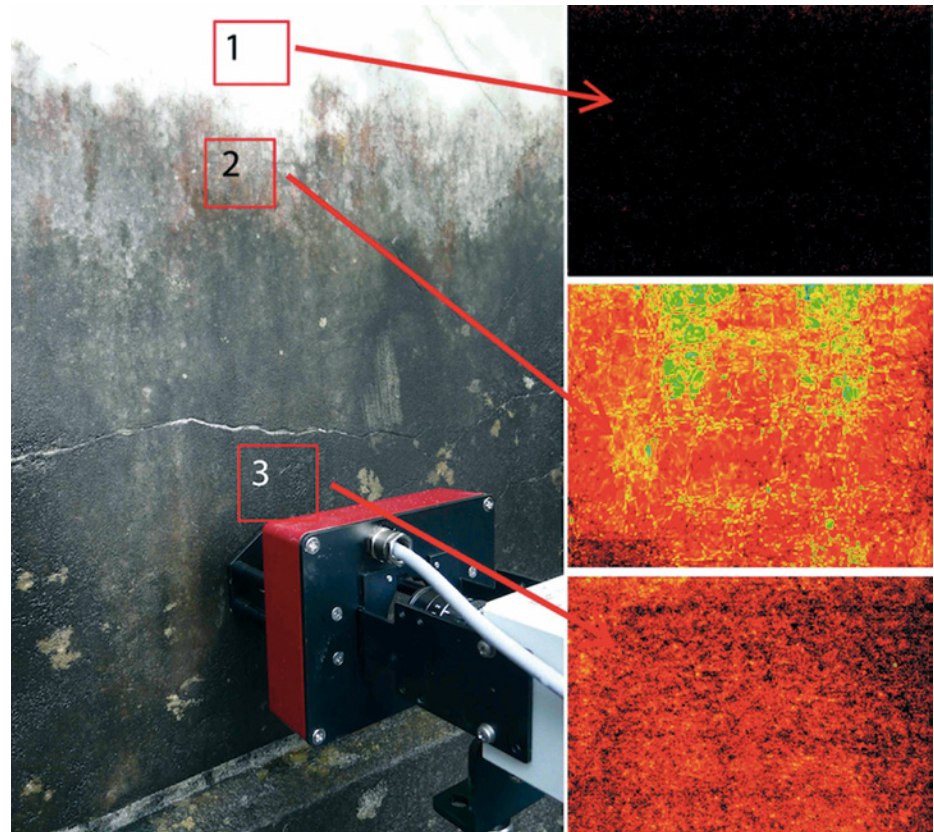


Abb. 11
Puls-Amplituden-Modulierte
Fluorometrie Untersuchung (PAM).
Messbereich vor der Reinigung mit
drei Messstellen: 1 weiß, 2 grau,
3 schwarz

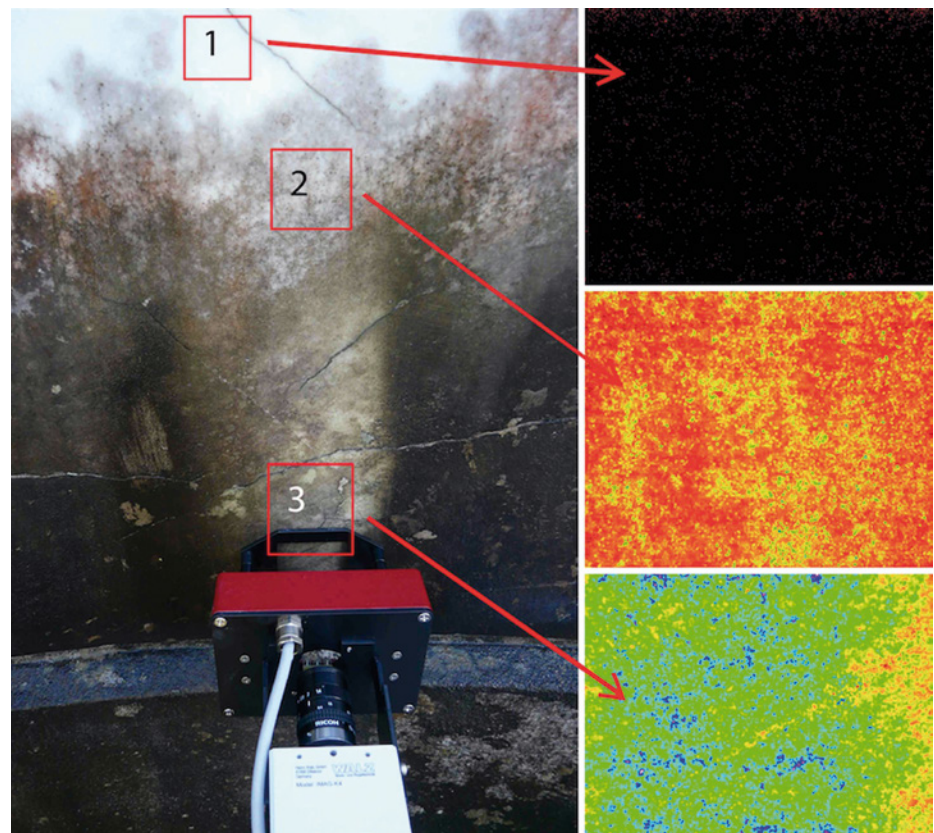


Abb. 12
Puls-Amplituden-Modulierte
Fluorometrie Untersuchung (PAM).
Messbereich nach der Reinigung mit
drei Messstellen: 1 weiß, 2 grau,
3 schwarz



Abb. 13 Vorderseite des Grabmales mit Insolation um 18.00 Uhr (19.5.14). Gelb eingefärbt sind die von der Sonne bestrahlten Bereiche.

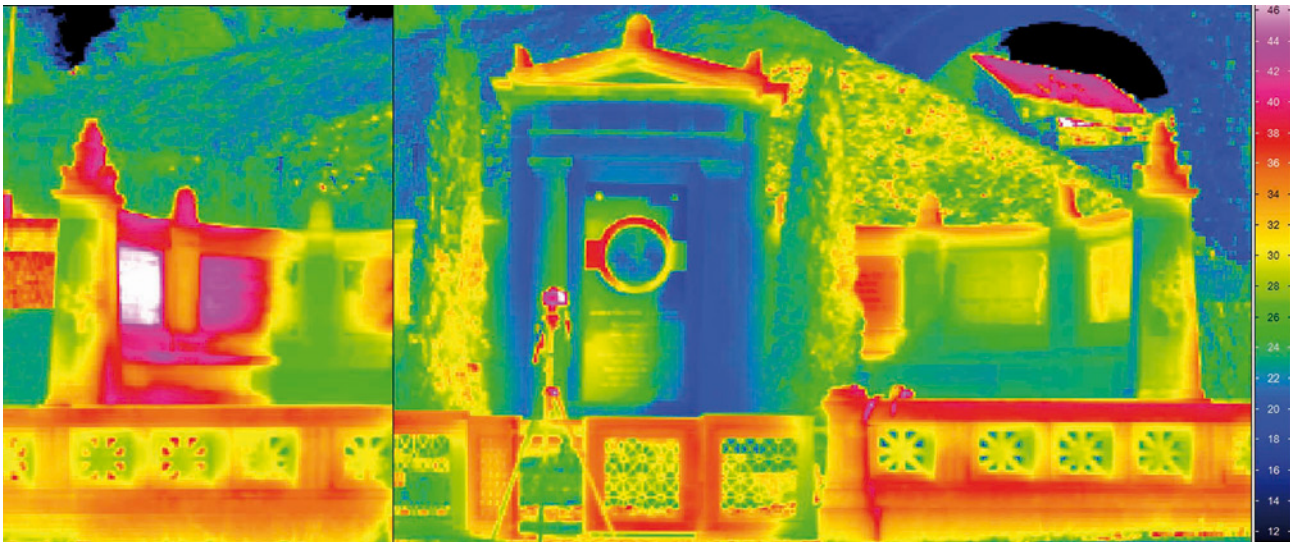


Abb. 14 Gesamtansicht des Grabmales. Der linke Flügel wird direkt besonnt, mit einer hohen Aufheizung der Syenitblöcke. Der rechte Flügel liegt innenseitig bereits wieder im Schatten, wobei die Syenitblöcke aber von der Außenseite direkt besonnt werden und deutlich wärmer sind. Der Mittelteil ist bedeutend kühler mit Ausnahme seines Daches (Aufnahme um 16.00 Uhr).

diesen Effekt noch verstärken. Aufgestellt wurde die Grabanlage ursprünglich mit vermörtelten Fugen. Die Gründe des heutigen Fehlens von Mörtelmaterial und der weiteren Auswirkungen kann mit der für den Kalzitkristall spezifischen Anisotropie erklärt werden. Das Mörtelmaterial wurde wohl aufgrund der Vorzugsorientierung langsam zermalmt, was wiederum mit der Verrückung der Blöcke im Bezug zur Insolation gesehen werden kann (erweiterte Fugen in Bereichen erhöhter Insulations-Exposition) (Abb. 15, 16).

Als im Jahr 2007 Bäume in nächster Umgebung des Grabmales gefällt wurden, könnte dies wiederum einen negativen Effekt gehabt haben und es so zu ei-

ner stärkeren Unterkühlung des Gesteins in der Nacht gekommen sein, da eine Oberfläche mit 45° Nachthimmelzuwendung eine größere Wärme-Energie-Abstrahlung aufweist (keine Wärmereflektion) [13]. Damit würde eine erhöhte Kondenswasserbildung auf der Gesteinsoberfläche miteinhergehen und dem Biobefall zugute kommen, was im aktuellen Zustand des Denkmals nicht förderlich ist. Regen, bzw. direkte Betropfung und dem Rinnverlauf ist jedoch direkt für die großflächigen Verdunkelungen verantwortlich.

Von diesen direktbetroffenen Stellen breitet sich der eigentliche Befall mittels Penetrationen verschiedener Art weiter aus.

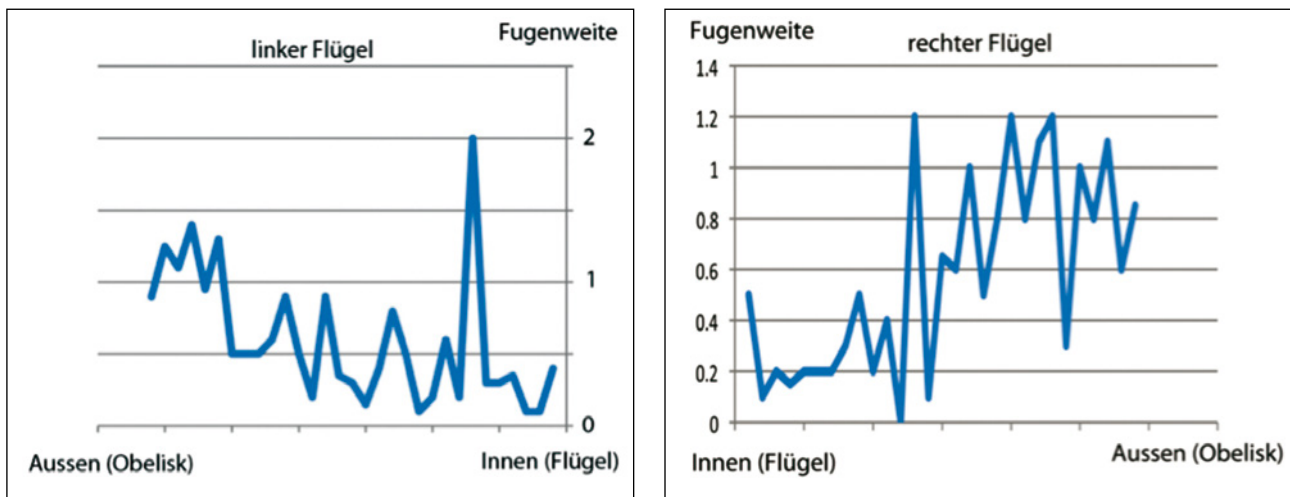


Abb. 15, 16 Anhand der Darstellung kann die Zunahme der Fugenweiten von innen nach außen der beiden Flügelwände beobachtet werden. Die zwei Grafen sind so abgebildet, dass man sich zwischen ihnen den Mittelteil (Aedikula) denken kann.

Mit Hilfe des Fluorometers konnte die Algenaktivität auf allen Bereichen nachgewiesen werden, zudem ist eine Aktivität auch unter der „toten“ schwarzen Verfärbung nachgewiesen worden. An diesen Stellen (schwarze Verfärbungshorizonte) konnte eine oberflächliche Porung organischen Ursprungs zusätzlich nachgewiesen und so auf einen Flechtenzyklus (*Verrucaria*) geschlossen werden. Eine Flechte ist eine Zusammenkunft von Algen und Pilzen. Dabei können diese Organismen wie beim Grabmal auch separiert auftreten.

Weiter zeigen die Ergebnisse deutlich, dass das Depot von biogenem Material in den offenen Rissen und Fugen, aber auch auf den normalen Oberflächen, nicht zu entfernen ist (Praxisversuche mit dem Hochdruckgerät und verschiedenen Chemikalien bestätigen diese Vermutung). Die verbleibenden Reste können nach einer Reinigung der Oberfläche diese sehr rasch wiederbesiedeln (eine Art Reinfektion). Inwieweit die Massnahmen von 1998 den Schadensverlauf beeinflussten ist nicht eindeutig zu benennen.

Die Untersuchungen brachten jedoch einige Klarheit in die vorliegenden Schadensbilder. Offen bleibt die Frage nach möglichen Behandlungen zwischen 1900 und 1998, welche sehr wahrscheinlich erfolgten. Dafür spricht das Vorhandensein von Paraffin (UV Beleuchtung/FTIR Analyse), wobei die Möglichkeit der Förderung metabolischer Prozesse durch Paraffin besteht [19].

6 Maßnahmen und künftiger Umgang

Die Untersuchungen haben drastisch vor Augen geführt, dass jeglicher Eingriff am Denkmal zum Scheitern verurteilt ist, wenn nicht die Situation seiner Exposition verändert werden kann. Somit ist die wichtigste Aufgabe nicht eine restauratorische, sondern eine denkmalpflegerisch-architektonische. Poschlod [17] schreibt von der Unterbringung von kulturhistorisch wertvollen Grabsteinen unter friedhofseigenen Überdachungen oder Arkaden. Eine Versetzung des Grabmals in Bauma scheint aber wenig sinnvoll. Als einfachster und effektivster Schutz sollte daher die Anbringung einer Überdachung geprüft werden. Beispielsweise werden Marmorfiguren wie jene von Sanssouci in Potsdam oder beim Schloss Nymphenburg in München jeden Herbst eingehaust, bzw. mit einem Brettverschlag verpackt [18].

Erst wenn das Denkmal vor Sonneneinstrahlung und Regen geschützt ist kann überhaupt an eine Reinigung gedacht werden. Hier steht dann die Vermeidung einer erneuten Verschwärzung der Oberfläche im Vordergrund.

Bei heutiger Betrachtung (2014) kann der gesamte Zustand des Gefüges als weitgehend intakt eingeschätzt werden, wobei aber akuter Handlungsbedarf im Bezug auf Reinigung und Wetterschutz (Überdachung) ansteht. Bei einer gründlich geplanten und durchgeführten Reinigung wäre die Pflege danach nicht aufwendig und das einfache, jährliche Abwaschen mit Wasser (in Sanssouci „Puppenbürsten“ genannt) sicher die beste Lösung [18].

Literatur

- [1] Müller-Füglister, Doris (1992): Adolf Guyer-Zeller (1839–1899), „Amerikanismus“ in der Schweiz? Entfaltung und Grenzen eines Eisenbahnunternehmers. Verlag Hans Rohr, Zürich
- [2] Wahl-Guyer, Wolfgang. Sprenger, Walter (1999): Adolf Guyer-Zeller, Leben und Werk. Copy Print Winterthur, Auflage 500 Stk.
- [3] Zürcher Denkmalpflege (2001): 14. Bericht 1995–1996, Von der kantonalen Denkmalpflege betreute Schutzobjekte sowie Abbrüche wichtiger Gebäude im Gebiet des Kantons Zürich und in den Städten Winterthur und Zürich. Foto-rotar AG
- [4] Eckert, Heinz (1976): Die Geschichte der Marmori, 1895–1962. Neujahrsblatt von Dietikon 1976, 29. Jahrgang, Herausgegeben von der Kommission für Heimatkunde, Druck; Oscar Hummel Dietikon
- [5] Zürcher Denkmalpflege, Dok.14., Bericht 1995–1996, S. 28–31
- [6] nsl.ethz.ch/index.php/content/view/full/2321 Laufende Forschungsarbeit (Dissertation) von Claudia Moll an der ETH Zürich (Stand Feb. 2014)
- [7] Pike, Scott Harrys (2000): Archaeological Geology and Geochemistry of Pentelic Marble, Mount Pentelikon, Attica, Greece. Dissertation
- [9] Anastasiadis, C., Stavrakas, I., Kyriazopoulos, D., Ninos, D., Triantis, D. (2005): Non Destructive Damage Estimation on Rocks with Laboratory Measurements of Dielectric Loss ($\tan\delta$). 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing „Application of Contemporary Non-Destructive Testin in Engineering“ Sept. 1-3 2005, Portoroz, Slovenia
- [10] Köhler, Wolfram (1991): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. In: Steinschäden – Steinkonservierung, Berichte zur Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Kolloquium im Rahmen des Kulturabkommens zwischen der Bundesrepublik Deutschland und der DDR, Dresden, 1.– 6. Oktober 1989; S. 52
- [11] mündl. P. Rück (14.4.2014)
- [12] Krumbein, W.E.; Gorbushina, A.A.; Dornieden, T. (1997): Änderung der physikalischen Eigenschaften von Marmor durch Pilzbewuchs. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 3. Jahrgang, S. 441–456, (1997)
- [13] Büchli, Roland; Raschle, Paul (2004): Algen und Pilze an Fassaden, Ursachen und Vermeidung. Fraunhofer IRB Verlag
- [14] Grimm, Wolf-Dieter (1999): Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügeauflockerung. Zeitschrift deutscher geologischer Gesellschaft, Bd. 150 Teil 2, S. 211, Stuttgart
- [15] Pohl, Wolfhart (2000): Wechselwirkungen zwischen endolithischen Biofilmen und Karbonatgesteinen in alpinen Gebieten Mitteleuropas. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen
- [16] Koch Andreas (2006): Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden, Universitätsverlag Göttingen
- [17] Poschlod, Klaus (1990): Wasser im Porenraum kristalliner Natursteinwerke und sein Einfluss auf die Verwitterung, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Band 7, München, Pfeil
- [18] Lange, Kathrin (2013): Die Marmorskulpturen im Park Sanssouci – Möglichkeiten der Erhaltung eines Gartenensembles. S. 176
- [19] Glienewinkel, Ute (2004): Ausgewählte Mikrowachsüberzüge als Hydrophobierungsmittel zum Schutz vor Witterungseinflüssen und mikrobiellem Befall für dichte magmatische Gesteine, Diplomarbeit, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen

Die verschiedenen Dokumentationen (1995/2011/2014) können beim Autor eingesehen werden.

Abbildungen

Abb. 1: Chronikarchiv Bauma, Nr. B02738

Abb. 2–6, 9, 10, 13: Michael Hauser

Abb. 7, 8: FTIR-Diagramm

(Hochschule der Künste Bern (HKB))

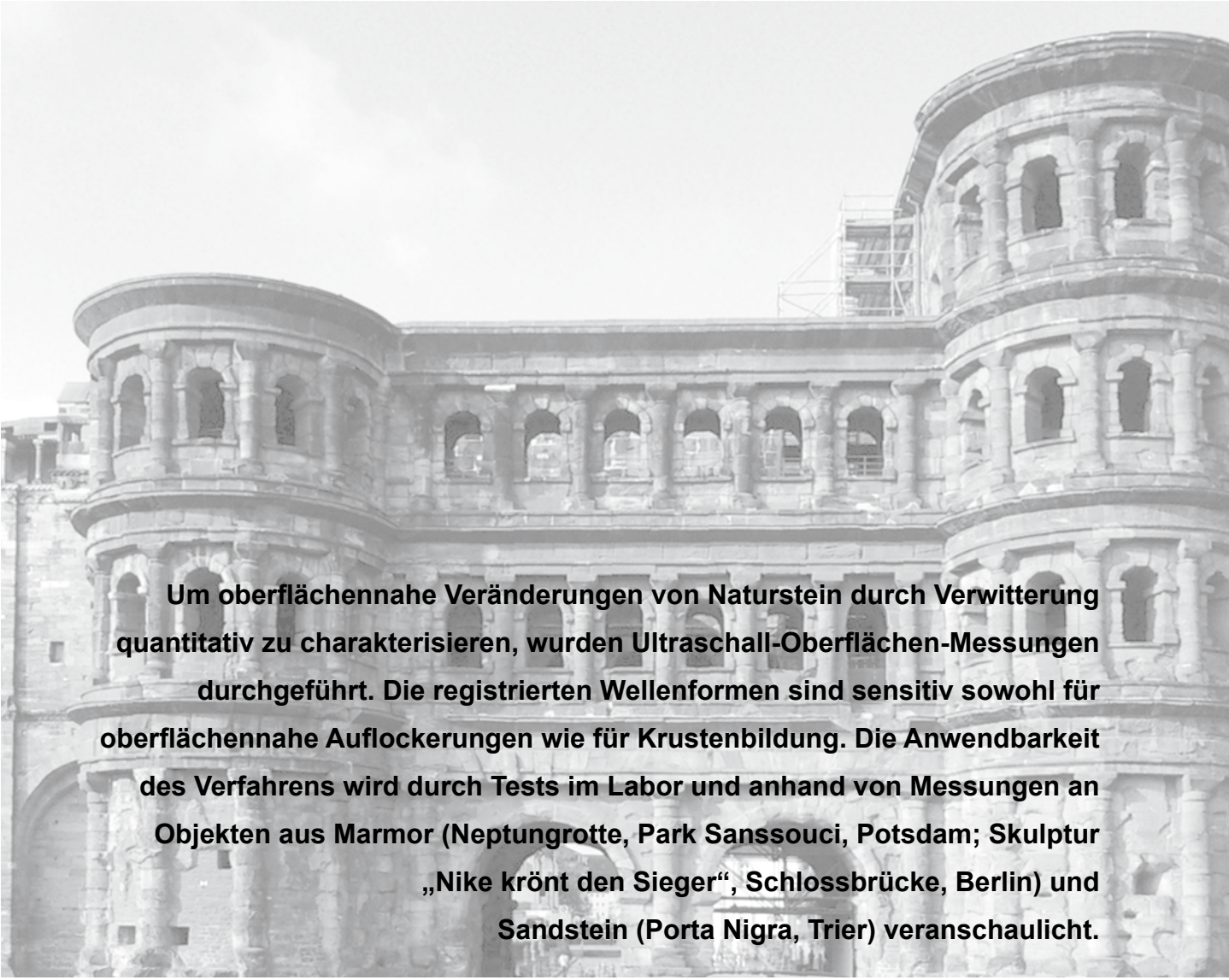
Abb. 11, 12: Michael Hauser, Jens Heinrichs (KIT)

Abb. 14: Michael Hauser (Infrarot Messgerät, Varioscan high resolution 3021, von Jenoptik, Temperaturmessbereich von -40°C bis 1200°C)

Abb. 15, 16: Michael Hauser (Excel Grafik)

Untersuchung der Verwitterung von Naturstein mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen

von T. Meier, M. Auras, M. Fehr, D. Köhn, T. Steinkraus, F. Eckel, R. Sobott, S. Siegesmund, D. Schulte-Kortnack, E. Erkul



Um oberflächennahe Veränderungen von Naturstein durch Verwitterung quantitativ zu charakterisieren, wurden Ultraschall-Oberflächen-Messungen durchgeführt. Die registrierten Wellenformen sind sensitiv sowohl für oberflächennahe Auflockerungen wie für Krustenbildung. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird durch Tests im Labor und anhand von Messungen an Objekten aus Marmor (Neptungrotte, Park Sanssouci, Potsdam; Skulptur „Nike krönt den Sieger“, Schlossbrücke, Berlin) und Sandstein (Porta Nigra, Trier) veranschaulicht.

1 Einleitung

An Bauwerken aus Naturstein spielt besonders der oberflächennahe Bereich eine wichtige Rolle: Dieser enthält Informationen über die handwerkliche Bearbeitung sowie die künstlerische Gestaltung. Das Material spiegelt regionaltypische Besonderheiten der geologischen Verhältnisse wider, während Alterungsspuren von geschichtlichen Ereignissen zeugen, die manchmal anhand von Brandspuren oder anderen Beschädigungen nachvollzogen werden können. Die Steinoberfläche ist der Witterung und unterschiedlichsten Belastungen durch bauschädliche Salze, Feuchteinwirkung, biologische Besiedlung, Schadstoffimmissionen und Staubdepositionen ausgesetzt. All diese Prozesse verändern die Steinoberfläche nicht nur in ihrem Erscheinungsbild, sondern auch in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften. Dies führt im Laufe der Zeit zu Schäden an der Steinoberfläche. Die Anfangsstadien dieser Veränderungen sind meist nicht mit dem Auge erkennbar. Auch kann es zu Veränderungen bis in mehrere Zentimeter Tiefe kommen, so dass quantitative Prüfverfahren die visuelle Beurteilung ergänzen müssen, um Kenntnis über den Festigkeitsverlauf von der Oberfläche bis in das Steininnere zu erhalten. Zur Überprüfung der Festigkeitsprofile werden meist zerstörende oder zerstörungsarme Prüfverfahren eingesetzt, wie die Bestimmung der biaxialen Biegezugfestigkeit oder der Bohrhärte [1, 2].

Um die Eigenschaften von Naturstein zerstörungsfrei zu untersuchen, können Messungen mit Ultraschall eingesetzt werden. Dabei wird ausgenutzt, dass die Geschwindigkeiten seismischer Wellen von der Zusammensetzung der Gesteinsmatrix und ihrer Textur, von der Porosität, der Porenfüllung und den Kornkontakten abhängen. Bei der Verwitterung von Naturstein bilden sich Mikrorisse, die Porosität wird erhöht und mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und elastische Moduln werden verringert. Diese Prozesse sind in der Regel mit signifikanten Verringerungen der seismischen Geschwindigkeiten verbunden, die meist auf die obersten Millimeter beschränkt bleiben, aber auch tiefer in den Stein reichen können. Dagegen werden die seismischen Geschwindigkeiten erhöht, wenn sich Oberflächenfilme bilden, welche die Oberflächen abdichten und verhärten oder wenn der Porenraum mit Gips oder anderen Ausfällungen gefüllt wird. Direkt unter einer verhärteten Kruste ist das Gesteinsgefüge oft aufgelockert, was zu einer Verringerung seismischer Geschwindigkeiten unterhalb der Kruste mit erhöhten Geschwindigkeiten führt. Daher ist es nützlich, nicht nur mittlere seismische Geschwindigkeiten zu messen, sondern auch

Veränderungen seismischer Geschwindigkeiten mit der Tiefe zu detektieren.

Änderungen der P-Wellengeschwindigkeiten durch Verwitterung sind insbesondere für Marmor intensiv untersucht worden (z.B. [3, 4]), konnten aber auch für andere Gesteinsarten nachgewiesen werden (z.B. [5, 6]). Meist werden Ultraschallmessungen in Form von Transmissionsmessungen durchgeführt, d.h. Geber und Nehmer befinden sich auf gegenüberliegenden Seiten des untersuchten Objekts und aus der Laufzeit der zuerst ankommenden P-Welle wird eine durchschnittliche P-Wellengeschwindigkeit für den angenommenen Laufweg zwischen Geber und Empfänger bestimmt. Ist das Objekt nicht von zwei Seiten zugänglich, wie es z.B. für flache Fassaden der Fall ist, können diese Messungen nicht eingesetzt werden. Außerdem lassen sich oberflächliche Veränderungen nur bedingt erkennen, wenn der Laufweg durch den gesamten Stein einschließlich des unveränderten Steininneren verläuft.

Deswegen werden hier Ultraschall-Oberflächenmessungen vorgestellt, bei denen sowohl der Geber wie der Nehmer leicht auf die annähernd reliefreie Oberfläche aufgesetzt werden. Diese Messungen können auch eingesetzt werden, wenn das Objekt nur von einer Seite zugänglich ist. Ein weiterer Vorteil von Ultraschall-Oberflächen-Messungen ist, dass neben der P-Welle auch Oberflächenwellen (hier Rayleighwellen) beobachtet werden können, die sich entlang der Oberfläche ausbreiten und damit besonders sensitiv für oberflächennahe Veränderungen sind. Weiterhin weist die Frequenzabhängigkeit der Rayleighwellengeschwindigkeit auf Veränderungen seismischer Geschwindigkeiten (vor allem der S-Wellengeschwindigkeit) mit der Tiefe hin, da die höheren Frequenzanteile der Rayleighwelle geringere Eindringtiefen besitzen als die tieferen.

Zunächst werden Tests mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen im Labor vorgestellt. Dabei wurden Proben aus Marmor, Sandstein und Tuff künstlich bewittert und vor bzw. nach der Verwitterung mit Ultraschall untersucht. Sowohl für Marmor (Neptungrotte, Park Sanssouci, Potsdam; Skulptur „Nike krönt den Sieger“, Schlossbrücke Berlin) wie für Sandstein (Porta Nigra, Trier) werden Anwendungsbeispiele gezeigt. Dabei wird ein breites Spektrum unterschiedlicher Auswerteverfahren abgedeckt, die von der einfachen Bestimmung mittlerer P- und Rayleighwellengeschwindigkeiten über die Dispersionsanalyse der Rayleighwelle bis zur Wellenforminversion von ein- bzw. zweidimensionalen Modellen der oberen Zentimeter der untersuchten Objekte reichen.

2 Laboruntersuchungen zur hygrothermischen Verwitterung von Naturstein

Gesteinsproben aus Marmor, Sandstein und Tuff wurden einer künstlichen Bewitterung ausgesetzt, um Veränderungen mittels Ultraschall-Oberflächen-Messungen in verschiedenen Stadien zu verfolgen. Es wurden ein Marmor von geringer Porosität und hoher Festigkeit, zwei Sandsteine mit mittlerer Porosität und Festigkeit sowie ein vulkanischer Tuff mit hoher Porosität und geringer Festigkeit ausgewählt. Einige Literaturdaten sind in Tabelle 1 angegeben. Für die Versuche standen von jeder Varietät zwei Großprismen von 40 cm × 20 cm × 20 cm zur Verfügung, von denen eines der künstlichen Bewitterung unterzogen wurde, während das andere als Referenz diente. Die künstliche Bewitterung bestand aus Frost-Tau-Wechseln und einer sogenannten Gewitterregensimulation. Die Gewitterregensimulation wurde in Anlehnung an DIN EN 13687-2 [7] durchgeführt. Dabei soll die Oberseite der Proben durch Bestrahlung mit Infrarotstrahlern für eine Zeitspanne von 5 h und 45 min auf 65 °C aufgeheizt werden. Anschließend wird sie durch Beregnung mit 12 °C kaltem Wasser 15 min lang abgekühlt. Da mit den gewählten Zeiten der Tuffstein aufgrund seines großen Porenvolumens und Feuchtegehaltes lediglich auf 55 °C aufgeheizt werden konnte, wurde die Bestrahlungszeit auf 7 h und 45 min heraufgesetzt. Die Frost-Tau-Wechsel wurden nach DIN EN 12371 [8] durchgeführt. In jedem Zyklus wurden die Proben zunächst für sechs Stunden in +20 °C warmem Wasser gelagert. Anschließend wurde das

Wasser abgelassen und die Proben auf –20 °C heruntergekühlt. Der Einbau eines Temperaturfühlers in einen Probekörper aus Tuffstein stellte sicher, dass die Tiefsttemperatur von –20 °C auch im Kern der Probekörper erreicht wurde.

Die erste Bewitterungsphase bestand aus 50 Gewitterregensimulationen und 47 Frost-Tau-Wechseln. Anschließend wurden die Proben getrocknet und erneut per Ultraschall vermessen. Die zweite Bewitterungsphase umfasste zunächst 40 Gewitterregensimulationen und 40 Frost-Tau-Wechsel. Da die Natursteinproben die Bewitterung bis hierhin ohne makroskopisch erkennbare Schäden überstanden hatten, folgten zusätzlich einige Frost-Tau-Wechsel unter verschärften Bedingungen, in denen die Proben unter Wasserbedeckung, d. h. bei Wassersättigung auf –20 °C tiefgefroren wurden. Nach drei dieser Frost-Tau-Wechsel hatten sich Risse am Tuff gebildet, woraufhin dieser aus der Bewitterungskammer genommen wurde. Für die beiden Sandsteine beschränkten sich die Versuche auf 7 Zyklen, da sich am Medarder Sandstein eine wenige Millimeter dünne Schale von der Oberfläche ablöste. Beim Marmor wurde die künstliche Bewitterung nach dem 8. Zyklus abgebrochen, ohne dass makroskopisch Schäden erkennbar gewesen wären.

Die Ultraschall-Oberflächen-Messungen erfolgten in Form von Profilmessungen, bei denen Geber und Empfänger zunächst im Abstand von 5 cm auf die Steinoberfläche aufgesetzt wurden. Hierbei wurde die Position des Gebers fixiert und der Empfänger

Tab. 1 Literaturangaben zu den untersuchten Gesteinen [aus 9, 10, 11] sowie unveröffentlichte Daten des Instituts für Steinkonservierung, Mainz

Steinvarietät	Carrara Marmor	Medarder Sandstein	Schweinstaler Sandstein	Weiberner Tuff
Probenkennung	CM	MS	SS	WT
Herkunftsort	Carrara, Italien	Medard, Rheinland-Pfalz (Westpfalz)	Krickenbach, Rheinland-Pfalz (Pfälzerwald)	Weibern, Rheinland-Pfalz (Osteifel)
Geol. Alter	Lias	Rotliegend	Buntsandstein	Quartär
Gesteinsbeschreibung	weißer, fein- und gleichkörniger Marmor mit grauer Bänderung	gelbgrauer, fein- bis mittelkörniger Sandstein, reich an Gesteinsbruchstücken, überwiegend tonige, teils kieselige Kornbindung	roter, mittelkörniger Sandstein, reich an Gesteinsbruchstücken, mit kieseliger, teils kaolinitischer Kornbindung	ockerfarbener Selbergit-Tuff mit feinkörniger Matrix und grobkörnigen Einsprenglingen u. a. aus Bims und Gesteinsbruchstücken
Rohdichte (g/cm ³)	2,71	2,17	2,12	1,37
Porosität (Vol.-%)	0,3	19	20	46
Druckfestigkeit (N/mm ²)	133	30	59	15

schrittweise um 0,5 cm bis 1 cm entlang des Profils versetzt. Abhängig von der Messstelle bestehen die Profile aus 10 bis 20 Einzelmessungen. Geber und Empfänger bestehen aus breitbandigen Ultraschallprüfköpfen (20 kHz–300 kHz, Fa. Geotron-Elektronik, Pirna), die mit Hilfe einer speziellen Halterung und geringem, konstantem Anpressdruck auf die Oberfläche aufgesetzt wurden. Die Prüfköpfe besitzen eine Tastspitze von nur ca. 2 mm Durchmesser und ermöglichen dadurch punktgenaue, reproduzierbare Messungen ohne Verwendung eines Koppelmittels.

Abbildung 1 zeigt Beispiele für Ultraschall-Oberflächen-Messungen an der Marmorprobe vor der Bewitterung und nach der 2. Bewitterungsphase. Die Rayleighwelle ist klar erkennbar und zeigt eine signifikante Verringerung ihrer Geschwindigkeit um

ca. 50 %, die auf starke Veränderungen der Gesteinsmatrix hinweist. Auch nach der direkten Rayleighwelle sind Wellen erkennbar, bei denen es sich vor allem um Rayleighwellen-Reflexionen von den Kanten der Gesteinsproben handelt. Durch eine Änderung der Skalierung lässt sich auch die vor der Rayleighwelle ankommende P-Welle erkennen. Meistens kann auch ihre Geschwindigkeit mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen bestimmt werden, allerdings ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wesentlich geringer als im Fall der Rayleighwelle. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich aller gemessenen Rayleigh- und P-Wellengeschwindigkeiten. Beide Geschwindigkeiten korrelieren sehr gut, wobei in einem homogenen Halbraum mit einem Poisson-Verhältnis von 0.25 die P-Welle ca. um den Faktor 1.9 schneller ist als die Rayleighwelle.

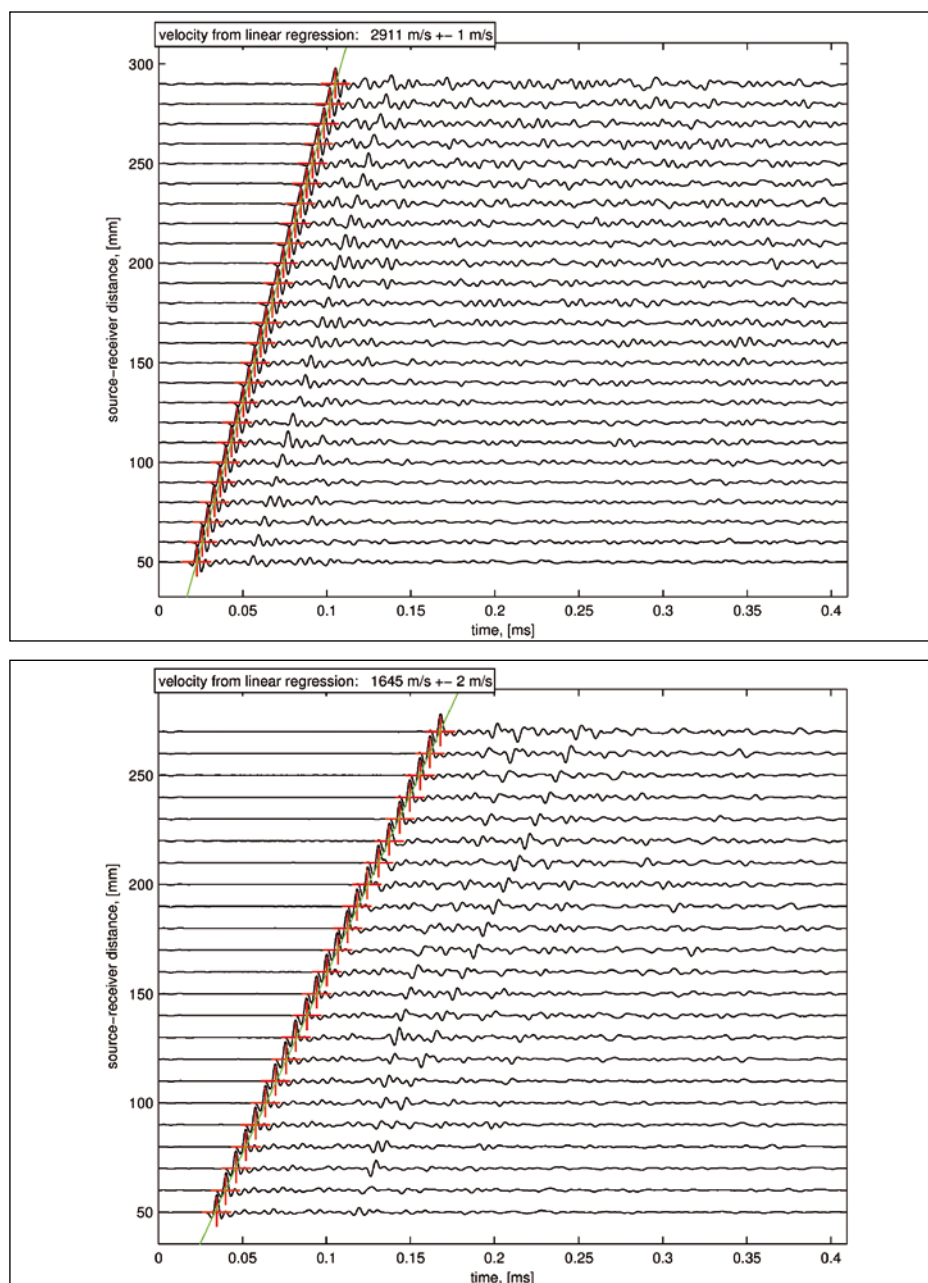


Abb. 1

An Marmor entlang eines Profils gemessene Wellenformen. Vor der Bewitterung (oben) und nach der Bewitterung (unten)

Für eine erste Einschätzung des Verwitterungszustandes ist es insbesondere für Marmor ausreichend, wie in Abbildung 1 mittlere Geschwindigkeiten für die Profile zu bestimmen. Die Frequenzabhängigkeit der Rayleighwellengeschwindigkeit – auch Dispersion genannt – liefert weitere nützliche Informationen. Abbildung 3 zeigt mittlere Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle als Funktion der Frequenz für die untersuchten Proben vor und nach den zwei Bewitterungsphasen. Für jede Geber-Nehmer-Entfernung wurde die Gruppengeschwindigkeit der Rayleighwelle mittels einer Zeit-Frequenz-Analyse [12] bestimmt und über das Profil gemittelt. Es lässt sich grob abschätzen, dass die Rayleighwelle bei einer Frequenz von 200 kHz vor allem von den Eigenschaften des Objekts in den obersten Millimetern abhängt. Bei 100 kHz beträgt die Tiefe der maximalen Empfindlichkeit ca. 0,5 cm und bei 50 kHz nur noch ca. 1 cm.

Wesentliche Unterschiede in der Verwitterung der Gesteinsvarietäten werden offensichtlich (Abb. 3). Bereits nach der ersten Bewitterungsphase ist die Rayleighwellengeschwindigkeit für den Marmor stark verringert. Die Gruppengeschwindigkeit ändert sich

mit der Frequenz kaum, d.h. die markanten Veränderungen in der Gesteinsmatrix reichen bis in größere Tiefen. Durch die 2. Bewitterungsphase verringert sich die Rayleighwellengeschwindigkeit nur noch wenig. Die Veränderungen in der Geschwindigkeit mit

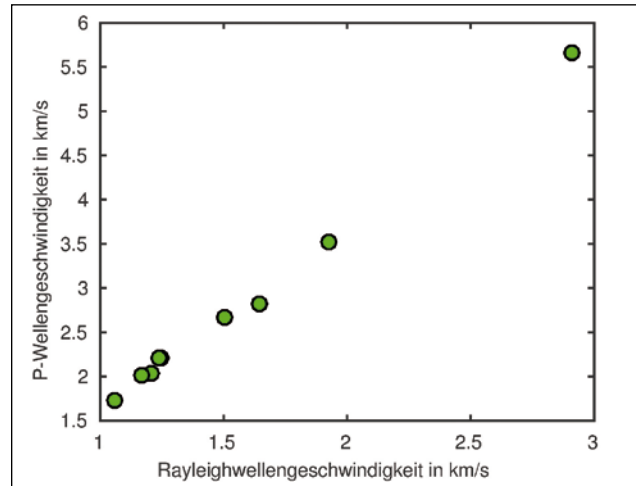


Abb. 2 Vergleich der im Labor an den unbewitterten und bewitterten Gesteinsproben gemessenen mittleren Rayleigh- und P-Wellengeschwindigkeiten

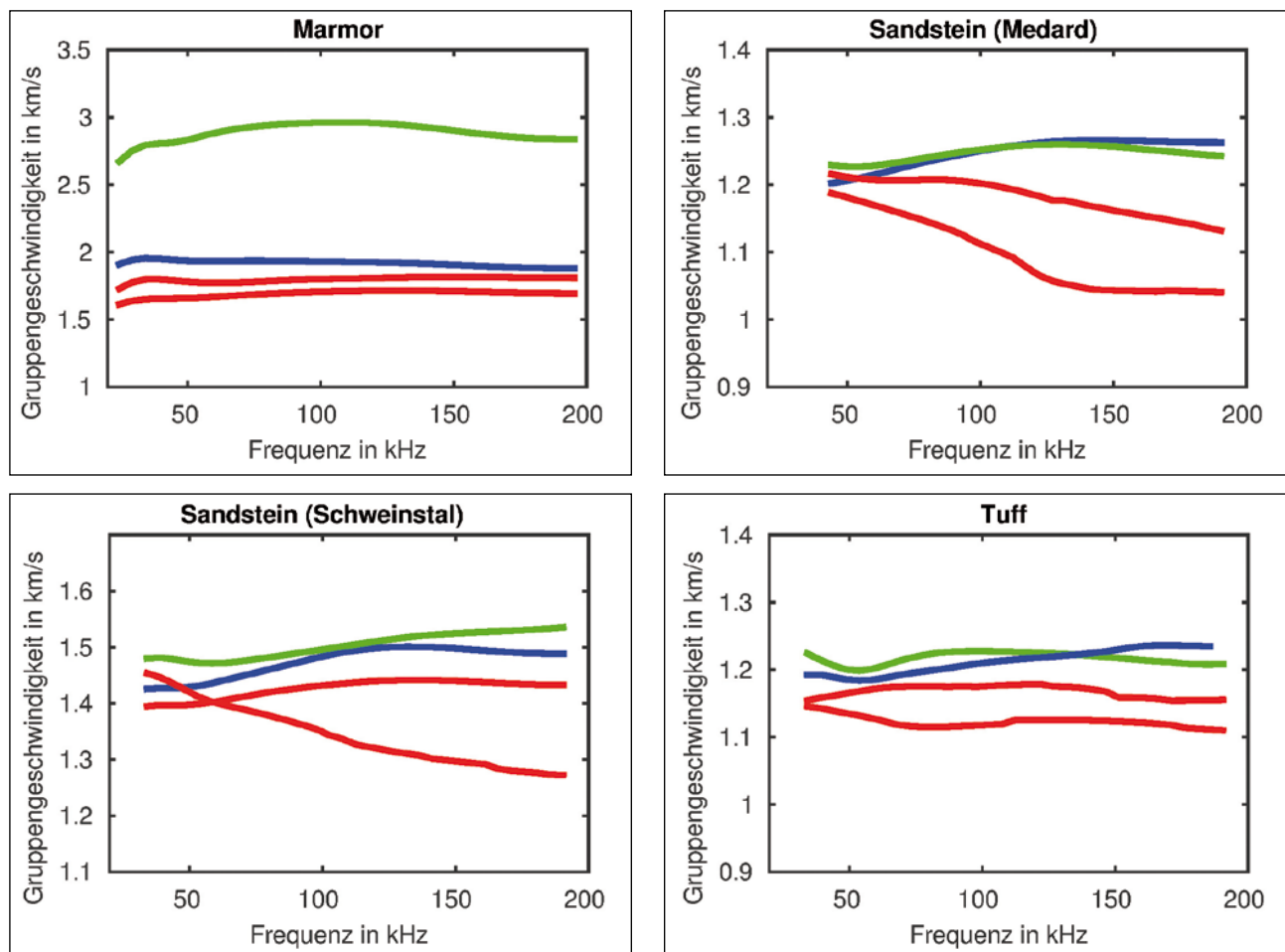


Abb. 3 Gruppengeschwindigkeit der Rayleighwelle als Funktion der Frequenz vor der Bewitterung (grün), nach der ersten Bewitterungsphase (blau), nach der zweiten Bewitterungsphase (rot). Nach der zweiten Bewitterungsphase wurden die Gruppengeschwindigkeiten auf zwei unterschiedlichen Profilen gemessen, um die laterale Variabilität der Verwitterung zu charakterisieren.

andauernder Bewitterung sind also nichtlinear: Am Anfang sind die Veränderungen stark, nehmen mit der Zeit jedoch signifikant ab. Dagegen ändern sich die Rayleighwellengeschwindigkeiten in den Sandsteinen und Tuff nach der 1. Bewitterungsphase kaum, d. h. sie sind zunächst weniger anfällig für thermische Verwitterung als der Marmor. Nach der 2. Bewitterungsphase werden auch bei diesen Gesteinsvarietäten starke Veränderungen deutlich, wobei die Sandsteine eher oberflächliche Veränderungen zeigen, wogegen der Tuff, ähnlich wie der Marmor, tiefreichende Veränderungen aufweist. Nach der 2. Bewitterungsphase wurden die Rayleighwellengeschwindigkeiten auf zwei verschiedenen Profilen gemessen. Dies zeigt, dass insbesondere bei den Sandsteinen die Veränderungen räumlich stark variabel sein können.

Zusätzlich wurden die gemessenen Wellenformen nach Tiefenprofilen der Scherwellengeschwindigkeit invertiert [13], um Veränderungen mit der Tiefe zu quantifizieren. Bestimmt wurden graduelle Änderungen der Scherwellengeschwindigkeit und ein tiefenunabhängiger Qualitätsfaktor Q_p [14]. Der Qualitätsfaktor ist ein Maß für die Dämpfung seismischer Wellen und muss bei der Wellenforminversion berücksichtigt werden, da er ihre Eigenschaften, insbesondere den Frequenzinhalt, wesentlich beeinflusst. Abbildung 4 zeigt die resultierenden Tiefenprofile für Marmor vor der Bewitterung und nach der zweiten Bewitterungsphase. Der verwendete Inversionsalgorithmus testet

für eine große Anzahl möglicher Modelle der Scherwellengeschwindigkeit, ob diese die gemessenen Wellenformen erklären können. Neben der Bestimmung eines „optimalen“ Modells (schwarz-gelb gestrichelt), lassen sich auch Unsicherheiten des Tiefenprofils veranschaulichen. Die ebenfalls akzeptablen Modelle (blau) formen ein blaues Band, welches die Schwankungsbreite möglicher Scherwellengeschwindigkeits-Modelle zeigt. Durch die Bewitterung verringert sich die Scherwellengeschwindigkeit sehr stark von ca. 3,3 km/s auf 1,8 km/s. Klar wird auch, dass die Veränderungen sehr tief reichen. Allerdings sind die Änderungen mit der Tiefe auch nach der Bewitterung gering. Vor der Bewitterung ist eine leichte Abnahme der Scherwellengeschwindigkeit zur Oberfläche vorhanden, die möglicherweise durch die Bearbeitung hervorgerufen worden ist.

3 Untersuchung der Verwitterung von Marmor

3.1 Neptungrotte (Park Sanssouci, Potsdam)

In diesem Kapitel wird der Einsatz von Ultraschall-Oberflächen-Messungen zur Untersuchung der Verwitterung von Marmor an zwei Beispielen demonstriert. Zunächst wurden Messungen an der Marmorfassade der Neptungrotte im Park Sanssouci in Potsdam (Abb. 5) durchgeführt. Die Grotte wurde von 1751 bis 1757 im östlichen Teil des Parks nach Plänen von Georg Wenzeslaus von Knobelsdorff

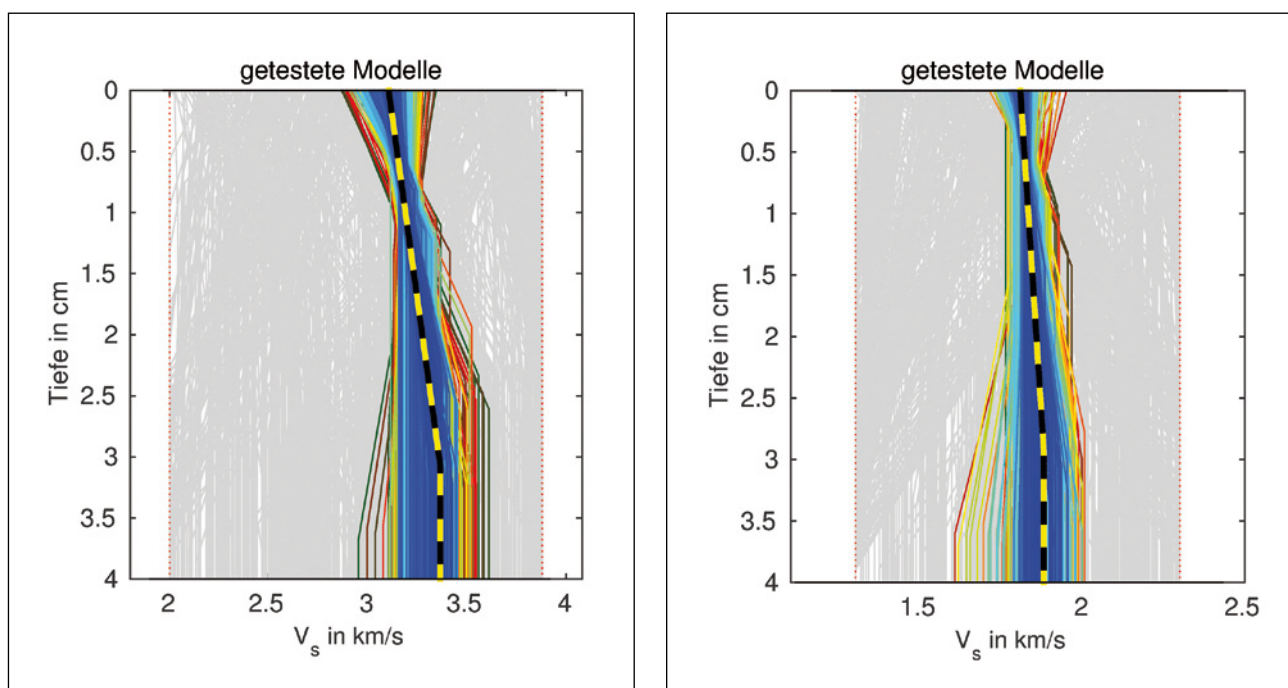


Abb. 4 Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeit für den unbewitterten Marmor (links) und den verwitterten Marmor nach der zweiten Bewitterungsphase (rechts). Alle getesteten Modelle sind dargestellt. Grau: nicht zutreffende Modelle. Rot bis blau: Modelle, welche die Daten zunehmend besser erklären. Optimales Modell: schwarz-gelb gestrichelt. Die Scherwellengeschwindigkeit im unbewitterten Marmor (links) ist wesentlich größer als im bewitterten Marmor (rechts).

erbaut. Der Name ist von einer überlebensgroßen Neptunstatue aus Marmor mit einem Dreizack und zwei Nixen und Tritonen abgeleitet, die auf der Attika stand. Die Skulptur wurde von Georg Franz Ebenhech und Johann Peter Benckert geschaffen. Die Neptungrotte besteht im Inneren aus Ziegeln und wurde aufwändig mit einer Attika, einem Gesims, einer Vorhalle, Becken und Säulen aus schlesischem (Kauffunger) und italienischem Carraramarmor versehen. Der Marmor zeigt typische Schadensbilder wie Absanden, Abplatzungen und Risse. Weiterhin bilden sich an der Oberfläche des Carraramarmors Krusten aus schwarzem Gips. Nach häufigen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen kann es aufgrund von Unterschieden in der hygrischen und thermischen Ausdehnung zwischen der Oberflächenschicht und dem Untergrund zu Ablösungen der Kruste kommen. Das Kalzium, das für die Bildung von Gips benötigt wird, stammt aus den gesteinsbildenden Mineralen des Marmors, dem Kalzit. Die Lösung von Kalzit an Korngrenzen führt zu einer Auflockerung der Gesteinsmatrix unterhalb der Kruste. Löst sich die äußere Gipsschicht, wird weißer, zuckerartiger, stark absandender Marmor sichtbar. Der Kauffunger Marmor, der aus geologischer Sicht eigentlich ein Kalkstein ist, zeigt andere Verwitterungserscheinungen. Er war tektonischen Spannungen ausgesetzt und weist viele Stylolihe und verheilte Risse auf, die Schwächezonen innerhalb der Gesteinsmatrix dar-

stellen. Bei Belastung öffnen sich diese Risse und kleine Stücke können herausfallen.

An der Neptungrotte wurden 1998, 2002 und 2014 Untersuchungen mit Ultraschall in Form von Transmissionsmessungen durchgeführt [15, 16, 17]. Die P-Wellengeschwindigkeiten des Carraramarmors schwanken zwischen 1,5 km/s und 4,5 km/s, die des Kauffunger Marmors zwischen 2,5 km/s und 5,5 km/s. Die Interpretation der Messwerte folgt dem Vorgehen von [18, 19, 20]. Die Interpretation der in-situ-Messungen wurde unterstützt durch Untersuchungen an Bohrkernen. Eine wesentliche Änderung der P-Wellengeschwindigkeiten über die 16 Jahre konnte nicht nachgewiesen werden. Die Interpretation der Messungen für den Carraramarmor unterstützt das Vorhandensein einer einfachen Beziehung zwischen P-Wellengeschwindigkeit und Porosität als ein Hinweis auf Verwitterung.

In 2014 wurden an 46 ausgewählten Lokationen ergänzend Ultraschall-Oberflächen-Messungen durchgeführt. Die Datenqualität war durchgehend sehr gut, so dass für alle Profile mittlere Rayleighwellengeschwindigkeiten bestimmt werden konnten. Mittlere P-Wellengeschwindigkeiten konnten für 28 Profile bestimmt werden, wobei sie größere Fehler als die Rayleighwellengeschwindigkeiten aufweisen können. Der Vergleich der gemessenen P- und Rayleighwellengeschwindigkeiten zeigt eine überwiegend positive Korrelation (Abb. 6). Abweichungen



Abb. 5 Neptungrotte im Park Sanssouci, Potsdam

von der Korrelation lassen sich vor allem durch Unsicherheiten insbesondere in der Bestimmung der P-Wellengeschwindigkeit bzw. durch Änderungen der Eigenschaften mit der Tiefe und der daraus folgenden Dispersion der Rayleighwelle erklären. Wie die P-Wellengeschwindigkeit, so zeigt auch die Rayleighwellengeschwindigkeit für Carraramarmor eine erhebliche Variabilität: sie reicht von 0,67 km/s bis 2,25 km/s. Die Rayleighwellengeschwindigkeiten für den Kauffunger Marmor sind größer und schwanken zwischen 2,68 km/s und 2,99 km/s. Während die Rayleighwellenformen für den Kauffunger Marmor oft durch Risse stark gestört werden, kann sie im Carraramarmor durch Verwitterung um bis zu 70 % reduziert werden. Interessant ist weiter, dass die Rayleighwellengeschwindigkeiten in dem mit Kiesel-säureester behandelten Carraramarmor zwischen 2,35 km/s und 2,8 km/s liegen und damit größer sind als im unbehandelten Carraramarmor.

Mittlere Rayleighwellengeschwindigkeiten sind einfach zu bestimmen und geben wesentliche Hinweise auf den Verwitterungszustand. Anhand der Rayleighwellen-Dispersion kann zusätzlich die Variabilität der Eigenschaften in Abhängigkeit der Tiefe abgeschätzt werden. Für den behandelten Marmor, für den Kauffunger Marmor und im Carrara-Marmor mit hohen Geschwindigkeiten ist sie gering. Dies deutet auf geringe Änderungen der Festigkeit mit der Tiefe hin. Auf einigen Profilen weist die Rayleighwelle allerdings deutliche Dispersion auf. Mittels Wellenforminversion wurden die Änderungen der Scherwellengeschwindigkeit mit der Tiefe für die oberen ca. 1,5 cm bis 2 cm quantifiziert. Um einen Überblick zu geben, sind in Abbildung 7 die resultierenden optimalen Modelle ohne ihre Unsicherheiten dargestellt. Auch aus dieser Abbildung wird die beträchtliche Variabilität des Verwitterungszustandes deutlich: die Scherwellengeschwindigkeiten können zwischen ca. 1 km/s und 3,5 km/s schwanken. Die Änderungen reichen in den meisten Fällen mehrere Zentimeter tief in den Stein hinein. Interessant ist weiterhin, dass einige Modelle auf oberflächennahe Auflockerung hinweisen (blau) und andere das Vorhandensein einer Kruste andeuten (rot), wobei sowohl die oberflächennahe Auflockerung wie auch die Krusten unterschiedlich stark ausgeprägt sein können.

Die Wellenforminversion liefert neben dem Tiefenprofil der Scherwellengeschwindigkeit in den oberen ca. 3 cm einen mittleren Qualitätsfaktor Q_μ , der ein Maß für die Dämpfung insbesondere der Scher- und der Rayleighwellen ist. In Abbildung 8 werden die mittleren Scherwellengeschwindigkeiten in den oberen 1,5 cm mit dem mittleren Qualitätsfaktor verglichen.

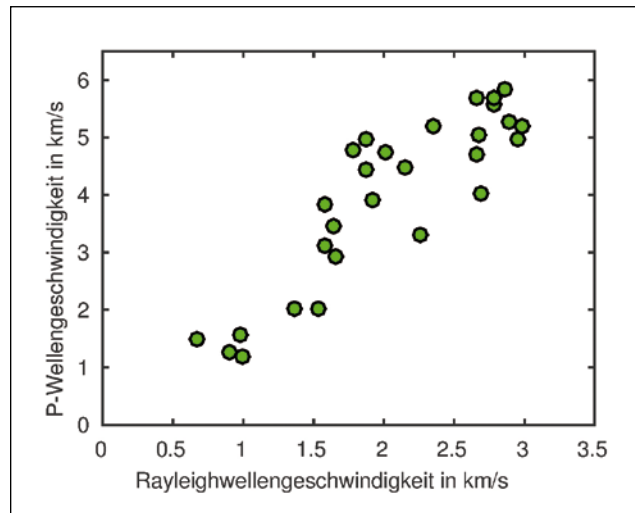


Abb. 6 Vergleich der an der Neptungrotte mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen beobachteten Rayleigh- und P-Wellengeschwindigkeiten

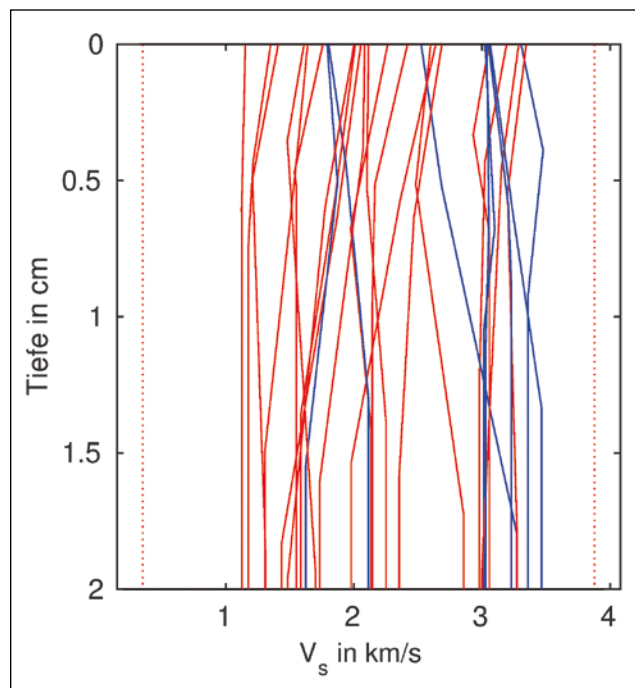


Abb. 7 Vergleich der an der Neptungrotte mittels Wellenforminversion erhaltenen eindimensionalen Modelle der Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe. Jedes Modell ist repräsentativ für eine andere Lokation. Rot: Modelle, die auf das Vorhandensein einer Kruste hinweisen, da die Scherwellengeschwindigkeit mit der Tiefe abnimmt. Blau: die Zunahme der Geschwindigkeit an der Oberfläche mit der Tiefe weist auf oberflächennahe Auflockerung hin.

Der Qualitätsfaktor schwankt für die unterschiedlichen Profile von ca. 5 bis 80 und liegt bei intaktem Marmor, der sich durch hohe Scherwellengeschwindigkeiten auszeichnet, in der Regel über 30. Niedrige Qualitätsfaktoren beeinflussen die Wellenform sehr stark und müssen deshalb bei der Wellenforminversion berücksichtigt werden. Sie werden durch Auflockerung und hohe Porosität aber auch durch hohen Wassergehalt

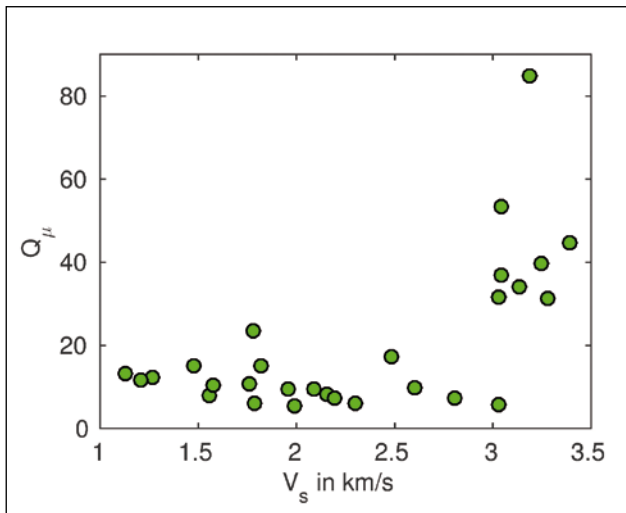


Abb. 8 Vergleich der an der Neptungrotte mittels Wellenforminversion bestimmten mittleren Scherwellengeschwindigkeiten in den oberen 1.5 cm mit dem mittleren Qualitätsfaktor Q_u

hervorgerufen. Ein Vorteil der aufwändigeren Wellenforminversion ist, dass ein quantitatives Maß für die Dämpfung der seismischen Wellen bestimmt werden kann, das weitere Hinweise auf den Zustand des untersuchten Natursteins liefert.

3.2 Schlossbrücke (Berlin)

Weiterhin wird die Untersuchung der Verwitterung von Marmor mittels Ultraschall-Oberflächen-Messungen an einer Skulptur auf der Schlossbrücke in Berlin vorgestellt. Die Schlossbrücke in Berlin Mitte führt die Prachtstraße „Unter den Linden“ über die Spree. Die Brücke wurde von Karl Friedrich Schinkel entworfen und zwischen 1822 und 1824 gebaut. Die jeweils vier Figurengruppen auf der Nord- und Südseite wurden in der Zeit von 1847–1857 von Bildhauern der Rauch- bzw. Shadow-Schule aus Carrara Marmor angefertigt. Die Figurengruppen No. 3 („Athena bewaffnet den Krieger“) und 4 („Nike krönt den Sieger“) auf der Südseite waren im Jahre 2008 Gegenstand umfangreicher physikalischer und chemischer Untersuchungen im Vorfeld einer Restaurierung [21]. An der von Friedrich Drake 1853 geschaffenen Skulptur „Nike krönt den Sieger“ (Abb. 9 oben) wurden an mehreren Stellen Ultraschall-Oberflächen-Messungen durchgeführt, die im Sockelbereich hohe Rayleighwellengeschwindigkeiten und damit Hinweise auf intakten Marmor ergaben. Insbesondere an der Wade des Siegers (Abb. 9 unten) wurden jedoch auch sehr geringe Rayleighwellengeschwindigkeiten beobachtet. In Abbildung 10 ist das Ergebnis der Wellenforminversion für das Tiefenprofil der Scherwellengeschwindigkeit an der Wade zu sehen. Es zeichnet sich durch sehr geringe Scherwellengeschwindigkeiten von ca. 0,7 km/s an der Oberfläche aus. Die Scherwellengeschwindig-

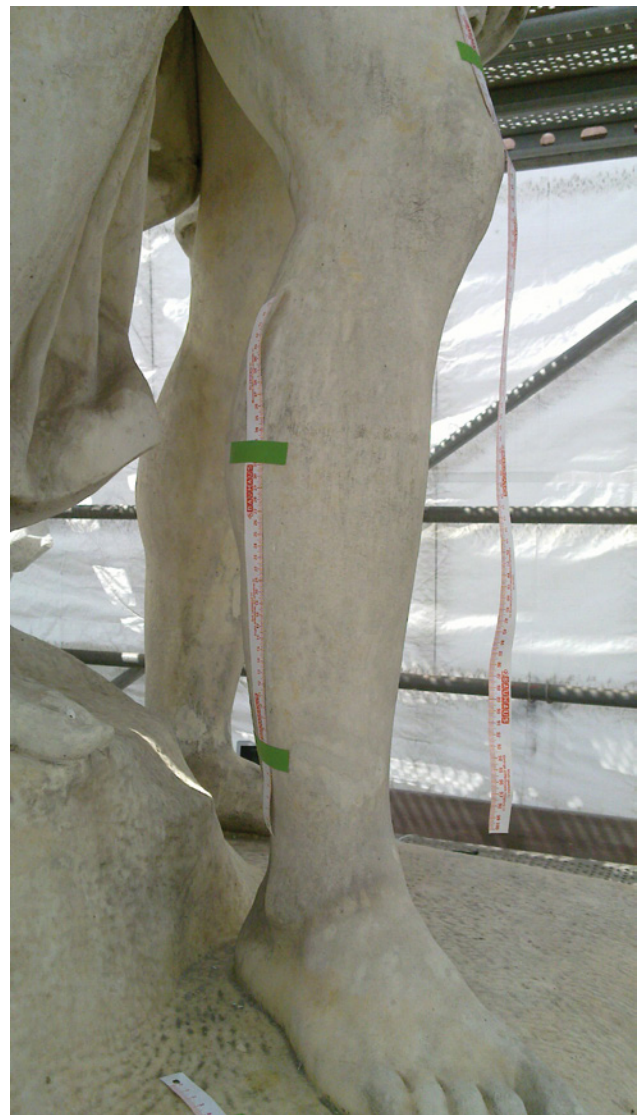


Abb. 9 Oben: Skulptur „Nike krönt den Sieger“ auf der Schlossbrücke in Berlin, Mitte; unten: untersuchtes Profil auf der Wade des Siegers

keit steigt dann mit der Tiefe stark auf ca. 2 km/s in 1,5 cm Tiefe an. Das ist ein außergewöhnliches Tiefenprofil und unterscheidet sich von den im Labor und an der Neptungrotte gemessenen. Es wird vermutet, dass diese sehr starke oberflächliche Verringerung der Scherwellengeschwindigkeit nicht allein durch thermische Verwitterung sondern auch durch chemische Einflüsse hervorgerufen wurde, da die thermische Verwitterung eher tiefreichende Veränderungen hervorrufen. Offensichtlich sind solche oberflächennahen Veränderungen mit Transmissionsmessungen nur schwer zu detektieren.

4 Untersuchung der Verwitterung von Sandstein (Porta Nigra, Trier)

Die Porta Nigra in Trier (Abb. 11) ist ein monumentales Stadttor aus Römischer Zeit (2. Jahrhundert) und gehört zum UNESCO-Weltkulturerbe. Im Mittelalter wurde es zu einer Kirche umgebaut und der Torzugang befand sich unter der Erde. Anfang des 19. Jahrhunderts wurde das Römische Tor wieder freigelegt und die Porta Nigra erhielt wieder ihre ursprüngliche, heute sichtbare Form. Die Porta Nigra wurde aus großen Sandsteinquadern lokaler Herkunft errichtet [22]. Der Name Porta Nigra ist bereits seit dem Mittelalter belegt und zeigt, dass die Schwarzfärbung bereits damals vorhanden war. Eine ähnliche Schwarzfärbung ist von vielen anderen Bauwerken aus Sandstein bekannt und wird durch Anreicherungen von Eisenoxiden/-hydroxiden sowie durch Schmutz- und Schadstoffablagerungen hervorgerufen. Es bilden sich harte, wasserundurchlässige oberflächliche Krusten, unterhalb derer die Gesteinsmatrix stark gestört sein kann [22]. Oft werden die schwarzen Krusten deshalb beseitigt, allerdings kann dieses Vorgehen für die Porta Nigra nicht empfohlen werden, da die Schwarzfärbung zu ihren wesentlichen Merkmalen gehört, die erhalten bleiben soll [22]. Neben anderen Untersuchungen wurden Ultraschall-Oberflächen-Messungen durchgeführt, um den oberflächennahen Zustand der Sandsteine sowie die Eigenschaften und Mächtigkeiten der schwarzen Krusten zerstörungsfrei zu quantifizieren [23].

Insgesamt wurden 71 Profile vermessen, wobei versucht wurde, möglichst viele unterschiedliche Schadensbilder mehrmals zu erfassen. Für die meisten Profile konnten mittlere Rayleighwellengeschwindigkeiten bestimmt werden. Nur im Fall sehr starker Auflösungserscheinungen war die direkte Rayleighwelle nicht mehr eindeutig erkennbar. Allerdings spiegeln auch in diesem Fall die Wellenformen den stark gestörten Zustand des Steins wider.

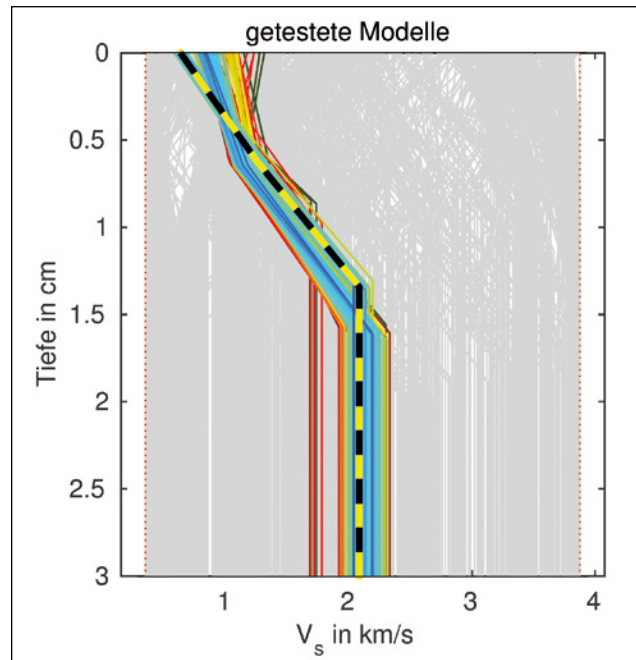


Abb. 10 Tiefenprofil der Scherwellengeschwindigkeit für die Messung an der Wade der Skulptur „Nike krönt den Sieger“. Alle getesteten Modelle sind dargestellt. Grau: nicht zutreffende Modelle. Rot bis blau: Modelle, die die Daten zunehmend besser erklären. Optimales Modell: schwarz-gelb gestrichelt



Abb. 11 Porta Nigra, Trier.

Zusätzlich konnten für 50 Profile die P-Wellengeschwindigkeiten ermittelt werden. Abbildung 12 zeigt eine Übersicht der mittleren P- und Rayleighwellengeschwindigkeiten. Die P-Wellengeschwindigkeiten schwanken zwischen ca. 1 km/s und 3 km/s, wobei P-Wellengeschwindigkeiten um 2,5 km/s am häufigsten gemessen wurden. Auch die Rayleighwellengeschwindigkeiten variieren stark und weisen auf sehr unterschiedliche Schadensbilder hin. Die mittleren Rayleighwellengeschwindigkeiten liegen bei weitgehend intaktem Sandstein um ca. 1,5 km/s und können in absandenden Bereichen um bis zu 50 % reduziert und durch Krusten oft leicht und in Ausnahmefällen um bis zu 50 % erhöht sein (Abb. 12).

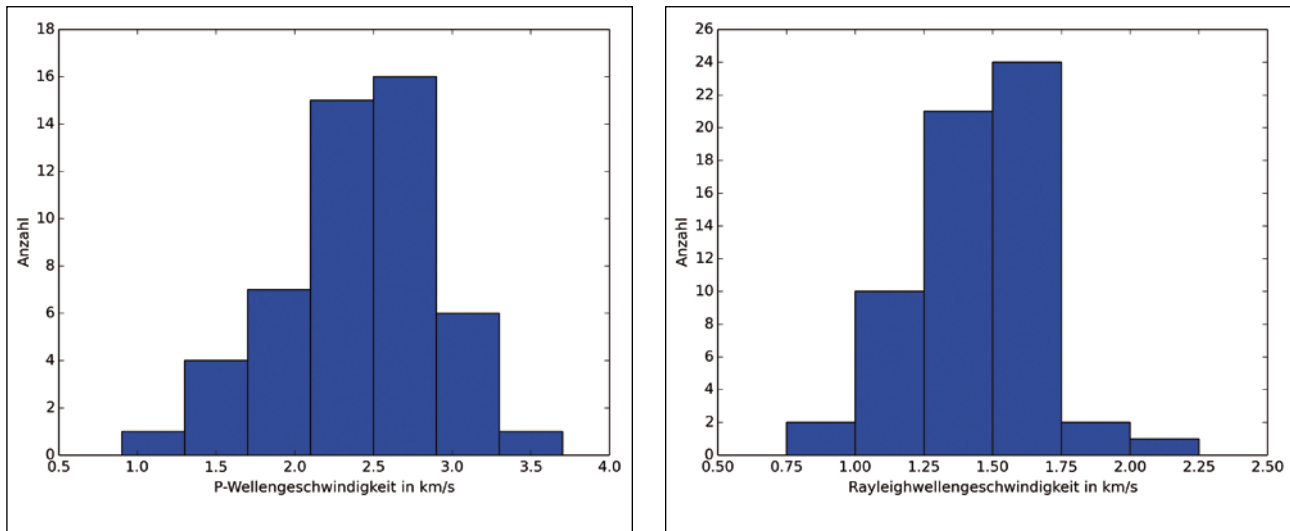


Abb. 12 Histogramme der gemessenen mittleren P-Wellengeschwindigkeiten (links) und Rayleighwellengeschwindigkeiten (rechts)

Weiterhin wurde die Dispersion der Rayleighgrundmode betrachtet, um Hinweise auf Veränderungen der Festigkeit mit der Tiefe zu erhalten [23]. Die Abbildungen 13, 14 und 15 zeigen Ergebnisse für Profile auf Musterflächen, die im Bereich typischer Schadensbilder angelegt wurden [22]. In Abbildung 13 sind die mittleren Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle im Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 200 kHz für Profile mit schwarzen Krusten dargestellt. Mit steigender Frequenz nimmt die Gruppengeschwindigkeit zu und zeigt damit ein anormal dispersives Verhalten. Dies weist darauf hin, dass die Scherwellengeschwindigkeit und damit die Festigkeit an der Oberfläche höher sind als in größeren Tiefen. Die Zunahme der Geschwindigkeit im Bereich der schwarzen Krusten wird durch eine teilweise Füllung des Porenraums mit Gips hervorgerufen. In Abbildung 14 werden die mittleren Dispersionskurven für Bereiche mit Gipskrusten gezeigt, bei denen eine fast vollständige Füllung des Porenraums mit Gips vorliegt. Die Zunahme der Gruppengeschwindigkeit mit der Frequenz ist infolgedessen noch stärker ausgeprägt als in Abbildung 13 und kann bis zu 20 % betragen. Dagegen zeigen die Dispersionskurven in Bereichen mit absandender Oberfläche keinen Anstieg mit der Frequenz bzw. die Gruppengeschwindigkeit kann mit der Frequenz sogar abnehmen (Abb. 15). Durch die mittleren Dispersionskurven der Rayleighwelle werden also das Vorhandensein und die Eigenschaften der Kruste angezeigt.

Weiter können mittels Wellenforminversion Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeit berechnet werden. Abbildung 16 zeigt die Inversionsergebnisse für den Fall der oberflächennahen Auflockerung und für den Fall einer schwarzen Kruste. Die oberflächennahe Auflockerung spiegelt sich in einem gradu-

ellen Anstieg der Scherwellengeschwindigkeit bis in ca. 2 cm Tiefe wider (Abb. 16 links). Dagegen weist das Tiefenprofil für die schwarze Kruste ein komplexeres Verhalten auf. An der Oberfläche liegen leicht erhöhte Geschwindigkeiten vor, die bis in ca. 0,5 cm abnehmen und dann wieder zunehmen. Dies deutet auf eine Schädigung des Steingefüges unter der schwarzen Kruste hin. Die blau gekennzeichneten Modelle weisen auf die vorhandenen Unsicherheiten in der Bestimmung der genauen Werte der Scherwellengeschwindigkeit hin, ohne allerdings die skizzierte Interpretation in Frage zu stellen.

In den meisten Fällen beschreiben die eindimensionalen Modelle aufgrund lateraler Homogenität entlang des Profils die wesentlichen Eigenschaften der Wellenformen sehr gut. Durch das berechnete eindimensionale Modell werden die mittleren Eigenschaften entlang des Profils wiedergegeben. Allerdings gibt es Fälle, in denen ein Profil Bereiche mit unterschiedlichen Schadensbildern überdeckt. Dann wird die Verwitterung durch ein eindimensionales Tiefenprofil nur unzureichend beschrieben und die gemessene Wellenform muss nach einem zweidimensionalen Modell der Scherwellengeschwindigkeit invertiert werden [24].

Abbildung 17 zeigt das Ergebnis einer zweidimensionalen Inversion für ein Profil an einem Pfeiler der Porta Nigra. An einer Ecke des Gebäudes treten turbulente Luftströmungen auf, welche zu einer typischen Abfolge von oberflächennahen Veränderungen im Windschatten führen: direkt an der Ecke kommt es zur Ausbildung einer dünnen schwarzen Kruste, deren Mächtigkeit mit zunehmendem Abstand von der Kante abnimmt. Dieser Zone folgt ein heller Bereich, mit absandender Oberfläche und eine dritte Zone mit einer relativ dicken schwarzen Gipskruste. In Zone 4

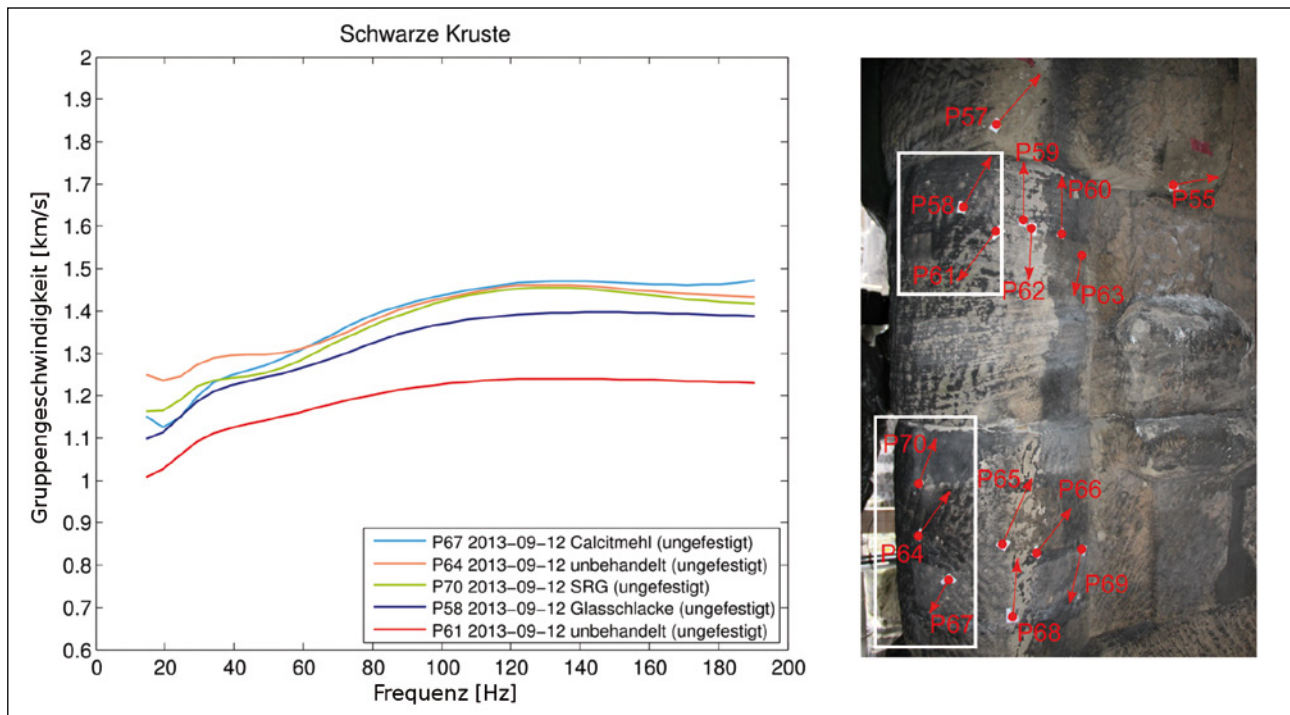


Abb. 13 Beispiele für mittlere Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle als Funktion der Frequenz für Profile im Bereich von schwarzen Krusten (links). Die Lage der Profile wird auf dem Foto rechts durch die weißen Kästen angezeigt. Die Gruppengeschwindigkeiten nehmen mit der Frequenz zu.

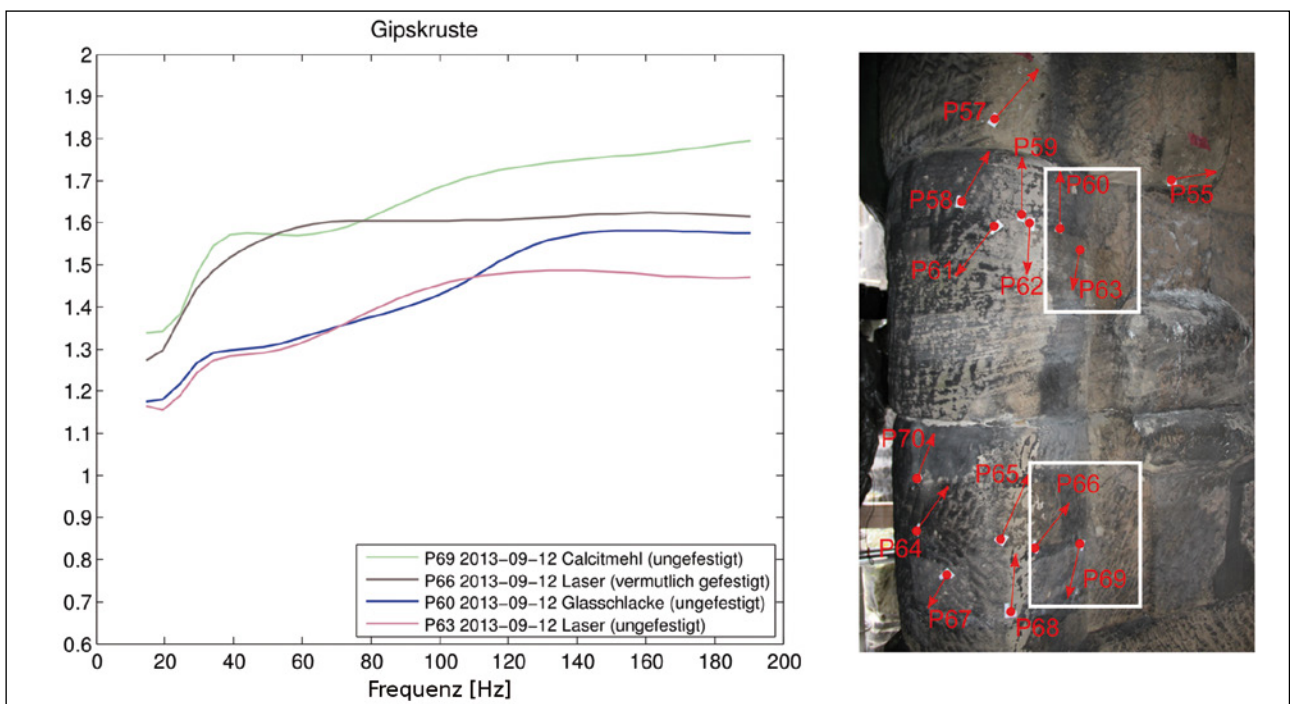


Abb. 14 Beispiele für mittlere Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle als Funktion der Frequenz für Profile im Bereich von Gipskrusten (links). Die Lage der Profile wird auf dem Foto rechts durch die weißen Kästen angezeigt. Die Gruppengeschwindigkeiten nehmen mit der Frequenz stark zu.

liegt ein heller, intakter Bereich vor, der nur wenig durch Verwitterung beeinflusst ist.

Das berechnete zweidimensionale Modell der Scherwellengeschwindigkeit korreliert sehr gut mit den unterschiedlichen Verwitterungsbereichen. Die Zonen 1 und 3 lassen sich durch eine Anreicherung

von Gips auf und unter der Oberfläche charakterisieren. Dies führt zu einer Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit auf ca. 1,7 km/s bis 1,8 km/s im oberflächennahen Bereich bis in eine Tiefe von maximal 2 cm. In Zone 2 mit deutlich niedrigeren Scherwellengeschwindigkeiten um 1,1 km/s treten häufige

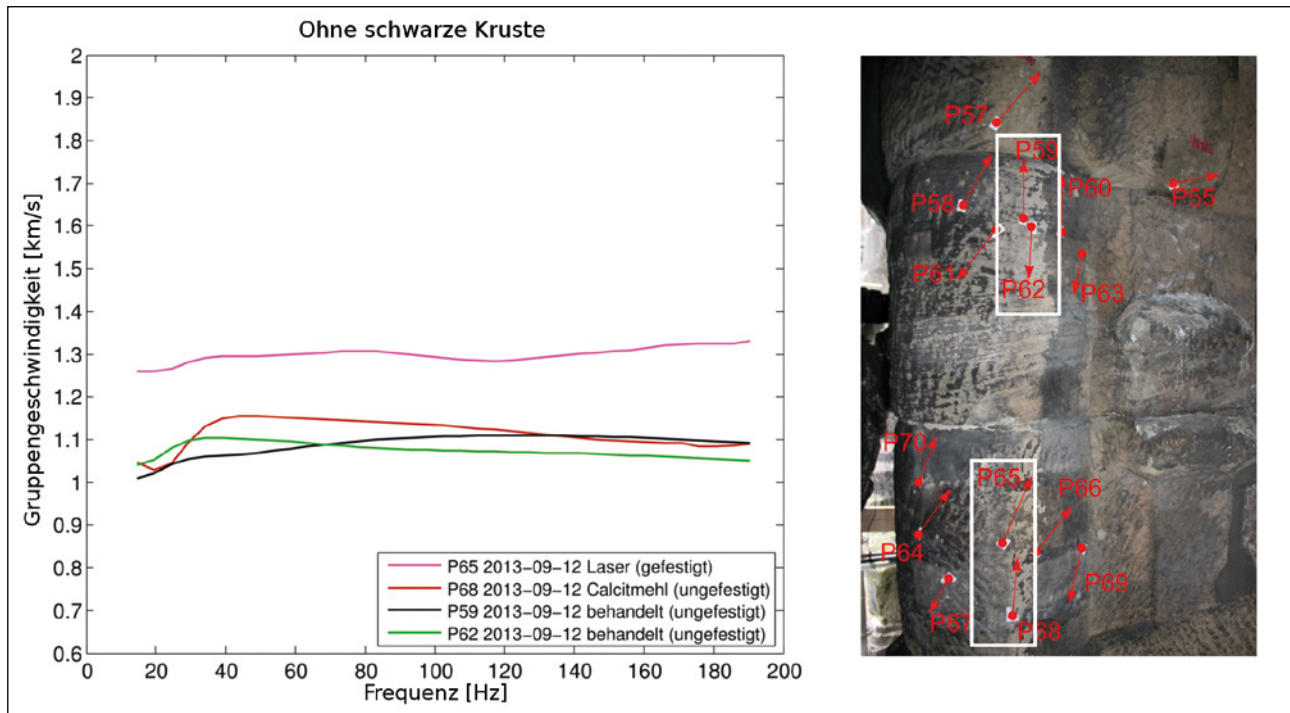


Abb. 15 Beispiele für mittlere Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle als Funktion der Frequenz für Profile im Bereich ohne Krusten (links). Die Lage der Profile wird auf dem Foto rechts durch die weißen Kästen angezeigt. Die Gruppengeschwindigkeiten zeigen keine Zunahme mit der Frequenz bzw. nehmen mit der Frequenz ab.

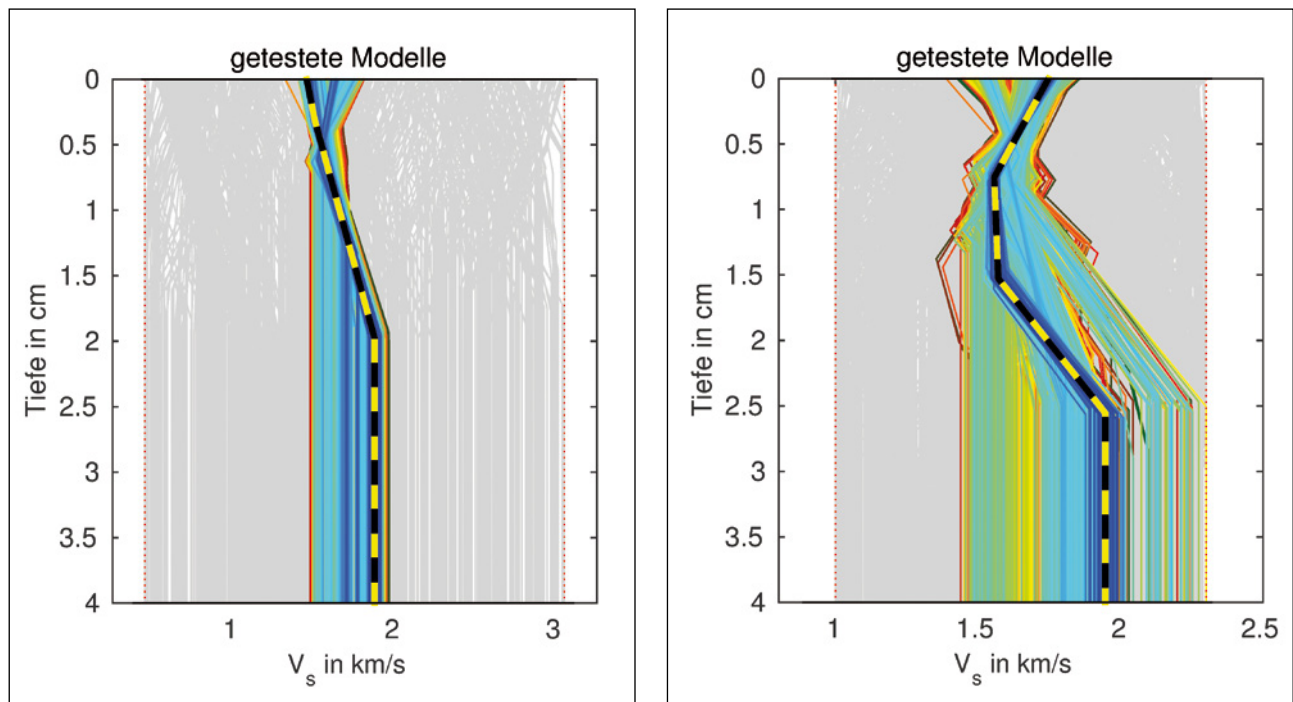


Abb. 16 Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeit für ein Profil mit oberflächennaher Auflockerung (links) und mit schwarzer Kruste (rechts). Alle getesteten Modelle sind dargestellt. Grau: nicht zutreffende Modelle. Rot bis blau: Modelle, welche die Daten zunehmend besser erklären. Optimales Modell: schwarz-gelb gestrichelt

Änderungen der Feuchtigkeit in Kombination mit der Kristallisation und Lösung von Gips auf, was zu einer deutlich zurückgewitterten Oberfläche führt. In Zone 4 ist keine Veränderung des Startmodells nötig, um die Wellenformen zu erklären. Die Scherwellengeschwindigkeit beträgt in dieser Zone ca. 1,5 km/s.

An der Porta Nigra wurden auch die Reproduzierbarkeit der Ultraschall-Oberflächen-Messungen und der Einfluss der Wassersättigung auf die Rayleighwellengeschwindigkeit untersucht [23]. Mehrere Profile wurden nach einem halben Jahr erneut vermessen. Die Unterschiede in den gemessenen

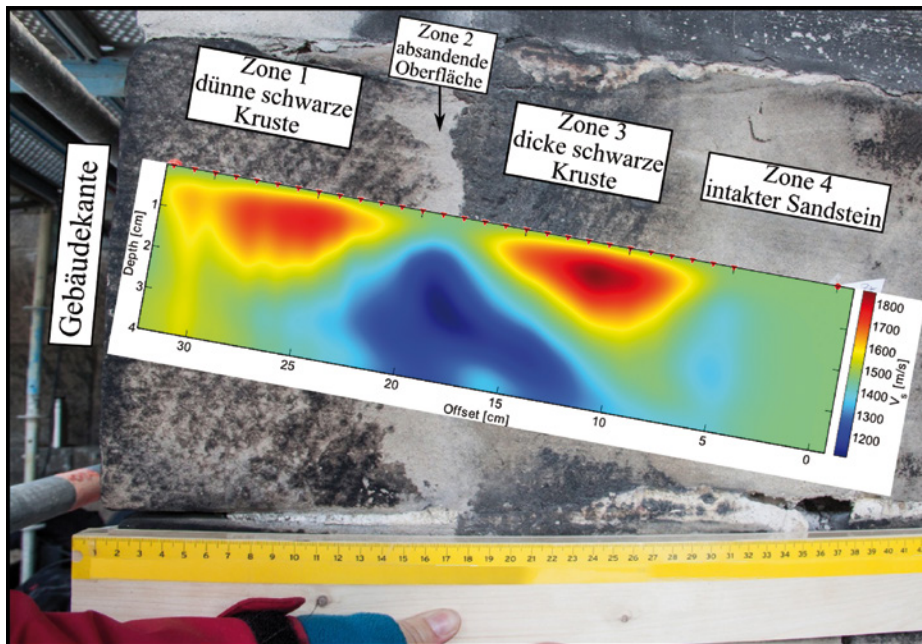


Abb. 17

Ergebnis der zweidimensionalen Wellenforminversion: Vergleich des zweidimensionalen Modells der Scherwellengeschwindigkeit mit einem Foto der verwitterten Oberfläche an der Porta Nigra im Bereich des Profils. Der rote Punkt markiert die Position des Ultraschallgebers, die roten Dreiecke die der Empfänger.

Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighwelle sind kleiner als 4 %, was sehr viel geringer ist als die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Schadensbildern, so dass die Reproduzierbarkeit der Messungen gegeben ist. Ein Grund für die Unterschiede zwischen den Wiederholungsmessungen ist der Einfluss der Wassersättigung. Auf zwei Profilen wurde die Wassersättigung künstlich erhöht und in regelmäßigen Abständen wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Das Ergebnis ist, dass eine intensive Wassersättigung einen signifikanten Einfluss auf die Rayleighwelle hat: Die Dämpfung steigt stark an und die Gruppengeschwindigkeit der Rayleighwelle kann um bis zu 20 % sinken. Teilweise ist die Verringerung der Geschwindigkeit durch die mit der Erhöhung der Dämpfung verbundene Dispersion bedingt. Wird sichergestellt, dass der untersuchte Naturstein nur eine geringe Wassersättigung aufweist, ist der Einfluss der Wassersättigung auf die Rayleighwellengeschwindigkeit wesentlich geringer als der Einfluss durch ausgeprägte Verwitterung. Um an verschiedenen Lokationen gemessene Rayleighwellengeschwindigkeiten quantitativ vergleichen zu können, sollte die Wassersättigung ähnlich sein.

Es konnte auch ein Vergleich mit Messungen des Bohrhärtewiderstandes durchgeführt werden [23]. Es zeigt sich, dass die Gruppengeschwindigkeit der Rayleighwelle mit dem Bohrhärtewiderstand weitgehend linear korreliert. Vorteile der Ultraschall-Oberflächen-Messungen sind, dass sie zerstörungsfrei und keine Punktmessungen sind. Ihre Auflösung ist insbesondere in den oberen ca. 2 cm sehr gut.

5 Zusammenfassung

Ultraschall-Oberflächen-Messungen sind geeignet für die zerstörungsfreie, quantitative Untersuchung der Verwitterung von Naturstein insbesondere im Fall von annähernd flachen Oberflächen. Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass das Untersuchungsobjekt nur von einer Seite zugänglich sein muss. Die Genauigkeit der Messung ist sehr hoch, da die bei Transmissionsmessungen oft schwierigen Entfernungsmessungen entfallen, wenn mit einer entsprechenden Messvorrichtung gearbeitet wird. Neben der P-Welle kann die Rayleighwelle untersucht werden, deren frequenzabhängige Geschwindigkeit (Dispersion) Hinweise auf Veränderungen des Natursteins mit der Tiefe ermöglicht. Die einfach zu bestimmende mittlere Rayleighwellengeschwindigkeit korreliert grob mit der P-Wellengeschwindigkeit; die Rayleighwelle kann jedoch im Fall von Ultraschall-Oberflächen-Messungen aufgrund des besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses genauer ausgewertet werden. Weiterhin können Inversionen der Wellenform nach ein- oder zweidimensionalen Modellen der Scherwellengeschwindigkeit im Naturstein durchgeführt werden, um die Tiefenabhängigkeit der Verwitterung in den oberen ca. 3 cm zu quantifizieren. Dabei muss der Qualitätsfaktor Q_μ als Maß für die Dämpfung von Scher- und Rayleighwellen berücksichtigt werden. Die Messungen haben sich als reproduzierbar erwiesen, allerdings muss auf eine vergleichbare Wassersättigung geachtet werden. Untersuchungen der Verwitterung mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen sollten in Form von vergleichenden Messungen durchgeführt

werden, indem unterschiedliche Lokationen verglichen werden oder indem die Frequenzabhängigkeit der Rayleighwelle untersucht wird, um Einflüsse durch variable Zusammensetzung zu minimieren.

In Laborexperimenten konnte gezeigt werden, dass seismische Geschwindigkeiten in Naturstein durch thermische Bewitterung signifikant verändert werden. Sie ändern sich im Allgemeinen nichtlinear mit andauernder Bewitterung: Bei Carraramarmor sinken die seismischen Geschwindigkeiten zunächst sehr stark, später nur noch moderat. Die Änderungen reichen mehrere Zentimeter tief in den Stein. Bei Sandsteinen ändern sich die seismischen Geschwindigkeiten erst nach langanhaltender hygrothermischer Bewitterung. Die Änderungen sind eher auf den oberflächennahen Bereich begrenzt und können räumlich sehr variabel sein. Bei Tuff entstehen durch lang anhaltende hygrothermische Bewitterung Risse; die Änderungen der seismischen Geschwindigkeiten sind geringer als beim Carraramarmor, reichen aber ebenfalls mehrere Zentimeter tief.

Die durchgeführten Ultraschall-Oberflächen-Messungen zeigen, dass sie geeignet sind, in-situ die Verwitterung sowohl von Marmor als auch von Sandstein zu untersuchen. Die oberflächlichen Veränderungen des Natursteins durch Verwitterung sind auch an einem Objekt in der Regel sehr variabel. Die beobachteten Verringerungen der Rayleighwellengeschwindigkeit durch Verwitterung betrugen bei Carraramarmor bis ca. 70 % bei Sandstein bis ca. 50 %. Sowohl bei Carraramarmor als auch bei Sandstein konnte das Vorhandensein von Krusten detektiert werden. Sie sind mit einer Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit in den obersten Millimetern und oft mit einer Verringerung der Geschwindigkeit darunter verbunden. Nach der Behandlung im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen konnten signifikante Erhöhungen der seismischen Geschwindigkeit nachgewiesen werden.

Dank

Vielen Dank an Boris Wächter und Thomas Hiess für die künstliche Bewitterung der Natursteinproben. Wir danken Dr. Dorsemagen (Stiftung Preussische Gärten und Schlösser Berlin-Brandenburg) für die Erlaubnis, Messungen an der Neptungrotte im Park Sanssouci durchzuführen. Dem Landesbetrieb Liegenschafts- und Baubetreuung Trier danken wir für die organisatorische Unterstützung bei der Durchführung der Messungen an der Porta Nigra.

Wir danken weiter L. Beckel, R. Behrendt, S. Christen, L. Goerik, H. Heinisch, K. Jepsen, C. Milde, P.-B. Riedel, M. Tesch und M. Wenk für Unterstützung bei den Messungen.

Die Untersuchungen an künstlich bewitterten Proben wurden im Rahmen des Geotechnologien Programms durch BMBF und DFG gefördert (Vorhaben TOAST, Förderkennzeichen 03G0752G). Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt sei für die Förderung der Arbeiten an der Porta Nigra (AZ 31010-45) gedankt.

Literatur

- [1] Wendler, E., Sattler, L. (1996): Die Bohrwiderstandsmessung als zerstörungsarmes Prüfverfahren. In: Wittmann, F.H.; Gerdes, A. (Hrsg.): Werkstoffwissenschaften und Bausanierung; AEDIFICATIO Publishers, Freiburg; Band 1, S. 145–160
- [2] Pfefferkorn, S. (2005): Beurteilung von Verwitterungserscheinungen an Natursteinoberflächen mit dem Bohrwiderstands-Messverfahren. In: Siegesmund, S., Auras, M., Snethlage, R. (Hrsg.): Stein/Zerfall und Konservierung. Edition Leipzig, S. 155–159
- [3] Köhler, W. (1991): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland, Steinschäden – Steinkonservierung 2, Hannover, S. 50–53
- [4] Ruedrich, J., Knell, C., Enseleit, J., Rieffel, Y., Siegesmund, S. (2013): Stability assessment of marble statues of the Schlossbrücke (Berlin, Germany) based on rock strength measurements and ultrasonic wave velocities. *Environ Earth Sci* 69/4: 1451–1469
- [5] Ahmad, A., Pamplona, M., Simon, S. (2009): Ultrasonic testing for the investigation and characterization of stone – a non-destructive and transportable tool. *Reviews in Conservation* 10: 43–53
- [6] Siedel, H., Siegesmund, S., Sterflinger, K. (2011): Characterisation of Stone Deterioration on Buildings. In: Siegesmund, S., Snethlage, R. (eds.): *Stone in Architecture*. Springer, Berlin, 347–410
- [7] DIN EN 13687-2 (2002): Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren; Bestimmung der

- Temperaturwechselverträglichkeit – Teil 2: Gewitterregenbeanspruchung (Temperaturschock)
- [8] DIN EN 12371 (2010): Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Frostwiderstandes
- [9] Grimm, W.-D. (1990): Bildatlas der Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Lipp Verlag München, Arbeitsheft 50: 255 pp.
- [10] INSK (o. J.): Internationale Natursteinkartei. Ebner Verlag, Ulm
- [11] Simon, S. (2001): Zur Verwitterung und Konservierung kristallinen Marmors. Dissertation, Ludwig Maximilians-Universität München, 256 S.
- [12] Meier, T., Dietrich, K., Stöckhert, B., Harjes, H.-P. (2004): One-dimensional models of shear-wave velocity for the eastern Mediterranean obtained from the inversion of Rayleigh wave phase velocities and tectonic implications, *Geophys. J. Int.*, 156, 45–58
- [13] Steinkraus, T. (2016): Untersuchung der Verwitterung von Natursteinen mittels Inversion von Ultraschallwellenformen. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Geowissenschaften, Masterarbeit
- [14] Meier, T., Auras, M., Erkul, E., Fehr, M., Jepsen, K., Milde, C., Schulte-Kortnack, D., Spangenberg, E., Steinkraus, T., Wilken, D. (2014): Physikalische Untersuchungen an der Porta Nigra – Ultraschall-Oberflächen-Messungen und thermische Untersuchungen, IFS-Bericht Nr. 47, Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz, S. 50–62
- [15] Köhler, W. (1998): Untersuchungsbericht für Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg: Neptungrotte Potsdam Sanssouci, Carrara Marmor, Ultraschalluntersuchungen. 8 Seiten + Anlagen
- [16] Sobott, R. (2002): Ultraschallmessungen an Marmor-Werkstücken an der Neptungrotte im Park Sanssouci, Potsdam. Bericht No. 89/2002 für Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, 9 + XXI Seiten
- [17] Sobott, R. (2014): Ultraschallmessungen an Marmor-Werkstücken an der Neptungrotte im Park Sanssouci, Potsdam. Bericht No. 28/2014 für Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, 16 + XX Seiten
- [18] Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ullemeyer, K., Weiß, T., Sobott, R. (1997): Die Anwendung der geologischen Gefügekunde für die Charakterisierung natürlicher Werksteine Fallbeispiel: Kauffunger (Schlesischer) Marmor. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* 3. Jg., S. 269–292.
- [19] Ettl, H., Sobott, R. (1999): Ultraschallmessungen an in-situ konservierten Marmorreliefs des Siegestors in München. *Zeitschrift f. Kunsttechnologie u. Konservierung*, 13/1, S. 92–102
- [20] Fleischer, G. (2002): Beurteilung von Ultraschallmessungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. Dissertation, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 182 Seiten
- [21] Sobott, R. (2008): Untersuchungen an den Figurengruppen No. 3 und 4 auf der Südseite der Berliner Schlossbrücke hinsichtlich des Festigkeitszustandes und früherer Konservierungen. Bericht No. 3/2008 für Fa. Steinrestaurierung Bauer-Bornemann, Bamberg. 29 + XXX Seiten
- [22] Auras, M. (2014): Charakterisierung von schwarzen Krusten und anderen Oberflächenveränderungen der Sandsteine der Porta Nigra in Trier. IFS-Bericht Nr. 47, Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz, S. 15–28
- [23] Meier, T., Auras, M., Erkul, E., Fehr, M., Jepsen, K., Milde, C., Schulte-Kortnack, D., Spangenberg, E., Steinkraus, T., Wilken, D. (2014): Physikalische Untersuchungen an der Porta Nigra – Ultraschall-Oberflächen-Messungen und thermische Untersuchungen, IFS-Bericht Nr. 47, Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz, S. 50–62
- [24] Köhn, D., Meier, T., Fehr, M., De Nil, D., Auras, M. (2016): Application of 2D elastic Rayleigh waveform inversion to ultrasonic laboratory and field data, submitted

Abbildungen

Titelfoto: M. Auras

Abb. 5: R. Sobott

Abb. 8, 13, 14, 15, 17: D. Schulte-Kortnack

Abb. 11: M. Auras

Die Steinrestaurierung am Hauptportal der Stiftsbasilika St. Martin in Landshut

von Markus Huschenbeth, Susann Halbeisen und Philipp Schubert



Die Pfarr- und Stiftskirche St. Martin und Kastulus in Landshut zählt zu den bedeutendsten Monumentalbauwerken der Gotik in Süddeutschland. Die Konservierung und Restaurierung des reich verzierten Westportals stellte hohe Anforderungen an den Umgang mit verschiedenen Materialien und Schäden. Auf Grundlage naturwissenschaftlicher Untersuchungen sowie einer weitreichenden Entwicklung und Erprobung von Restaurierungsmaterialien konnten nachhaltige Lösungen für den Erhalt der historischen Substanz gefunden werden.



Abb. 1 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorzustand



Abb. 2 Landshut St. Martin, Hauptportal, Erprobung der Materialeigenschaften

Die Pfarr- und Stiftskirche St. Martin und Kastulus in Landshut, erbaut zwischen 1385–1500, zählt zu den bedeutendsten Monumentalbauwerken der Gotik in Süddeutschland. Mit einer Höhe von 131 m besitzt sie sowohl den höchsten Kirchturm Bayerns als auch den höchsten Backsteinturm der Welt. Am Fuß des Turms befindet sich das Westportal der Hallenkirche. Es ist das Größte von fünf reich verzierten, farbig gefassten Portalen, welche die Kirche im Außenbereich schmücken. Der Baubeginn des Turms ist auf 1445/46 datiert. Das Westportal wurde 1452 fertig gestellt.

1 Konservierung und Restaurierung des Portals

Der Vorzustand

Das Westportal (Abb. 1) wurde ursprünglich aus Mittenwalder Sandstein erbaut. Dieser ist heute noch in Teilbereichen von Fialen und Kriechkrabben, in Teilen des Blattwerkfrieses sowie in Bereichen von Rippen und Kielbogen vorzufinden. Im Zuge früherer Restaurierungsmaßnahmen wurde der bauzeitliche Stein partiell durch Regensburger Grünsandstein ersetzt. In späteren Restaurierungsphasen folgte die Verwendung eines quarzitisches Sandsteins als Austauschgestein für die Kreuzblume und die Krabben sowie partiell im Bereich des Blattwerkfrieses. Kelheimer Kalkstein kam im Bereich des stark profilierten Gewändes zum Einsatz. Aus Muschelkalk wurde die Balustrade neu errichtet. Weiterhin findet man Nagelfluh und Adneter Rotmarmor im Sockelbereich. Die Pfeiler unter den Fialen bestehen im oberen Bereich aus Ziegelmauerwerk. Im 19. Jahrhundert wurden die beiden Fialen im oberen Bereich durch Kunststein ersetzt.

Desweiteren entstanden in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts zahlreiche Ergänzungen und Überformungen mit zementgebundenen Massen. Diese teils armierten Steinerergänzungen waren besonders in den bewitterten Bereichen stark geschädigt. Der Kielbogen zeigte sich mit einer kunstharzgebundenen Schlämme überzogen. Auf der Oberfläche des Blattwerkes, den Hinterschnidungen und Rücklagen hatte sich eine dunkle Kruste gebildet.

An den verschiedenen Steinvarietäten ließen sich nach der Reinigung, der Abnahme von Schlämmen und dem Rückarbeiten von Alterergänzungen unterschiedliche Verwitterungszustände und Schadensbilder feststellen. Besonders beim Mittenwalder und Regensburger Grünsandstein waren absandende und abschuppende Bereiche sowie Risse, Schalen und Ausbrüche zu beobachten. Im Bereich der Rah-

mung des Blattwerkfrieses und der Blattstiele sowie im Scheitelpunkt des Gewändes wurden lose und absturzgefährdete Steinteile und Ergänzungen vorgefunden. Im Verlauf vergangener Restaurierungs- und Instandsetzungsmaßnahmen brachte man verschiedene Fugenmörtel ein, die sich zuletzt in Form brüchiger und entfestigter Kalkmörtel beziehungsweise harter und farblich unpassender Zementmörtel präsentierte.

Denkmalpflegerische Zielstellung und Herangehensweise

Als Zielstellung der durchzuführenden konservatorischen und restauratorischen Maßnahmen galt der vollumfängliche Erhalt des originalen Bestandes, selbst kleinere Substanzverluste waren zu vermeiden. Die Bestandssicherung erforderte einen individuellen Umgang mit den vielgestaltig vorgefundenen Materialien und Schäden. Auf Grundlage naturwissenschaftlicher Untersuchungen sowie einer weitreichenden Entwicklung und Erprobung von Restaurierungsmaterialien konnten nachhaltige Lösungen für den Erhalt der historischen Substanz erarbeitet werden.

Die gesamte Maßnahme erfolgte in enger Zusammenarbeit mit allen Beteiligten. Dadurch konnte Fachwissen gebündelt und Prozesse optimiert werden. Außerdem war es möglich, die Erwartungen und Wünsche des Nutzers sowie der Denkmalpflege zu berücksichtigen.

Es fanden in regelmäßigen Abständen Projektbesprechungen mit der Fachbauleitung Restaurierungsplanung Frau Dipl.-Rest. Sybille Woodford, dem Architekturbüro Rieger, dem Planungsbüro Fischer, dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, vertreten durch Frau Dipl.-Rest. Judith Schekulin, sowie dem Statiker Herrn Dipl.-Ing. Georg Klapprott statt. Weiterhin erfolgte eine enge Abstimmung mit der Pfarrgemeinde St. Martin in Landshut und dem Auftraggeber, dem Erzbischöflichen Ordinariat München, vertreten durch Herrn Dr. Hans Rohrmann.

Während der gesamten Maßnahme wurden die ausführenden Firmen stark in Überlegungen und Entscheidungsprozesse eingebunden. Die Farbfassung erfolgte durch die Firma Neubauer, die Partikelstrahl- und Laserreinigung durch die Firma Bauer-Bornemann und die Steinrestaurierung durch die Firma Denkmalpflege Mühlhausen.

Auf Grundlage von naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurde ein fundiertes Restaurierungskonzept erstellt. Die verschiedenen Konservierungs- und Restaurierungsmaterialien wie Steinerfüllungs- und Rissinjektionsmörtel, Steinfestigungsmittel und Schlämmen wurden im Fachlabor für Konservierungs-

fragen in der Denkmalpflege Dr. Eberhard Wendler in München ausgewählt und hinsichtlich ihrer mechanisch-physikalischen Eigenschaften an das jeweilige Bestandsmaterial angepasst. Diese Vorgehensweise erfolgte auch in Bezug auf die Auswahl der Austauschgesteine.

Zur Erprobung von Materialien, zur Ausführung verschiedener Tests und dem Anlegen von Musterflächen fand eine „Testwoche“ mit allen Fachbeteiligten statt. Die Eigenschaften und die Verarbeitbarkeit der Mörtel und Schlämmen sollte überprüft werden (Abb. 2). Weiterhin wurde die Pigmentierung der Mörtel eingestellt. Die Begutachtung und Bewertung von Musterflächen diente als Grundlage der zu erbringenden Restaurierungsergebnisse.

Überblick der durchgeführten Maßnahmen

Die Bestandskonservierung wurde zum Schutz von Malschicht- und Steinsubstanz mit einer Vorfestigung eingeleitet. Anschließend erfolgten Reinigungsarbeiten im Niederdruckpulverstrahl- sowie Heißdampfverfahren. Gipskrusten erforderten die Anwendung von Ionenaustauscherkompressen, partiell kam zum Ausdünnen von schwarzen Krustenaufträgen ebenso ein Laserreinigungsgerät zum Einsatz. Rissbereiche und abgelöste Schalen wurden hinterfüllt und geschlossen, lockere Bruchstücke und Steinelemente vernadelt und geklebt. Im weiteren Verlauf wurden Formergänzungen und Kittungen sowie Steinaustausch- und Vierungsarbeiten ausgeführt. Im unteren Bereich des Kielbogens musste ein Teilbereich im gesamten Querschnitt ersetzt werden.

Sicherung und Vorfestigung von Malschichten

Unter der teilweise pudern aufliegenden Silikatfarbschicht erhielten sich, etwa im Bereich der Konsolköpfe und der Blattkapitelle im Gewändebereich, Teile einer historischen, ölgebundenen Farbgebung. Diese wurden jedoch im Zuge einer früheren Restaurierung in ihrem in Schollen aufstehenden Zustand überfasst. Um einen Verlust der wertvollen Fragmente während der nachfolgenden Freilegung (Abnahme der Silikatsichtfassung durch Niederdruckpulverstrahlverfahren) zu vermeiden, erfolgte vorab deren Wiederankleben durch ein Hinterspritzen der abgelösten Partien mittels modifizierter Methylcellulose (Klucel E) (Abb. 3).

Strukturelle Gesteinsfestigung und Sicherung von Altergänzungen

Die strukturelle Festigung diente der Konsolidierung von abschuppenden, sandenden oder bindemittelarmen Gesteinspartien, von zu erhaltenden Altergän-



Abb. 3 Landshut St. Martin, Hauptportal, Sicherung und Konsolidierung von Malschichten



Abb. 4 Landshut St. Martin, Hauptportal, Kleben und Armieren Bearbeitungsstand



Abb. 5 Landshut St. Martin, Hauptportal, Kleben, Armieren und Ergänzen Endzustand



Abb. 6 Landshut St. Martin, Hauptportal, Abnahme nicht bauzeitlicher Mörtel



Abb. 7 Landshut St. Martin, Hauptportal, Abnahme Altergänzung Blattstiel

zungen sowie als Untergrundvorbereitung für den Antrag von Schlämmen, Steinkittungen und -ergänzungen. Sie erfolgte im Flutungsverfahren mittels einer Laborspritzflasche. Zur Anwendung kam ein lösemittelfreier Kieselsäureethylester ohne Hydrophobierung mit einer Gelabscheidungsrate von 30 %, der in mehreren Zyklen bis zum Erreichen der Sättigung aufgetragen wurde.

Kleben loser Gesteinspartien und gerissener Steinteile

Gelockerte und absturzgefährdete Bauteile wurden zunächst fachgerecht abgenommen und zwischengelagert, um sie abschließend in ihrer Originalposition wiedereinzubringen und punktuell mit Epoxidharz zu verkleben. Im Vorfeld der Klebung mussten Lockermaterial und Mürbezonen strukturell gefestigt werden. Wo notwendig, wurden zusätzlich Edelstahldübel (V4A) mit einem Durchmesser von 3 bis 12 mm eingebracht (Abb. 4, 5). Zur Sicherstellung des kraftschlüssigen Verbundes zwischen Bauteil und Untergrund erfolgte nach der Klebung eine Hinterfüllung von verbliebenen Hohlräumen (Hinterfüllmörtel, Bindemittel Syton, Fachlabor Dr. Wendler).

Abnahme von Altergänzungen und Schlämmen

Im Bereich des äußeren, stark der Witterung ausgesetzten Kielbogens sowie im Bereich der Blattstiele wurde entschieden, nicht bauzeitliche Schlämmen, Fugenmörtel und Ergänzungen vollständig zu entfernen (Abb. 6, 7). In den übrigen Bereichen wurden lediglich die hohl liegenden Altergänzungen abgenommen, die sich durch eine zuvor ausgeführte Metalldetektion zusätzlich als armierungslos erwiesen. Nach der behutsamen, manuellen Abnahme mit schmalen Bildhauereisen zeigte sich die freigelegte Steinsubstanz durch Risse, Bruchstellen und Rückwitterungen sowie Absanden und Schalenbildungen stark fragmentiert.

Die aufliegende Mörtelschlämme ließ sich in Teilbereichen mittels Lösungsmittel (Isopropanol) anlösen und anschließend manuell mit Spateln entfernen. Im unteren Bereich des Kielbogens zeigte sich jedoch eine zementgebundene, sehr harte bzw. dichte Schlämme, welche mittels oszillierender Druckluftwerkzeuge zurückgearbeitet werden musste.

Laserreinigung und Umwandlung von Gipskrusten

In einigen Abschnitten zeigten sich, entweder direkt auf der Steinoberfläche oder auf den Farbfassungen, dunkle Gipskrusten. Neben der optischen Beeinflussung des Gesamtbildes verursachen diese meist sehr harten und dichten Krusten Gefügeschädigungen im Kontaktbereich zum Stein bzw. zur Malschicht.

Um eine Reduzierung der Gipskruste (Calciumsulfat) zu erreichen, entschied man sich im Bereich der Krabben für die Anwendung eines Ionenaustauscherharzes (Abb. 8). Hierbei wurde angestrebt, durch eine mit OH-Ionen belegte, wässrige Kompressen gelöste Sulfationen mit den besagten OH-Gruppen zu substituieren. Dabei wird das krustenbildende Calciumsulfat zu Calciumhydroxid umgewandelt, welches anschließend feucht von der Oberfläche abgenommen werden kann.

Am Blattwerkfries erfolgte zuvor der Einsatz eines Laserreinigungsgerätes (Abb. 9, 10). Der Reinigungsvorgang geschieht hierbei durch die genau gesteuerte Einwirkung kurzer, hochenergetischer Laserimpulse auf die Salzkruste, wobei deren Oberfläche durch Umwandlung der Photo- in Wärmeenergie schlagartig verdampft und somit abgetragen wird.

Hinterfüllen von Gesteinsschalen, Hohlstellen und Rissen

Zur Sicherung der schalenartig abgelösten und hohl liegenden Partien sowie der verschiedenen ausgeprägten Rissbereiche erfolgte eine Injektion mit einem an die jeweilige Steinvarietät angepassten Hinter-



Abb. 8 Landshut St. Martin, Hauptportal, Umwandlung der Gipskrusten am Blattwerkfries



Abb. 9 Landshut St. Martin, Hauptportal, Ausführung der Laserreinigung



Abb. 10 Landshut St. Martin, Hauptportal, Ergebnis der Laserreinigung



Abb. 11 Landshut St. Martin, Hauptportal, Rissinjektion Kunststein



Abb. 12 Landshut St. Martin, Hauptportal, Rissinjektion Mittenwalder Sandstein



Abb. 13 Landshut St. Martin, Hauptportal, Rissinjektion Eselsrücken

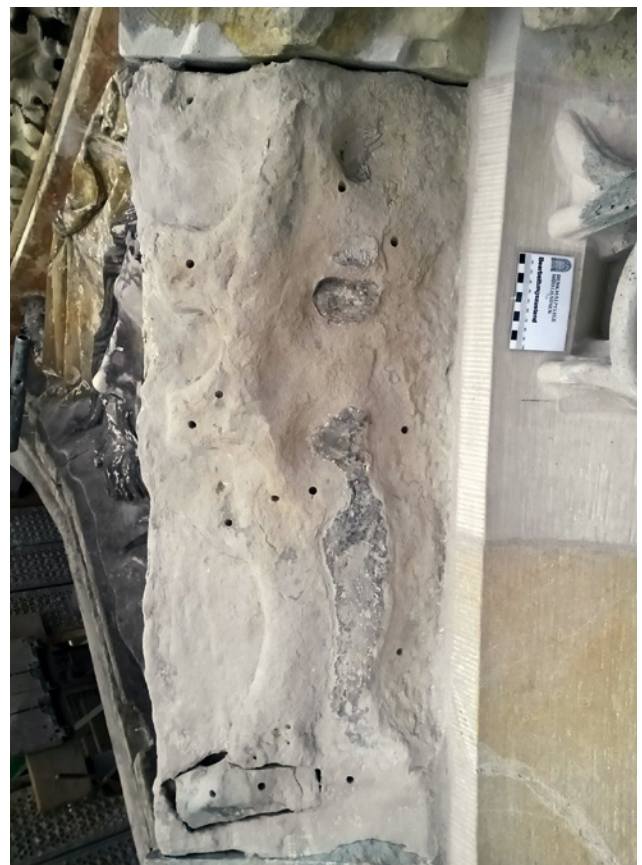


Abb. 14 Landshut St. Martin, Hauptportal, Formenverlust Blattstiel



Abb. 15 Landshut St. Martin, Hauptportal, Formfindung und Formergänzung Blattstiel



Abb. 16 Landshut St. Martin, Hauptportal, profilierte Formergänzungen Mittenwalder Sandstein



Abb. 17 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorzustand „Äffchen“

füllmörtel (Abb. 11). Hierzu wurden zunächst die aufstehenden Flanken, offenen Schalenränder und Risse entweder mit einem reversiblen Material oder mit Anböschmassen abgedichtet. Anschließend wurde das Injektionsgut mit Hilfe kleiner Injektionsbohrungen (Durchmesser 3–4 mm) drucklos eingespritzt (Abb. 12, 13).

Formergänzungen und Anböschungen

Formergänzungen und Anböschungen an geschädigten Steinoberflächen werden grundsätzlich aus funktionellen oder optischen Gründen notwendig, etwa für eine Optimierung des Wasserablaufs oder zur Harmonisierung der Oberflächen.

Dem folgend, kamen Formergänzungen an Profilkanten, im Bereich von Steinflanken sowie im Bereich anderer Fehlstellen zur Ausführung. Besonders an den Blattstielen der Kriechkrabben zeigten sich nach dem Rückarbeiten der Altergänzungen weitreichende Formenverluste (Abb. 14). Der nur äußerst fragmentarisch überkommene Zustand verlangte an dieser Stelle einen Prozess der Formfindung, um ein harmonisches, dem Originalbestand angepasstes Gesamtbild zu erzielen (Abb. 15).

Die zahlreichen profilierten (Abb. 16), unprofilier-ten und bildhauerischen (Abb. 17, 18, 19) Formergänzungen am Mittenwalder und Regensburger Grün-sandstein wurden mit speziell angepassten Mörteln auf Bindemittelbasis Syton ausgeführt. Der Auftrag erfolgte in Schichten von 1–2 cm, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme von Armierungen. Die Oberflächen-struktur erfuhr abschließend eine optische Anpassung an das umliegende Originalgestein (Abb. 20, 21).

Im Bereich der Kunst-, Kalk- und quarzitischen Sandsteine sowie der Ziegel arbeitete man mit kon-ventionellen Steinerfüllmassen, die auf Grund ihrer Eignung in Farbigkeit, Korngröße und physika-lisch-mechanischen Eigenschaften ausgewählt wur-den (Abb. 22, 23).

Vierungen und Neuteile

Für das Herstellen von Vierungen und Neuteilen wur-den die geschädigten Abschnitte zunächst vorsichtig zurückgearbeitet. Um den Substanzverlust so gering wie möglich zu halten, beschränkte man sich in den betroffenen Bereichen auf das kleinstmögliche Maß. Es entstanden filigran hergestellte, exakt auf die Schadstelle begrenzte Vierungen (Abb. 24).



Abb. 18 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand Formergänzung „Äffchen“



Abb. 19 Landshut St. Martin, Hauptportal, Detail Formergänzung „Äffchen“



Abb. 20 Landshut St. Martin, Hauptportal, Formergänzung Fiale am Baldachin



Abb. 21 Landshut St. Martin, Hauptportal, Detail Formergänzung Fiale am Baldachin



Abb. 22 Landshut St. Martin, Hauptportal, Formergänzungen Kunststein



Abb. 23 Landshut St. Martin, Hauptportal, Formergänzungen quarzitischer Sandstein



Abb. 24 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vierungen Mittenwalder Sandstein



Abb. 25 Landshut St. Martin, Hauptportal, Schablonenherstellung



Abb. 26 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorarbeiten der Neuteile in der Werkstatt

Neuteile wurden in der Werkstatt, nach vor Ort angefertigten Schablonen im Maßstab 1 : 1, hergestellt (Abb. 25, 26). Als geeignetes Ersatzmaterial wählte man Warthauer Sandstein, dessen physikalisch-mechanische Eigenschaften mit denen des Mittenwalder Sandsteins übereinstimmen. Auch hinsichtlich Korngröße und Farbigkeit passt sich das Austauschgestein gut in den Bestand ein (Abb. 27, 28).

Zum Versetzen wurden am Objekt Aufzugtechnik und angemessene Schwerlastgurte genutzt (Abb. 29). Nach dem Einbau erfolgte die Anpassung der Profile und Übergänge zum angrenzenden Bestand. Für den

Steinaustausch am Kielbogen war zu dessen statischer Sicherung eine speziell entwickelte Abstützkonstruktion erforderlich (Abb. 30).

Verfugarbeiten

Der schadhafte Fugenbestand, das heißt alle losen und defekten Fugen sowie Zementfugen aus vorangegangenen Instandsetzungsmaßnahmen, wurde mit geeigneten Steinmetzwerkzeugen zurückgearbeitet bzw. ausgeräumt. Bauzeitliche Fugen mit ausreichender Festigkeit blieben hingegen erhalten.



Abb. 27 Landshut St. Martin, Hauptportal, Neuteil Lisenenanläufer



Abb. 28 Landshut St. Martin, Hauptportal, Neuteil Blattstiel



Abb. 29 Landshut St. Martin, Hauptportal, Versetzen der Neuteile



Abb. 30 Landshut St. Martin, Hauptportal, Abstützkonstruktion am Kielbogen

Zur Ermittlung eines Fugenmörtels, der sich optisch am besten in das Gesamtbild mit den verschiedenen Gesteinsarten einfügt, wurden zunächst Musterflächen mit verschiedenen zuvor im Labor geprüften Materialien ausgeführt.

Die Entscheidung fiel auf einen trasskalkgebundenen Fugenmörtel. Dieser wurde mittels Lanzetten

und Fugeisen erdfeucht und etwas über Niveau in die Fugen eingebracht, verdichtet und nach Beginn des Abbindeprozesses nachgekratzt (Abb. 31, 32). Stark ausgehöhlte Abschnitte erforderten vorab eine Tiefenverfugung mit Haarkalkmörtel (Abb. 33).

Im Bereich des Ziegelmauerwerks wurde dem Mörtel ein Zuschlag von 15 % Donaukies, Korngröße



Abb. 31 Landshut St. Martin, Hauptportal, Verfugen



Abb. 32 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand Neuverfugung



Abb. 33 Landshut St. Martin, Hauptportal,
Tiefenverfugung mit Haarkalkmörtel



Abb. 34 Landshut St. Martin, Hauptportal, Verfugen Ziegel-MW

0–4 mm zugegeben, um das Bestandsmaterial zu imitieren (Abb. 34).

Im Bereich der Kreuzblume entschied man sich auf Grund der starken Beanspruchung zur Ausführung einer Bleifuge. Dabei wird das Blei zu Zöpfen geformt und in die Fuge eingestemmt, es entsteht eine oberflächenbündige, glatte Fuge (Abb. 35).

Restaurierung des „Adneter Rotmarmors“

Die beiden im Sockelbereich der Vorhalle verbauten Platten aus „Adneter Rotmarmor“ erfuhren zunächst eine Reinigung. Anschließend wurden sämtliche Altergänzungen manuell mit schmalen Bildhauereisen entfernt (Abb. 36). Zum Verschluss der Risse und Fehlstellen kam eine acrylatgebundene Ergän-

zungsmasse in verschiedenen Farbtönen zur Anwendung, wodurch sich im Ergebnis eine geschlossene Oberfläche mit mattem Glanz ergab. Die Struktur und der historische Charakter des originalen Plattenbestands blieben erhalten. Auf eine Nachbehandlung mit Wachsen, Ölen oder sonstigen Poliermitteln wurde verzichtet (Abb. 37).



Abb. 35 Landshut St. Martin, Hauptportal, Bleiverfugung an der Kreuzblume



Abb. 36 Landshut St. Martin, Hauptportal, Entfernen Altergänzungen „Adneter Rotmarmor“

2 Konservierung und Restaurierung des Reliefs „Schweißtuch der Hl. Veronika“

Vorzustand und denkmalpflegerische Zielstellung

Das Relief der „Heiligen Veronika mit dem Schweißtuch“ befindet sich im Tympanonfeld oberhalb des Westportals. Es zeigt zentral den (plastisch gearbeiteten) Christuskopfabdruck auf dem Schweißtuch, welches von einer darüber angeordneten, deutlich kleiner dimensionierten Veronikafigur gehalten wird. Links und rechts des Christuskopfes befinden sich zwei Engelsfiguren, wobei nur deren Köpfe und jeweils eine ihrer Hände, die das Tuch zusätzlich in die Breite straffen, sichtbar sind.

Das witterungsbedingt erheblich geschädigte Bildwerk aus Mittenwalder Sandstein wies vor der konservatorischen und restauratorischen Bearbeitung zwischen 2012 und 2014 komplexe Schadensbilder auf, wie hohe Salzbelastungen, aktives Absanden, Rissbildungen, aufliegende Gipskrusten und Malschichtablösungen (Abb. 38, 39). Hieraus resultierten notwendige Maßnahmen, die höchste Anforderungen an die Ausführenden stellten. Vorgesehen waren eine Salz-minderung, das Reduzieren der krustigen Auflagen,



Abb. 37 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand „Adneter Rotmarmor“-Platte

das Konsolidieren entfestigter Gesteinszonen und abgelöster Malschichten sowie das Schließen bzw. die Ergänzung von Fehlstellen im Stein. Die Konzeption und Auswahl geeigneter Materialien erfolgte über Probe-reihen und Musterflächen in enger Zusammenar-beit mit dem Fachlabor, Herrn Dr. Wendler, München.



Abb. 38 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorzustand Engel



Abb. 39 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorzustand Christus



Abb. 40 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand Engel

Steinkonservierung und Steinrestaurierung

Zur strukturellen Konsolidierung der mürben Ge- steinspartien erfolgte ein mehrmaliger Eintrag eines Steinfestigers auf Kieselsäureethylesterbasis (KSE). Gesteinsschalenränder sowie feine Risse und Fugen wurden mit einem feindispersen, flüssigen Injektions- mörtel auf KSE-Basis an- bzw. unterfüllt, die ange- trocknete Masse gegebenenfalls abschließend an den Oberflächen modelliert. Um schadensfördernde Witterungseinflüsse auf die offenliegenden Partien zu verhindern, schloss man größere Fehlstellen, etwa Rissflanken oder Materialausbrüche, flach mit einer wiederum KSE-basierten Steinersatzmasse. Vollplas- tisch ausgeführte Ergänzungen, vor allem in Verlust- bereichen des Rahmens sowie den Faltenwürfen von Gewand und Schweißstuch, dienten dazu, gestörte Formenverläufe wiederherzustellen (Abb. 40, 41).

Der am Objekt nachweislichen Belastung mit bauschädlichem Calciumsulfat (Gips) und Magne- siumsulfat trat man mit der Anwendung von Ionenaus- tauscherkompressen entgegen. Die massive Gips- krustenbildung an der Oberfläche konnte nach einer mehrmaligen Durchführung der Maßnahme wirksam reduziert werden (Abb. 42, 43, 44). Das leicht lösliche



Abb. 41 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand Christus



Abb. 42 Landshut St. Martin, Hauptportal, Vorzustand Engel Gipskruste



Abb. 43 Landshut St. Martin, Hauptportal, Bearbeitungszustand Engel Ionenaustauscher



Abb. 44 Landshut St. Martin, Hauptportal, Ergebnis der Umwandlung

und damit äußerst schadenswirksame Magnesiumsulfat wurde hingegen in kaum lösliches Magnesiumphosphat umgewandelt. Mit der abschließenden Auflage von Neutralkompressen gelang die Reduzierung von weiteren, leicht löslichen Salzverbindungen aus dem Steingefüge (Abb. 45).

Eine partielle Neuverfugung am Rahmen und im Übergang zum Scheitelbogen des Portals schloss die restauratorischen Maßnahmen am Stein ab.



Abb. 45 Landshut St. Martin, Hauptportal, Kompressenaufgabe

Malschichtkonservierung

Besonderes konservatorisches Augenmerk galt den vollumfänglich zu erhaltenden Resten der verschiedenen Farbfassungsphasen des Reliefs. Als charakteristisches Schadensbild zeigten sich vom Untergrund abgelöste, aufstehende Malschichtschollen, zum Teil mit darunter anhaftenden Gesteinsanteilen (Abb. 46). Dieses Phänomen wurde offensichtlich durch die aufliegenden, starke Oberflächenspannung erzeugenden Gipskrusten hervorgerufen.

Das Wiederankleben dieser Partien gelang partiell durch die Applikation eines halbsynthetischen Zelluloseleims und anschließendes leichtes Andrücken an den Träger. Stark aufstehende Zonen mussten hingegen mit dem oben erwähnten Injektionsmörtel in situ stabilisiert werden. Als weiterer Malschichtschaden ließen sich durch Bindemittelabbau adhäsiv gestörte Farbfassungspartien feststellen. Diese wurden durch das Aufstreichen und Durchdringen der Malschicht mit dem oben genannten, halbsynthetischen Zelluloseleim gefestigt.

Die abschließende Neufassung der Reliefoberfläche erfolgte durch die Firma Neubauer, Restaurierungswerkstätten GmbH, Bad Endorf – so auch der Schlämmauftrag und die Farbfassung des Portals (Abb. 47, 48).



Abb. 46 Landshut St. Martin, Hauptportal, Malschichtschollen



Abb. 47 Landshut St. Martin, Hauptportal, Endzustand Westportal



Abb. 48 Farbfassung Hl. Veronika mit dem Schweißstuch
(Fa. Neubauer)

Abbildungen

Abb. 1–37, 47, 48: M. Huschenbeth

Abb. 38–46: F. Tottleben

Ein „Marienepitaph“ aus Ingolstadt, Voruntersuchung und Konservierung

von Ute Tuch



Das Epitaph in der Sebastianskirche mit einer minutiösen Darstellung von marianischen Symbolen wurde vor der notwendigen konservatorischen Behandlung gründlich restauratorisch untersucht. Es konnten diverse polychrome Teilfassungen mit zumeist goldfarbenen Metallapplikationen nachgewiesen werden. Die Reste der historischen Teilfassungen sind ein wesentlicher Bestandteil der ikonographischen und theologischen Aussage des Kunstwerks. Das erarbeitete Konservierungskonzept ermöglicht durch eine vorsichtige Reinigung des Objektes eine verbesserte Ablesbarkeit des Bildgegenstandes. Vorprojekt und Konservierung fanden 2014/2015 statt.

1 Einleitung

Das an der süd-östlichen Chorwand rechts vom Hochaltar montierte „Marienepitaph“ in der Sebastianskirche in Ingolstadt im Regierungsbezirk Oberbayern datiert in die Mitte des 16. Jahrhunderts. Die Sebastianskirche wurde im späten 15. Jahrhundert erbaut und liegt im Nord-Osten von Ingolstadt. Um die Kirche herum befindet sich ein Nebenfriedhof einer Pfarrkirche. Das wird als Ursache für die reiche Anzahl von historischen Epitaphien aus dem 16. Jahrhundert in dieser Kirche angenommen [1].

Die Kirche wird seit einigen Jahren durch die Rumänisch-Orthodoxe Gemeinde Ingolstadt genutzt. Die Epitaphien in der Sebastianskirche in Ingolstadt stehen in der künstlerischen Tradition der Kunstwerke der großen Ingolstädter Kirchen dieser Zeit wie dem Münster zur Schönen Unser Lieben Frau, St. Moritz

und der Franziskanerkirche [2]. Das repräsentativste der Epitaphien in der kleinen Sebastianskirche ist jenes der Familie Schranckh, das sogenannte Marienepitaph. Der historische Aufstellungsort des Marienepitaphs ist nicht überliefert. Die Montage aus diversen Werkstücken lässt eine Veränderung des ehemaligen historischen Aufstellungsortes jedoch wahrscheinlich erscheinen. Der Anlass für die konservierende Restaurierung ist der stellenweise desolante Erhaltungszustand des Epitaphs vor allem in der unteren Objektzone. Die Maßnahmen wurden in enger Abstimmung mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München beschlossen. Ziel der Maßnahme ist es neben den notwendigen Konservierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der historischen Fassungsreste ein auch optisch befriedigendes Gesamtergebnis zu ermöglichen.



Abb. 1 „Marienepitaph“, Vorzustand 2013



Abb. 2 Zentrales Mittelrelief, Vorzustand 2013

2 Voruntersuchung/Bestandserfassung

2.1 Beschreibung, Datierung und ikonographische Aspekte

2.1.1 Beschreibung

Maße ca.: Höhe 1,54 m, Breite 1,40 m

Das Marienepitaph besteht aus insgesamt sieben einzelnen Bauteilen (alle Reliefplatten wohl aus Solnhofener Kalkstein). Der zentrale Mittelteil wird von zwei Atlanten gerahmt. Die Atlanten stellen die Propheten Isaias mit dem Messer und Jeremias mit der Säge dar, die einen Architrav mit Giebeln tragen. Das Ober- teil besteht aus einer mit jeweils zwei Voluten nach oben hin begrenzten Schrifttafel, welche mit einem profilierten Gesims nach unten hin an das zentrale Mittelrelief grenzt. Rechts und links neben dem zentralen Mittelteil befindet sich jeweils ein nischenartig angelegtes Relieffeld mit den Stifterfiguren (Abb. 11). Unterhalb des zentralen Mittelreliefs ist eine ebenfalls in zwei Felder aufgeteilte Reliefplatte mit der Darstellung der Sippe der Stifter/bzw. Verstorbenen angebracht. Mittig zwischen den Figurengruppen befindet sich wieder ein Schriftfeld. Dieser untere Mittelteil wird jeweils seitlich von je zwei hochkant montierten Reliefplatten mit einem Volutenornament gerahmt. Es sind keine Signaturen am Objekt erkennbar.

2.1.2 Datierung und ikonographische Aspekte

Für den Mittelteil wird die Entstehungszeit auf etwa 1560 geschätzt, während der untere Teil mit den Darstellungen der Stifter auf etwas später, etwa um 1580 angesetzt wird. Die seitlich des Mittelreliefs montierten Stifterreliefs werden ebenfalls auf ca. 1580 datiert und könnten von Franz Zois stammen. Das Mittelteil wird einem Ingolstädter Bildhauer



Abb. 3 Aufsatz, Detail im Vorzustand 2013



Abb. 4 Aufsatz, Detail mit Reinigungsmuster



Abb. 5 Aufsatz und oberer Bereich von zentralem Mittelrelief, Vorzustand



Abb. 6 Aufsatz und oberer Bereich von zentralem Mittelrelief, nach der Reinigung



Abb. 7 Mittelrelief, Detail Vorzustand



Abb. 8 Mittelrelief, Detail mit Stern



Abb. 9 Mittelrelief, Detail mit 7-köpfigem Drachen



Abb. 10 Unteres Relief mit männlicher Sippe

zugeschrieben, der u. a. auch andere Werke dieser Zeit um 1560 geschaffen hat [3].

Inschriften mit Jahreszahlen sind innerhalb der Schriftfelder des Epitaphs vorhanden. Die Auswertung der Inschriften selbst (inhaltliche Aspekte) sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung [4].

Die Inschrift des Aufsatzes nennt den Ingolstädter Bürger und Melber Nicolaus Schranckh († 1556) und seine Ehefrau Rescherin († 1581). Als Verstorbene sind der Bäcker Martin Häß (ohne Datum), dessen erste Frau Anna Schranckhin († 1580) und seine zweite Frau Margret Mandelböckhin (ohne Datum) aufgeführt [5].

Zentrales Mittelrelief

Das Bildfeld seitlich der Darstellung Maria Immaculata ist mit zahlreichen marianischen Symbolen verziert. In Bild und Text werden Zusammenhänge u. a. aus dem Hohen Lied zum Marienlob gefügt. Hier einige Beispiele:

Die Sonne (oben links): ELECTAT. VT. SOL. („Erlesen wie die Sonne“, Hohes Lied 6,10), der Mond (oben rechts): PVLCHRA. VT. LVNA. („Schön wie der Mond“, Hohes Lied 6,10), Turm Davids: TVRRIS DAVID. (Hohes Lied 4, 4) und der versiegelte Brunnen (unten links): FONS SIGNATUS („Ein versiegelter Quell, Hohes Lied 4,12.) usw. [6].

2.2 Restaurierungsgeschichte

Es sind keine schriftlichen Quellen früherer Reinigungs- oder Konservierungsmaßnahmen bekannt. Das Kircheninnere mit seinen spätmittelalterlichen Wandmalereien wurde zuletzt Ende der 1980er Jahre restauriert [7]. Konkrete Maßnahmen aus dieser Zeit sind am Objekt selbst jedoch nicht erkennbar.

2.3 Erhaltungszustand sowie technologische Besonderheiten

2.3.1 Untersuchungsmethoden:

- In-situ-Untersuchung mit optischen Hilfsmitteln im Auflicht und Streiflicht mittels Stirnlupe und Digitalmikroskop
- Entnahme von Mikroproben (aus desolaten Bereichen, minimalste Probemengen)
- optische Untersuchungsmethoden im Mikroskop unter 100-facher und 200-facher Vergrößerung: im unpolarisierten, teilpolarisierten, polarisierten (POL) Modus, Dunkelfeld (DF) und UV-Fluoreszenz
- Trocken- und nasschemische Reinigungstests

Das Steinrelief weist lose aufliegende Stäube, Spinnweben und Verschmutzungen vor allem auf den waagrecht exponierten Zonen auf. Das Relief erscheint stellenweise stark verschwärzt (Abb. 3, 7). In der Kalksteinoberfläche sind einige Zonen mit gefährdeten Schalen und Schollen in kleineren oberflächennahen Bereichen, vor allem innerhalb der unteren drei Reliefplatten, vorhanden (Abb. 10). Es ist eine oberflächenparallele, z. T. mehrlagige Schalenbildung feststellbar. Die historische Oberfläche ist stellenweise, besonders auch in Bereichen mit figürlichen Darstellungen, sehr reduziert und bereits stellenweise verloren gegangen. Einige kleinere Risse sind vorhanden. Es sind auch Risse innerhalb des Fugenmaterials zwischen den einzelnen Segmenten erkennbar. Stellenweise sind offene und fehlende Fugen hier feststellbar. Diverse fehlende Kanten und kleinere Flankenabrisse sind vor allem am oberen Bausegment vorhanden. Das Marienepitaph weist historische polychrome Fassungsreste auf (Abb. 15–20, 25). Hier sind Adhäsions- und Kohäsionsverluste an den Fassungsresten partiell feststellbar. Es gibt deutliche Hinweise auf mindestens eine ältere Reinigung, die wohl als eine Art „antikisierende Teilreinigung“ ausgeführt wurde und damit auch mögliche ältere noch vorhandene Fassungsreste auf den Flächen reduziert hat und dies so zu diesem sehr unruhigen Gesamterscheinungsbild des Reliefs geführt hat [8].

Schadensbilder

Träger: Stein

- deutliche Oberflächenverschmutzung
- wenige Risse in der Oberfläche
- abgewitterte historische Oberflächen (Figurengruppen/Stiftergruppen) in der unteren Zone des Objektes
- wenige Schollen vor allem im unteren Bereich des Reliefs
- Ausbruchkanten von bereits herabgefallen Schalen und Schollen
- Ausbruchkanten/Stoßkanten von größeren Steinteilen (z. B. linke obere Ecke)
- Verlust der Oberflächen und bildhauerisch gestalteten Ausarbeitung einiger Gesichter (auch der Maria)
- desolate Fugen zwischen den in der Wand montierten Teilstücken des Reliefs

Fassung

- historische Fassungsreste weisen partiell hohl-liegende Randzonen auf
- Fassungsfehlstellen



Abb. 11 Seitliche Reliefplatte mit weiblicher Stifterfigur



Abb. 12 Mittelrelief, Immaculata, Vorzustand 2013



Abb. 13 Mittelrelief, Turm Davis, Vorzustand



Abb. 14 Mittelrelief, Turm Davids nach Reinigung

2.3.2 Restauratorische Bewertung des Erhaltungszustandes

Die einzelnen Elemente des Epitaphs weisen einen z. T. sehr unterschiedlichen strukturellen Erhaltungszustand auf. Während die unteren Zonen, vor allem diejenigen, die die Sippe der Verstorbenen zeigen, deutliche strukturelle Schäden aufweisen, die zu erheblichen Verlusten an historischer originaler bildhauerisch gestalteter Oberfläche (u. a. auch den Gesichtern) geführt haben, ist das mittlere Relief mit dem Hauptmotiv in seiner Oberflächengestaltung noch weitgehend gut erhalten (Abb. 2). Eine Ausnahme bildet hier das verlorengegangene Gesicht der Marienfigur (Abb. 12). Ursächlich dafür ist wohl das arttypische Verwitterungsverhalten des hier verwendeten Steinmaterials, des Solnhofner Plattenkalks, in Verbindung mit wohl zeitweise ungünstigen Klimaverhältnissen und einer starken Oberflächenverschmutzung zu nennen. Die angestrebte Konservierung kann die fortschreitende Verwitterung verlangsamen und die Bestandserhaltung auf der Zeitschiene verlängern.

2.4 Reinigungstests

Es werden zunächst im Vorfeld der Maßnahme kleinflächige Tests zur Ermittlung von geeigneten Reinigungsmethoden angelegt (Abb. 4). Sämtliche Fassungsbeefunde sollen dabei natürlich erhalten bleiben.

Nach Auswertung der Ergebnisse wird die Maßnahme mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege und Vertretern des Freundeskreises Sebastianskirche weiter abgestimmt.

Reinigungstest A:

- 1) Konsolidierung desolater Fassungsgränder mit Cellulosederivat
- 2) Trockenreinigung mit weichem Pinsel, Entfernung von Spinnweben (Staubsauger mit Vliesaufsatz)
- 3) Nasschemische Reinigung von sehr stark verdunkelten Oberflächen mittels Kompressen (Ammoniumcarbonat/Papiervlies bzw. Abrocel). Diese wird nicht in Bereichen mit historischen Fassungsresten angewendet.

Bewertung der durchgeführten Tests

Durch die nasschemische Reinigung konnten die verdunkelten Bereiche erfolgreich schonend gereinigt werden. Es handelt sich bei den Verdunklungen um Schmutz- bzw. Rußauflagerungen. Diese lassen sich ohne Beeinträchtigungen für die in situ verbleibenden Fassungsreste gut mit der oben genannten Methode reduzieren (Abb. 13–16). Die Fassungsreste selbst werden nicht nasschemisch behandelt.

2.5 Fassungsbeefund

Die „Sichtfassung“ kann als ein Konglomerat eines teilfreigelegten bzw. teilgereinigten Zustandes beschrieben werden.

Der heute überlieferte Zustand des Reliefs weist eine grau verschmutzt wirkende Oberfläche auf. Diese dunkle Oberfläche ist vor allem in den Vertiefungen des Reliefs, an den Rändern und um die Schriftfelder erhalten geblieben. Daher wirkt die Oberfläche stark fleckig und sehr unruhig (Abb. 3, 7, 12).

Im oberen Reliefaufsatz ist unter der sehr stark verdunkelten Schicht stellenweise eine hell ockerfarbene „Retusche“ der Flächen (Kalksteinimitationsfassung) nachweisbar. Diese „Retusche“ liegt wiederum auf einer verschmutzten ockergelben Oberfläche. Die oberste waagerechte Fuge weist ebenfalls hell ockerfarbene Fassungsreste auf. Andere Fugen sind mit dem weißen Wandfarbton der Kirche gestrichen. Die Fugen sind nicht original.

Interpretation:

Diese beige-ockergelbe „Retusche“ lässt sich nur innerhalb der oberen Reliefplatte des Aufsatzes nachweisen. Es ist zu vermuten, dass die „Retusche“ mit einer hell ockerfarbenen Kalksteinfassung zur optischen Egalisierung von stark, wohl vor allem auch durch Kerzenruß verschmutzten Bereichen, im oberen Teil des Reliefs eingesetzt wurde.

Im Bereich der mittleren Reliefplatte mit den Darstellungen der Mariensymboliken konnten polychrome historische Teilfassungen von Teilapplikationen zu einem kalksteinfarbenen Hintergrund (originale Steinoberfläche) nachgewiesen werden. Es handelt sich um Metallaufgaben, die zumeist goldfarben sind. Stellenweise konnten hier für einige exemplarische Teilbereiche mehrere Überfassungen, ebenfalls mit Metallaufgaben, ermittelt werden. Es konnten auf zwei optisch deutlich zu unterscheidenden Grundierungen für den Aufbau der zwei Fassungen auch zwei goldfarbene Metallaufgaben nachgewiesen werden (Abb. 21, 26).

Die Fassungen im Einzelnen:

- Phase 1: Erbauungszeitlich, wohl um 1560:
Fassung 1
Teilfassung mit Metallaufgaben besonderer Details, Schriftfarbe im Aufsatz schwarz
- Phase 2: Fassung 2:
Teilfassung mit Metallaufgaben besonderer Details
- Phase 3: Partielle „Retusche“-Schicht (hell ockerfarben) im Rahmen einer Reinigungsmaßnahme (nur am Aufsatz nachweisbar).



Abb. 15 Mittelrelief, Detail mit Mond, Vorzustand



Abb. 16 Mittelrelief, Detail mit Mond, nach Reinigung



Abb. 17 Mittelrelief, Mond Detail mit historischen Fassungsresten



Abb. 18 Seitliche Reliefplatte mit weiblicher Stifterfigur. Detail mit Resten einer goldfarbenen Metallapplikation



Abb. 19 Mittelrelief, Stern mit historischen goldfarbenen Fassungsresten

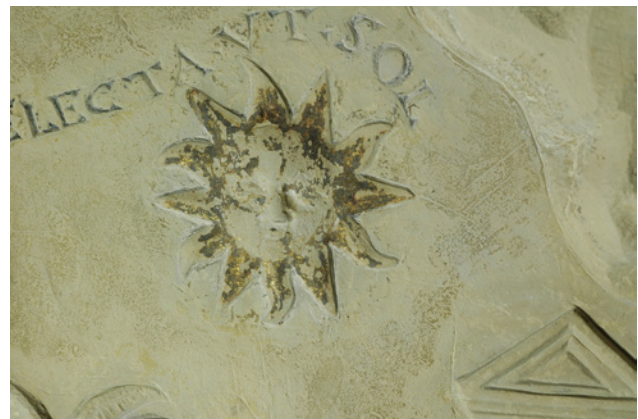


Abb. 20 Mittelrelief, Detail mit Sonne. Goldfarbene historische Fassungsreste sind erkennbar

Zahlreiche Metallaufgaben von Details der Darstellung sind z.B. Sonne, Mondsicheln, großer Stern, Nimbus der Taube, Sterne und Krone der Maria, Gewandkante Mariengewand, Knöpfe vom Spiegel, Kronen des siebenköpfigen Drachen und Kugel der Tempelspitze.

Ebenfalls Metallaufgaben befinden sich vermutlich noch auf der Gewandkante der Stifter und am Rosen-

kranz der Stifter (Abb. 18). Hier ist sogar von einer Polychromie der Kette auszugehen. Vermutlich waren die Perlen in einer andersfarbigen Metallaufgabe (silberfarben?) abgesetzt als z.B. die Quaste oder das Herz (goldfarben).

Die Fassungsfragmente sind bei den unteren drei Reliefplatten bereits sehr stark reduziert. Hier fehlt zumeist bereits die historische originale Steinober-

fläche. Fassungsreste in den Vertiefungen (Kragen, Hinterschneidungen etc.) sind nur noch inselhaft nachweisbar. In der keilförmig vertieften Schrift sind historische schwarze Fassungsreste, die als Pigmentierung Holzkohleschwarz aufweisen (Abb. 17), nachweisbar.

Interpretation:

Die Fassungsuntersuchung wird nur am Mittelteil des Marienepitaphs vorgenommen.

Bei den historisch ältesten Resten von einer Teilfassung mit goldfarbenen Metallapplikationen handelt es sich vermutlich um die erste farbliche Gestaltung des „Marienepitaphs“ im 16. Jahrhundert (vermutlich erbauungszeitlich um 1560)[9]. Über einem gelben Bolus (Eisenaluminiumsilikat) als pigmentierter Grundierung/Anlegeschrift ist eine Metallfolie (vermutl. Zwischgold [10]) aufgebracht (Abb. 21 ff.). Es handelt sich um eine Silberauflage, die längere Zeit exponiert gewesen sein muss. Die spätere Überarbeitung der

Teilfassung ist jünger. Hier wurde über einer vermutlich öl-/harzhaltigen, pigmentierten Grundierung/Anlegeschrift, mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Mischung, die u. a. Massikot (PbO) enthält, eine dünne goldfarbene Metallfolie (Goldfolie) aufgebracht. Diese zweite Anlegeschrift unterscheidet sich optisch sehr deutlich von der der Fassung 1. Die Fassung 2 ist mit dem derzeitigen Erkenntnisstand leider noch nicht datierbar. Die Überfassung scheint die Redaktion der ersten Farbgestaltung zu wiederholen.

3 Konservierungskonzept

Bedingt auch durch den bereits stark gealterten und z. T. ebenfalls partiell reduzierten Erhaltungszustand des Gesamtepitaphs ist eine Konservierung des strukturellen Bestandes angestrebt.

Neben den rein konservatorisch notwendigen Maßnahmen zur Substanzerhaltung wird zusätzlich eine optische Beruhigung der stark störenden ver-

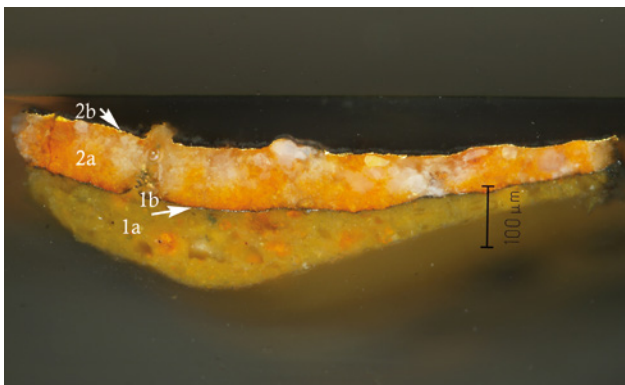


Abb. 21 Fassungsprobe P1/Querschliiff Sonne. Dunkelfeldaufnahme. Erstfassung: 1a Grundierung (gelber Bolus), 1b Metallauflage, Zweitfassung: 2a Grundierung, 2b Metallauflage goldfarben



Abb. 22 Fassungsprobe P1/Querschliiff Sonne. Aufnahme im unpolarisierten Licht. Erstfassung: 1a Grundierung, 1b Metallauflage (2-schichtig, Zwischgoldauflage? Mit goldfarbener Oberfläche), Zweitfassung: 2a Grundierung (Mixture), 2b Metallauflage goldfarben



Abb. 23 Fassungsprobe P1/Querschliiff Sonne. Erstfassung: 1a Grundierung: gelber Bolus, 1b Metallauflage, Zweitfassung: 2a Grundierung: Mixture (u. a. Massikot enthaltend), 2b Metallauflage goldfarben (Gold)

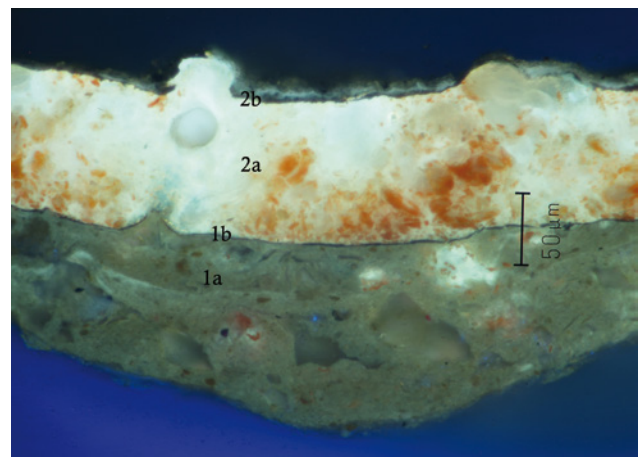


Abb. 24 Fassungsprobe P1/Querschliiff Sonne. Aufnahme in UV-Fluoreszenz. Erstfassung: 1a Grundierung, 1b Metallauflage, Zweitfassung: 2a Grundierung, 2b Metallauflage

dunkelten Auflagerungen und des damit verfälschten Erscheinungsbildes in Erwägung gezogen. Dies kann durch eine schonende Reinigung der verdunkelten Bereiche sowie eine sehr zurückhaltende partielle Retusche von stark störenden Fehlstellen zur optischen Beruhigung des Gesamterscheinungsbildes erreicht werden (Abb. 28, 29). Hierdurch kann eine bessere Ablesbarkeit des Bildmotivs erzielt werden. Das Konservierungs-/Restaurierungskonzept wird mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege abgestimmt. Vor Beginn der Maßnahme wird ein Probe-feld angelegt.

4 Konservierung/Restaurierung des Bestandes

Konservatorische Maßnahmen am Steinrelief

Ziel der Konservierung ist es, aufgrund des bereits stark gealterten und reduzierten Zustandes diesen



Abb. 25 Mittelrelief, Köpfe des 7-köpfigen Drachen während der Reinigung

am Kalksteinrelief ablesbar zu belassen. Die konservatorischen Maßnahmen sind Substanzfestigung sowie die Reduzierung der störenden dunklen Verschmutzungsauf lagerungen.

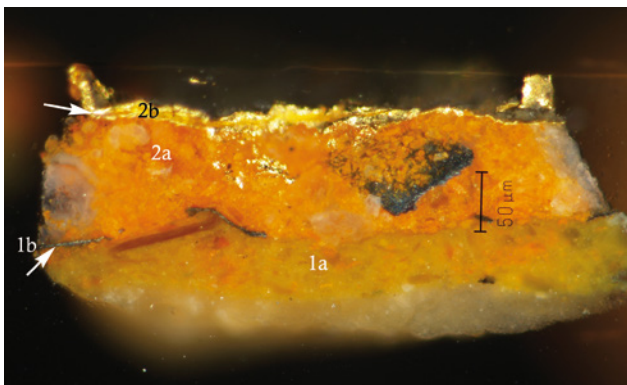


Abb. 26 Fassungsprobe P2/Querschliff Drachenkrönchen. Dunkel-feldaufnahme. Erstfassung: 1a Grundierung, 1b Metall-auflage (verdunkelte Fragmente), Zweitfassung: 2a Grundierung, 2b Metallauflage goldfarben

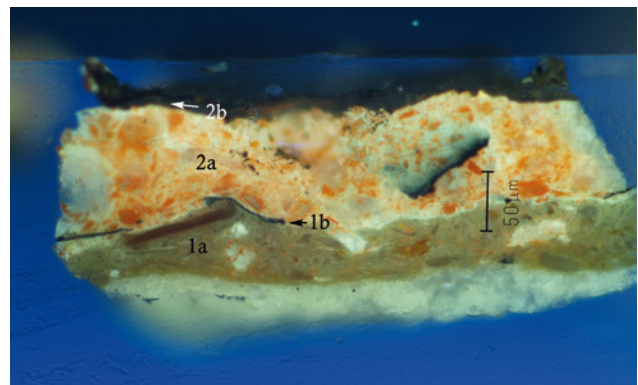


Abb. 27 Fassungsprobe P2/Querschliff Drachenkrönchen. Aufnahme in UV-Fluoreszenz. Erstfassung: 1a Grundierung, 1b Metallauflage (Fragmente), Zweitfassung: 2a Grundierung, 2b Metallauflage



Abb. 28 Mittelrelief, Detail mit Stern. Endzustand 2014



Abb. 29 Mittelrelief, Detail mit Immaculata. Endzustand 2014

Maßnahmen

- Konsolidierung desolater Fassungsränder appliziert mittels Tropfeninjektion (mit Cellulosederivat)
- Trockenreinigung mit weichem Pinsel, Entfernung von Spinnweben (Staubsauger mit Vliesaufsatz)
- Feuchtreinigung von leicht verschmutzten Flächen mittels Abrollen mit feuchten Watte pads (Aqua demi)
- Nasschemische Reinigung von sehr stark verdunkelten Oberflächen mittels Kompressen (Ammoniumcarbonat/Papiervlies bzw. Abrocel), wird nicht in Bereichen mit historischen Fassungsresten angewendet
- Nachreinigung mittels Abrollen mit Aqua demi
- Punktklebung von Schalen mit Epoxydharz-Injektion (Tropfeninjektion)
- Injektion von Schollen und Schalen sowie Hinterfüllung dieser mit kieselensäureestergebundenem Injektionsmörtel (KSE 500 STE + Füllstoff; variiert nach Schollenabstand bzw. Hohlraumgröße)
- Kittung von Schalen- und Schollenrändern sowie Randanböschungen zur Sicherung gefährdeter abstehender Randzonen; kieselensäureestergebunden
- partielle Retusche von inadäquaten Altkittungen sowie stark störender Bereiche; kieselensäureestergebunden (KSE 100 HV + Pigmente)
- Kittung von fehlender Fugen mit Kalk/Sand-Gemisch (1:3,5 RT)
- Retusche der neuen Fugenkittungen mit Kalk (freskal)
- partielle Retusche von stark störenden Bereichen
- Retusche von Fassungsfehlstellen und innerhalb der Fläche mit Trockenpigmenten, Benecel, Aqua demi

5 Zusammenfassung

Aufgrund der besonderen und sehr feinteiligen Darstellungen der einzelnen inhaltlichen Aspekte des Marienepitaphs ist eine bessere Ablesbarkeit des Bildgegenstandes unbedingt anzustreben. Durch die Reinigungsmaßnahmen, die zusätzlich zu den notwendigen rein konservatorischen Maßnahmen durchgeführt werden konnten, ist diese optimierte Ablesbarkeit ermöglicht worden. Neben der erfolgten Konservierung der Substanz unter Erhaltung sämtlicher relevanter historischer Fassungsreste konnte das Ergebnis durch eine Voruntersuchung untermauert werden. Ebenso konnte die Präsenz von Fassungs-

resten durch das restauratorische Vorprojekt bestätigt werden. Die Fassungsreste konnten wieder für den Betrachter erlebbar, das heißt sichtbar gemacht, werden. Der „verfälschende“ optische Gesamteindruck des Marienepitaphs durch eine historische nicht verstandene „Schmier-Schmutz“-Reinigung konnte durch die Voruntersuchung untermauert werden und im Folgenden auch rückgängig gemacht werden. Durch die Dokumentation der Untersuchungsergebnisse und der gewählten Konservierungsmethoden inkl. Materialien sind die Maßnahmen für die Zukunft nachvollziehbar.

Literatur und Anmerkungen


- [1] Sanierung der Sebastianskirche. Stadt Ingolstadt, Pressestelle, Ingolstadt, 1989
- [2] Ebenda
- [3] Ebenda
- [4] Götz, J. B.: Ingolstädter Grabsteine, 3. Teil, St. Sebastian und die kleineren Kirchen 1505–1813, in Sammelblatt des Historischen Vereins Ingolstadt, 46. Jahrg. (1927)
- [5] Sanierung der Sebastianskirche. Stadt Ingolstadt, Pressestelle, Ingolstadt, 1989
- [6] Ebenda
- [7] Freundeskreis Sebastianskirche Ingolstadt, Informationsbroschüre
- [8] Tuch, U.: Bericht zur Voruntersuchung „Marienepitaph“ 2013/2014
- [9] Im Dom zu Augsburg befindet sich in der Katharinenkapelle am Westflügel des Kreuzganges ein Kalksteinrelief mit marianischer Darstellung mit einer ganz ähnlichen historischen Teilfassung mit goldfarbenen Metallapplikationen. Zitat: „– In der Ostwand fünf Reliefs des Marienlebens, von ehem. Altarretabel, Solnhofner Stein, um 1564.“ (aus: Dehio, Bayern III, 1989)
- [10] Vermutlich handelt es sich um Zwischgold (also eine günstigere Sparvariante für eine goldfarbene Metallaufgabe). Es wurden hier in/auf der Silberfolie einige Goldpartikel im REM nachgewiesen (die nicht durch die technisch bedingte Bespatterung mit Goldstaub in Verbindung gebracht werden können...).

Abbildungen

Alle Abb.: Dipl.-Rest. Ute Tuch, Augsburg

Das Straßburger Münster und die Straßburger Münsterbauhütte (Fondation de l'Œuvre Notre-Dame)

von Sabine Bengel



Das Straßburger Münster ist eines der größten Sandsteinbauten Europas. Es wurde über den ottonischen Fundamenten des Vorgängerbaus zwischen dem 12. und 15. Jahrhundert errichtet. Seine Geschichte ist aufs engste mit der Stiftung Œuvre Notre-Dame verknüpft, die seit ihrer Gründung im frühen 13. Jahrhundert für den Bau und die Finanzierung der Kathedrale zuständig war und heute einen großen Teil der Sanierung und den baulichen Unterhalt bewältigt.

1 Das Straßburger Münster – Weltkulturerbe seit 1988

Die Kathedrale Notre-Dame de Strasbourg zählt zu den größten und bedeutendsten Sandsteinbauten der Welt (Abb. 1). Im Jahr 1988 ist der Bau zusammen mit der Straßburger Altstadt auf der Liste der Weltkulturerbestätten gesetzt worden. Schon 1862 hat der französische Staat die Kathedrale unter Denkmalschutz gestellt. Sie ist die Hauptkirche der 1988 zur Erzdiözese ernannten Diözese *Alsace*. Täglich werden zwischen zwei und vier Messen gefeiert und regelmäßig finden Orgel- und Chorkonzerte statt. Zugleich zieht das Münster jährlich ca. 4 Millionen Touristen und Kunstliebhaber an.

Der rote Sandsteinbau beeindruckt in erster Linie durch seine filigran wirkende Westfassade und die einzigartige Silhouette des noch im Mittelalter vollendeten Nordturmes. Der im 15. Jahrhundert begonnene Südturm blieb nach wenigen Steinlagen unvollendet, sein Weiterbau wurde niemals ernsthaft verfolgt. An den durch Strebpfeiler gegliederten dreijochigen Fassadenbau schließt sich eine kreuzförmige Basilika mit einem dreischiffigen, siebenjochigen Langhaus im hochgotischen Stil an. Der spätromanische Chor ist außen flach abgeschlossen und von doppelgeschossigen Kappellenbauten flankiert. Das Querhaus ist durch den erhöhten Chor, der sich bis ans Langhaus erstreckt, und unter dem sich die Krypta befindet, räumlich unterteilt. Alle Raumteile sind kreuzrippengewölbt.

2 Baugeschichte

Das Münster steht auf den Fundamenten des um 1015 begonnenen ottonischen Vorgängerbau, der die Länge und Breite der heutigen Kathedrale aufwies. Mit über 100 Metern Länge zählte er somit zu den größten Bauten des damaligen Heiligen Römischen Reiches Deutscher Nation. Ein im Jahr 2014 anlässlich der 1000-Jahr-Feier der Fundamentlegung des Münsters realisiertes hypothetisches Modell des ottonischen Baus – im Maßstab 1 : 100 aus Sandstein, Holz und Gips – gibt eine ungefähre Vorstellung des Gotteshauses (Abb. 2).

Über die Vorgängerbauten des Münsters ist nur wenig bekannt. Die karolingische Bischofskirche wird von der Forschung mit zwei Chören rekonstruiert, doch ist dies bislang mangels archäologischer Funde nicht bestätigt. Tatsache ist, dass der ottonische Bau im südöstlichen Teil des römischen Castrums liegt, in dem sich sehr wahrscheinlich die Behausungen der Tribüne (römische Generäle) befanden. So sind unterhalb des Münsters Überreste von römischen

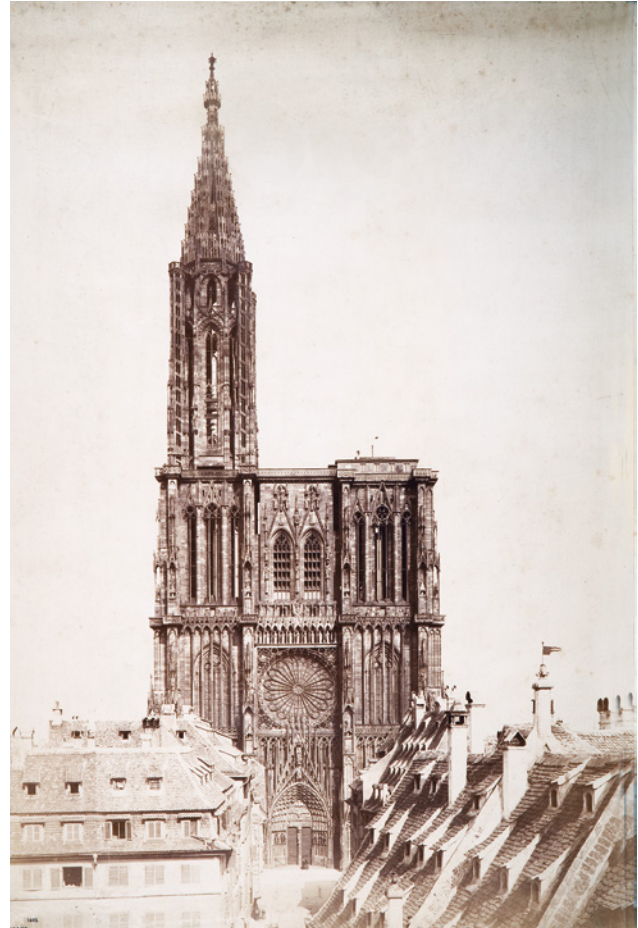


Abb. 1 Das Straßburger Münster, Ende 19. Jh.



Abb. 2 Modell des romanischen Münsters in der Werkstatt, 2014

Mauerzügen, einem Mosaik, Fresken und einer Hypokaustenheizung gefunden worden, die diese Vermutung unterstützen. Ein in das 4. Jh. n. Chr. datiertes Wasserbecken wurde jüngst als ein frühchristliches Taufbecken interpretiert.

Der um 1050 vollendete, ungewölbte und aus kleinteiligen Sandsteinquadern errichtete ottonische Bau wurde im 12. Jahrhundert von mehreren Bränden heimgesucht.



Abb. 3 Vierung und Chor des Straßburger Münsters



Abb. 4 Langhaus des Straßburger Münsters

Nach anfänglichen Reparaturarbeiten wurden die Ostteile ab 1176 in mehreren Etappen über dem alten Fundamenten neu errichtet. Dabei erfolgte sukzessive der Wechsel von dem bislang verwendeten Baumaterial des rosafarbenen und grobkörnigen Vogesensandstein hin zum feinkörnigeren und zweifarbigen Buntsandstein. Im Stil der rheinischen Spätromanik wurden in den Jahren 1180 bis 1200 der Chor, die Vierung und die Andreaskapelle er-

baut, zwischen 1200 und 1210 das nördliche Querhaus (Abb. 3). Eine eindeutige Zäsur erfolgte beim Bau des südlichen Querhauses, dessen Portal noch in romanischen Formen gestaltet wurde, dann aber durch einen neuen, französisch geprägten Bildhauer-Architekten mit einem reichen Skulpturenprogramm im gotischen Stil ausgestattet wurde. Um 1230 wurde das südliche Querhaus mit seinem das Weltgericht darstellenden berühmten Mittelpfeiler vollendet. Im Bereich der Langhausfundamente nachweisbare Planungen für einen Neubau des Langhauses im romanischen Stil wurden aufgegeben, um in der Folge ein neues Langhaus (1230–1275) im Stil der Rayonnant-Gotik zu errichten (Abb. 4). Im Jahr 1277 erfolgte die Grundsteinlegung für die neue Westfassade. Ein Großteil des unteren Geschosses und ein Teil des Rosengeschosses wurden unter dem Werkmeister Erwin (von Steinbach) erbaut, den Johann Wolfgang von Goethe in seinem 1772 publizierten Aufsatz „Von deutscher Baukunst“ zum genialen Baumeister erhob (Abb. 5). Damit entfachte er eine wahre Gotikbegeisterung. Im Jahr 1365 waren die beiden Turmstümpfe vollendet, doch folgte wenig später – abweichend von den ursprünglichen Bauplänen – der Einzug eines Glockenhauses zwischen den Türmen oberhalb der großen Fensterrose. Erst dadurch nahm der Westbau seine massige Gestalt an. Dahinter steckte wahrscheinlich die Idee nach einem höheren Turm. Für dessen Bau konnte der Ulmer Münsterbaumeister Ulrich von Ensingen gewonnen werden, der ab 1399 das Turm oktogon errichtete, welches im Jahr 1439 durch den von Johannes Hültz konzipierten Turmhelm gekrönt wurde (Abb. 6). Durch Blitzeinschläge verursachte Schäden machten jedoch weitere Bauarbeiten am Turm notwendig. Bis zum späten 19. Jahrhundert sollte der mitunter als achtetes Weltwunder angesehene Straßburger Münsterturm mit 142 Metern der höchste Kirchturm der Christenheit bleiben.

Im Verlauf der Jahrhunderte erfuhr der Bau zahlreiche Veränderungen. So wurde schon in den 1340er Jahren die Katharinenkapelle an das südliche Seitenschiff angebaut. In den Jahren 1356 und 1357 beschädigten Erdbeben das Münster, doch ist der genaue Umfang unbekannt. Im Stil der Spätgotik errichtete der Werkmeister Jakob von Landshut in den Jahren 1495–1505 vor dem Nordquerhaus eine dem heiligen Laurentius geweihte Kapelle mit einem in den reichen Formen der oberrheinischen Spätgotik gehaltenen prächtigen Skulpturenportal. Zwischen 1515 und 1521 folgte der Anbau der Martinskapelle (heute Laurentiuskapelle) an das nördliche Seitenschiff.

Im Bildersturm 1529 und den darauf folgenden Jahren gingen zahlreiche Altäre und Ausstattungs-

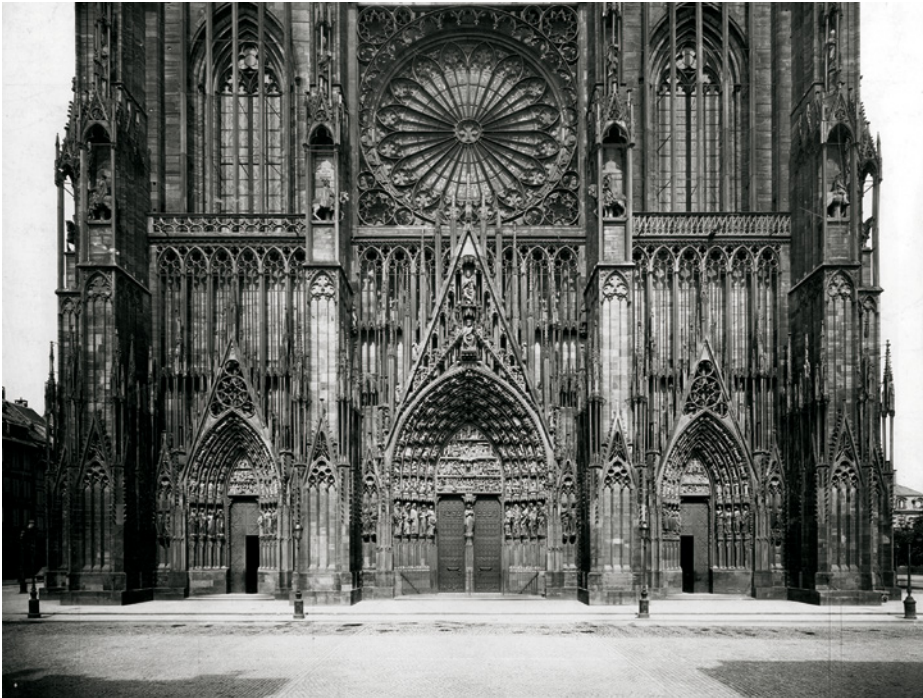


Abb. 5
Westfassade des Straßburger
Münsters, unterer Teil, Aufnahme
Ende 19. Jh.

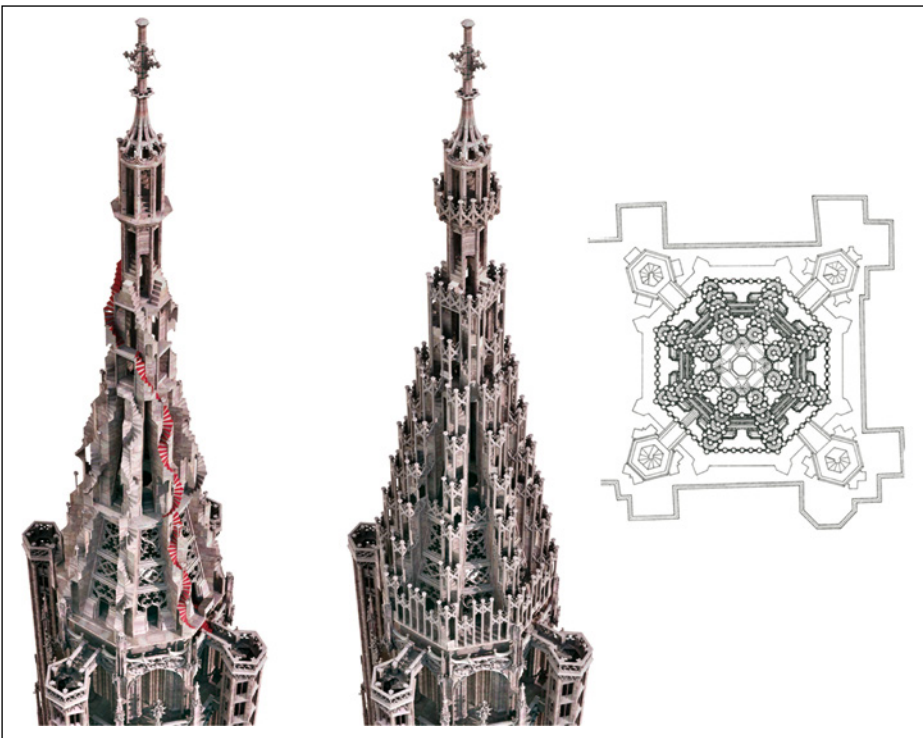


Abb. 6
Der Turmhelm des Straßburger
Münsters

stücke verloren, u. a. die bis dahin den Fußboden bedeckenden Grabplatten. In der Folgezeit war das Münster mit kurzen Unterbrechungen bis 1681 protestantisch. In dieser Zeit wurde um 1547 das schadhafte Gewölbe der Katharinenkapelle durch Bernhard Nonnenmacher erneuert und mit dem Bau der neuen astronomischen Uhr begonnen, die jedoch erst 1574 vollendet wurde. Nach der Annektierung der freien Reichsstadt Straßburgs 1681 durch das französische Königreich wurde das Münster wieder katholisch – ein Akt, der eine umfangreiche künstlerische wie

liturgische Umgestaltung des Chores mit sich brachte. So wurden 1682 der gotische Lettner und die daran angebaute Marienkapelle Erwins von Steinbach (in der der Stifter des Frauenwerkes gedacht wurde) abgerissen und der Chor umgestaltet. 1744 errichtete Joseph Massol die an das Nordquerhaus anschließende, achteckige Sakristei in klassizistischen Formen. Nach dem Brand des gotischen Vierungsturmes 1759 bedeckte Jacques-François Blondel die Vierung mit einem achteckigen, oben abgestumpften Dach, auf das im späten 18. Jahrhundert ein Telegrafenturm

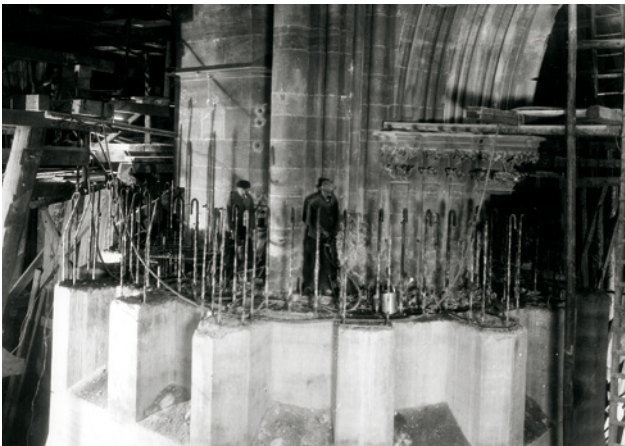


Abb. 7 Restaurierung des Turmpfeilers, 1925



Abb. 8 Die Kanzel von 1485

mast gesetzt wurde. In den Jahren 1772 bis 1778 ersetzte der Architekt Laurenz Götz die an das Münster angrenzenden mittelalterlichen Kaufmannsbuden durch Verkaufsläden im neugotischen Stil. Dem Eifer der französischen Revolutionäre fielen im Jahr 1793 235 Skulpturen zum Opfer, die zerschlagen oder abgemeißelt wurden. Nach dem Brand der Dächer infolge des Beschusses Straßburgs im Jahr 1870 wurde das Langhausdach unter dem Architekten der Münsterbauhütte, Gustave Klotz, erneuert. Trotz der Eingliederung Elsass-Lothringens ins Deutsche Reich

(die bis 1918 andauerte) konnte Klotz seinen langgehegten Plan eines neuen Vierungsturms, der ein Gegengewicht zum hohen Westturm bilden sollte, verwirklichen. 1878/79 wurde dieser in neoromanischen Formen errichtet.

Die Wandmalereien im neobyzantinischen Stil im Chor wurden 1877 ausgeführt. Sie sind Teil einer großen Restaurierung des Inneren des Münsters, zu der auch die Neuordnung und Instandsetzung der mittelalterlichen Glasfenster zählte. Mit dem in neogotischen Formen gehaltenen Windfang auf der Nordseite des Langhauses erhielt das Münster 1905 seinen bis heute letzten Anbau.

Die Jahre zwischen 1907 und 1926 standen im Zeichen eines gewaltigen Restaurierungsprojektes (Abb. 7). Die übermäßige Belastung des inneren Turmpfeilers hatte über Jahrhunderte hinweg zu einer Absenkung der darunter liegenden Fundamente geführt und die Gefahr eines Turmeinsturzes heraufbeschworen. Nach aufwendigen Untersuchungen wurden letztlich die schadhaften mittelalterlichen Fundamente unter dem Turmpfeiler beseitigt und durch einen massiven Betonsockel ersetzt. Die Okkupation des Elsass durch Nazi-Deutschland 1940 bis 1944 führte im August 1944 zur erneuten Bombardierung Straßburgs, diesmal durch amerikanische Fliegereinheiten. Der dabei schwer beschädigte Vierungsturm samt Kuppel und ein Gewölbe des nördlichen Seitenschiffes mussten in der Folge in Stand gesetzt werden. Umfangreiche Restaurierungen erfuhr auch die Westfassade mit ihrem feingliederigen Maßwerkschmuck wie auch, seit den 1980er Jahren, die Nordseite des Münsters. Im Jahr 2004 wurde schließlich der Altarraum gemäß den Vorgaben des Zweiten Vatikanischen Konzils umgestaltet und mit modernem liturgischem Mobiliar ausgestattet.

Heute besitzt das Straßburger Münster noch zahlreiche mittelalterliche Ausstattungsgegenstände. Dazu zählen das im Nordquerhaus aufgestellte Taufbecken von Jodokus Dotzinger (1453), das mit seinen zahlreichen Durchbrüchen und Hinterschnitten ein virtuos Meisterwerk der Bildhauerkunst darstellt. Zu nennen ist auch die reich verzierte steinerne Kanzel von Hans Hammer (1485) im Langhaus (Abb. 8). Hier hängt auch die mehrfach restaurierte Hauptorgel des Münsters, deren schwalbennestartiger Unterbau noch aus dem 14. Jahrhundert stammt, das Buffet dagegen ist aus dem Jahr 1489. Die astronomische Uhr wurde 1838 bis 1842 durch den Uhrmacher Jean-Baptiste Schwilgué mit einem neuen Mechanismus ausgestattet. Dieser ermöglicht das täglich um 12.30 Uhr von zahlreichen Besuchern

verfolgte Vorbeiziehen von Apostelstatuen an der Christusfigur und das Krähen des Hahnes.

Des Weiteren sind im Münster bedeutende Reste mittelalterlicher Glasmalereien aus dem 12. bis 15. Jahrhundert erhalten. Diese stammen zum Teil noch aus dem romanischen Vorgängerbau. Die Fenster der weltberühmten Westrose (Durchmesser 13,60 m) datieren dagegen zum größten Teil aus dem 19. Jahrhundert (Abb. 5).

Besonders hervorzuheben ist auch die bauplastische Ausstattung der Portale, so der drei Westportale (um 1280). Das Mittelportal säumen große Prophezenskulpturen, das Tympanon zeigt Szenen aus dem Leben Christi. Am Nordportal sind Skulpturen von Laster bezwingenden Tugenden aufgestellt, während das Bildfeld der Kindheit Jesu gewidmet ist. Kluge und törichte Jungfrauen bevölkern zusammen mit Christus und dem Verführer das Südportal, welches ebenfalls Monatsdarstellungen, Tierkreiszeichen sowie im Tympanon das (im frühen 19. Jahrhundert erneuerte) Weltgericht vor Augen führt.

Am Südquerhausportal haben sich in den Bogenfeldern die originalen Tympana des Marien Todes und der Marienkrönung (um 1220) erhalten. Zusammen mit dem Engelspeiler und den heute im Museum aufbewahrten Statuen der Ecclesia und Synagoge zählen sie zu den Meisterwerken der europäischen Skulptur des 13. Jahrhunderts.

Als Besonderheit sei noch das Wächterhäuschen aus dem 18. Jahrhundert auf der in 66 Metern Höhe liegenden Aussichtsplattform erwähnt. In ihm sind zwei hölzerne Laufräder aus dem 16. Jahrhundert

erhalten, die dem Materialtransport dienten. Die Aussichtsplattform gewährt einen grandiosen Blick auf Straßburg und das umgebende Rheintal zwischen Vogesen und Schwarzwald.

3 Geschichte der Münsterbauhütte

Die Straßburger Münsterbauhütte existiert seit fast 800 Jahren ohne Unterbrechung. Die erste Nennung lässt sich in einer Urkunde aus den Jahren 1224/1228 nachweisen. Die Stiftung „Das Werk Unserer Lieben Frau“ (abgekürzt auch „Frauenwerk“) wurde wahrscheinlich im frühen 13. Jahrhundert vom Bischof und Domkapitel gegründet, um die damals zahlreich eingehenden Spenden der Bevölkerung besser zu verwalten und zum Neubau des Münsters einsetzen zu können. In der Folge kümmerte sich die Stiftung um die Finanzierung des Münsterbaus und betrieb fortan eine feste Bauhütte vor Ort, die für den Bau der Kathedrale zuständig war. Um das Jahr 1290 gaben die Münsterkanoniker die Verwaltung der Stiftung in die Hände der Stadt ab, unter deren Obhut sie bis heute steht. Auf der Steinmetzversammlung im Jahr 1459 in Regensburg wurde die Straßburger Hütte zur Haupthütte des Deutschen Reiches ernannt. Der Straßburger Werkmeister wurde dadurch zum obersten Richter in Steinmetz-Streitigkeiten. Sogenannte Hüttenordnungen regelten die Organisation der Arbeit, die Ausbildung, die Gehälter und setzten Verbote und Bestrafungen fest. Nach der Eingliederung Straßburgs ins französische Königreich durch Ludwig XIV. verlor die Straßburger Hütte ihre Vorste-



Abb. 9
Gruppenbild der Steinmetzen, 1912

herrolle, 1727 wurde ihr der Status der Haupthütte endgültig abgesprochen. Das Münster wurde 1789 wie alle großen Kathedralen Frankreichs dem französischen Staat zugesprochen. Die Säkularisierung der kirchlichen Güter führte im Jahr 1795 zu Unrecht zur Verstaatlichung der Ländereien der Stiftung, eine Entscheidung, die 1803 durch einen Konsultatsbeschluss zurückgenommen wurde. Dieser Beschluss bildet noch heute die gesetzliche Grundlage der Stiftung. Er setzt fest, dass alle Güter und Einkünfte der Stiftung zum Erhalt und zur Konservierung des Münsters bestimmt sind. Auch der mehrfache Nationalitätenwechsel im 19./20. Jahrhundert hat am Statut der Stiftung nichts geändert (Abb. 9).

4 Die Münsterbauhütte im 21. Jahrhundert

Die „Stiftung Unserer Lieben Frau“ (frz. Fondation de l'Œuvre Notre-Dame) ist eine privatrechtliche Stiftung, die der Stadt Straßburg unterstellt ist. Ihr oberster Verwalter ist der Straßburger Bürgermeister, der Stadtrat fungiert als Stiftungsrat. Das jährliche Budget beläuft sich auf ca. 5 Millionen Euro, wovon der Hauptteil durch eigene Einnahmen aus der Verwaltung der Immobilien- und Ländereien sowie aus dem Verkauf von Karten für den Aufstieg auf die Münsterplattform erwirtschaftet wird. Eine Subvention seitens der Stadt Straßburg ergänzt das Budget, das zur Bewältigung der umfangreichen Arbeiten nötig ist.

Hauptaufgabe der Stiftung ist die Instandhaltung und Sanierung des Münsters. Dazu kann auf den reichen Dokumentenbestand der Stiftung zurückge-

griffen werden. Er beinhaltet eine 7000 Publikationen umfassende auf das Münster und seine Erhaltung spezialisierte Bibliothek, eine Fotothek mit 7000 Glasplatten und ca. 15000 Abzügen, eine Plansammlung mit 7000 Plänen, die in erster Linie den Münsterbau dokumentieren, weiterhin eine 5000 Objekte beinhaltende Gipsabgusssammlung (Abb. 10), ein Steinlager mit 2000 abgenommenen Werkstücken des Münsters sowie ein reiches Archiv von Schriftstücken.

Der gesamte mittelalterliche Schriftbestand, darunter die fast lückenlose Reihe der mittelalterlichen Rechnungsbücher der Stiftung, befindet sich heute im Straßburger Stadtarchiv. Die ca. 30 erhaltenen mittelalterlichen Architekturzeichnungen zum Straßburger Münsterbau werden heute im Musée de l'Œuvre Notre-Dame aufbewahrt. All diese Bestände stellen ein bedeutendes einzigartiges Kulturerbe da, das es zu schützen gilt und für Forschung und Recherche zugänglich zu machen.

Eine weitere Aufgabe der Stiftung ist die Verwaltung ihres umfangreichen Besitzes von Immobilien und Ländereien, aus denen sie den Großteil ihrer eigenen Einkünfte gewinnt. Dieser resultiert aus z. T. Jahrhunderte alten Schenkungen und Stiftungen. Auf über 125 Kommunen im Elsass verteilen sich 700 Hektar landwirtschaftlich genutzte Flächen sowie das 360 Hektar umfassende Waldgebiet Elmersfort bei Balbronn. Zu den 20 Immobilien in Straßburg zählen mehrere denkmalgeschützte Häuser, so das Haus des Frauenwerkes (*Maison de l'Œuvre Notre-Dame*) (Abb. 11), dessen Gebäudeteile aus dem 14. und 16. Jahrhundert stammen. Es ist noch immer Sitz der



Abb. 10
Gipsabgusssammlung
der Münsterbauhütte

Verwaltung der Stiftung und beherbergt seit 1931 das Mittelaltermuseum der Stadt Straßburg (*Musée de l'Œuvre Notre-Dame*). Auch das berühmte Kammerzell-Haus, eines der schönsten mittelalterlichen Fachwerkhäuser Straßburgs aus dem 16. Jahrhundert, und das Münsterpfarrhaus zählen dazu wie auch ein Waldhaus aus dem 18. Jahrhundert, heute ein Ausflugslokal mit Fremdenzimmern.

Aktuell arbeiten 32 Personen im Frauenwerk. Neben einem Drittel mit der Verwaltung und Archiv betrauten Angestellten und einer auf Steinkonservierungsfragen spezialisierten Geologin handelt es sich um hoch qualifizierte Handwerker, darunter zwei Steintechniker, neun Steinmetze – die zum Teil auf Steinkonservierung spezialisiert sind – drei Bildhauer, ein Schmied, ein Schreiner und zwei Maurer. Des Weiteren werden jährlich drei Lehrlinge und ein bis zwei Wandergesellen eingestellt. So soll gewährleistet werden, dass langjährige Erfahrungen und alte Handwerkstechniken auch an jüngere Generationen weitergegeben werden. Bewusst wird deshalb auch bis heute auf den Einsatz des pressluftbetriebenen Schlaghammers verzichtet. Bei der Auswahl der Mitarbeiter der Bauhütte wird in erster Linie auf handwerkliche Fähigkeiten und Talent Wert gelegt, doch sind auch Interesse am Münster, an historischen Bauten und ihrem Erhalt erwünscht.

Mitarbeiter der Münsterbauhütte gewährleisten zudem eine ständige Präsenz vor Ort. Gemeinsam mit einem Architekten der französischen Baudenkmäler (frz. *architecte des bâtiments de France*), der als Konservator des Münsters für die Sicherheit und nichtkirchliche Veranstaltungen verantwortlich ist, wird gemäß der Vorgaben der Charta von Venedig

eine vorausschauende Konservierung angestrebt, die größere Restaurierungs- und Sanierungsarbeiten limitieren soll.

Das Münster ist dem Straßburger Erzbistum zur kirchlichen Nutzung überlassen. Ein durch Mitglieder des Klerus und Laien besetzter Kirchenrat ist für den den Kultus betreffenden materiellen Unterhalt verantwortlich.

5 Heutige Aufgaben und Probleme

Da das Münster seit der französischen Revolution dem französischen Staat gehört, stehen alle Sanierungs- und Restaurierungsarbeiten unter der Obhut der staatlichen französischen Denkmalpflege. Die anstehenden Restaurierungsarbeiten der Außenfassaden werden nur zum Teil an das Frauenwerk und ihre alteingesessene Bauhütte vergeben. Ein Teil der Steinarbeiten wie auch alle nicht den Sandstein betreffenden Arbeiten (Glasfenster, Metall, Elektrik etc.) werden ausgeschrieben und von Privatfirmen ausgeführt. Seit einem im Jahr 1999 abgeschlossenen Rahmenabkommen zwischen dem französischen Staat und der Stiftung Œuvre Notre-Dame gibt es nur noch einen Architekten, der die Funktionen des staatlichen Denkmalpflege-Architekten und diejenige des Architekten des Frauenwerkes vereint. Die wichtigsten Sanierungsprojekte werden in einem 10-Jahres Plan festgelegt. Zusammen mit dem Architekten fertigt das Frauenwerk Sanierungskonzepte für die ihr übertragenen Baustellen an und setzt diese, nach Genehmigung durch die französische Denkmalpflege, um. Die seit den 1990er Jahren gewandelte Restaurierungsphilosophie favorisiert dabei den wei-



Abb. 11

Haus des Frauenwerkes (Maison de l'Œuvre Notre-Dame)

test möglichen Erhalt der historischen Bausubstanz. Zwischen diesem Ziel und dem nötigen Austausch verwitterter Steinsubstanz gilt es verantwortungsvoll abzuwägen. Je nach Entscheidung werden Steine konservatorisch behandelt, mit Anstückungen versehen oder falls unvermeidbar durch neu geschlagene, identische Kopien ersetzt. Dabei muss ein Sandstein verwendet werden, der in Farbe und Körnungen dem originalen Steinblock nahe kommt und sich zudem durch größte Haltbarkeit auszeichnet. Alte traditionelle Steinmetztechniken werden beim Hauen wie auch beim Versetzen der Steine – zum Teil mit flüssigem Blei – angewandt. Die Konzentrierung auf den Erhalt der Bausubstanz und häufige Funde von Spuren der alten Polychromie machen die Zusammenarbeit mit Steinrestauratoren unumgänglich.

Zu den großen Sanierungsprojekten der Münsterbauhütte in den letzten 15 Jahren zählt die Instandsetzung der sich über 40 Meter Höhe erstreckenden Turmpyramide in den Jahren 2000 bis 2004 zusammen mit Privatfirmen (Abb. 12). Es folgten 2005 bis 2007 das Achteckgeschoss des Turmes, 2008 bis 2010 die romanische Zwerggalerie des Vierungsturmes. In den Jahren 2009 und 2010 wurde die Westwand des südlichen Querhauses renoviert, 2012 die Sanierung der Außenfassaden der Katharinenkapelle abgeschlossen. Gleichzeitig wurde die durch zwei Glasrestauratoren bewerkstelligte Instandsetzung der Glasfenster des südlichen Seitenschiffes zu Ende geführt und durch eine dritte Firma mit einer Schutzverglasung versehen. Für diese von der Staatlichen Denkmalpflege in Auftrag gegebenen Arbeiten hat das Frauenwerk die zahlreich eingegangenen Spenden weitergeleitet. Auch für ihre eigenen Aufgaben stehen der Stiftung Privatspenden zur Verfügung. Unter anderem konnte vor wenigen Jahren ein testamentarisch hinterlegtes Vermächtnis von vier Straßburger Wohnhäusern dem Immobilienbesitz der Stiftung einverleibt werden.

Aktuell steht die Sanierung der Fassade der im frühen 13. Jahrhundert errichteten Südquerhausfassade an, wobei alle Steinarbeiten von der Münsterbauhütte finanziert und ausgeführt werden, die Sanierung der Glasfenster, Holz- und Metallelemente sowie die Sicherung der Farbspuren von Restauratoren bewerkstelligt und durch die staatliche Denkmalpflege finanziert wird. Bis 2017 sollen diese Arbeiten, die auch die Ostwand des südlichen Querhauses umfassen, abgeschlossen werden.

Durch verschiedene Steinmetzfirmer wurde im Zeitraum 1983 bis 2008 die Nordseite des Münsters (Querhaus und Langhaus) in Stand gesetzt. Aktuell

wird die der Nordseite des Münsters vorgelagerte Galerie aus dem 18. Jahrhundert saniert.

Dringender Handlungsbedarf besteht auch für den in seiner Statik gefährdeten südöstlichen Treppenturm des Achteckturmes, der als einziger der vier Wendeltreppen des Turmes noch in seiner weitgehend mittelalterlichen Bausubstanz erhalten ist. An weiteren Projekten sind für die kommenden Jahre die Erneuerung des Besucherempfangs auf der Münsterplattform geplant, die einhergeht mit der Instandsetzung seines Wächterhäuschens aus dem 18. Jahrhundert. Auch das aus der Zeit um 1500 in den reichen Formen der Spätgotik errichtete Laurentiusportal bedarf einer baldigen Instandsetzung.

Weitere Informationen unter:
www.oeuvre-notre-dame.org



Abb. 12 Baugerüst am Turmhelm, 2001

Bibliographie

Ausstellungskatalog Strasbourg 2015/2016

(Musée de l'Œuvre Notre-Dame): „Strasbourg 1200–1230. La révolution gothique“

Bengel, Sabine: Das Straßburger Münster

1150–1230: Seine Ostteile und die Südquerkirchenwerkstatt, Petersberg 2011

Bengel, Sabine; Nohlen, Marie-José; Potier,

Stéphane: Bâisseurs de cathédrale. Strasbourg mille ans de chantiers, Strasbourg 2014

Böker, Johann Josef; Sauvé, Jean-Sébastien,

Brehm, Anne Christine, Hanschke, Julian: Architektur der Gotik. Rheinlande (Basel, Konstanz, Freiburg, Straßburg, Mainz, Frankfurt, Köln), Salzburg 2013

Blumstein, Félix; Seyboth, Adolph: Urkunden des Stifts genannt Unser-Lieben-Frauen-Werk, Auszüge betreffend der Stadt Strassburg zukommende Rechte in der Verwaltung des Werkes, Strassburg 1900

Dorée, Joseph (Hg.): La grâce d'une cathédrale: Strasbourg. Strasbourg 2007

Friederich, Karl: Die Steinbearbeitung in ihrer Entwicklung vom 1. bis zum 18. Jahrhundert. Augsburg 1932

Fuchs, François Joseph: L'Œuvre Notre-Dame et la Cathédrale de Strasbourg à travers les archives. In: BSACS 11, 1974, S. 21–34

Haeusser, Jean-Richard: L'Œuvre Notre-Dame: une tradition vivante. In: Ausstellungskatalog Strasbourg 1989 „Les Bâisseurs des cathédrales gothiques“, S. 485–492

Haeusser, Jean-Richard: Die Münsterbauhütte in Strassburg in ihrer Geschichte und heute. In: Die Ortenau 1992

Kelhetter, Clément: Les outils utilisés et leurs traces sur la cathédrale de Strasbourg. In: Dombau-meistertagung Strassburg, Strasbourg 2006, S. 157–162

Mistler, Anne (Hg.): Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg. 100 ans de travaux. Bernardswiller 2015

Schock-Werner, Barbara: Das Straßburger Münster im 15. Jahrhundert. Köln 1983

Schock-Werner, Barbara: L'Œuvre Notre-Dame, histoire et organisation de la fabrique de la cathédrale de Strasbourg. In: Ausstellungskatalog Strasbourg 1989 „Les Bâisseurs des cathédrales gothiques“, S. 133–138

Schock-Werner, Barbara: Die Münsterbauhütte in Strassburg. In: Die Baukunst im Mittelalter, hg. von Roberto Cassanelli, Düsseldorf 2005, S. 221–248

Schottner, Adolf: Das Brauchtum der Steinmetzen in den spätmittelalterlichen Bauhütten und dessen Fortleben und Wandel bis zur heutigen Zeit. Münster/Hamburg 1994

Schottner, Adolf: Die „Ordnungen“ der mittelalterlichen Dombauhütten. Tradierte Vorgaben – Niederschrift – Fortbestand. Münster/Hamburg 1994

Schmitt, Otto: Gotische Skulpturen des Straßburger Münsters. Frankfurt/Main 1924.

Reinhardt, Hans: La cathédrale de Strasbourg, Paris 1972

Die wichtigsten Baumaße

- Länge des Münsters: 112 Meter
- Breite der Westfassade: 51, 5 Meter
- Höhe des Langhauses: 40 Meter
(32 Meter im Inneren)
- Höhe der Seitenschiffe: 19 Meter
- Höhe der Querhäuser: 32 Meter
- Höhe des Westturms: 142 Meter
- Höhe der Aussichtsplattform: 66 Meter
- Höhe des Vierungsturmes: 58 Meter
- Höhe der Vorhalle: 42 Meter
- Durchm. des großen Rosenfensters: 13,6 Meter

Die wichtigsten Flächenmaße

- 6044 m² bebaute Fläche
- 4900m² Kupfer gedeckte Dächer
- 600 m² Ziegel gedeckte Dächer
- 47m² Schiefer gedeckte Dächer

Die Baumeister und Architekten des Straßburger Münsters

- ca.1200 Hermanus Auriga (?)
- ca.1250–1276 Rudolphus (?)
- 1277–1318 Erwin von Steinbach
- 1318–1339 Johannes Erwin
- 1341–1371 Johannes Gerlach
- 1372–1382 Konrad (oder Cuntze)
- 1383–1388 Michel Parler von Freiburg
- 1388–1399 Klaus von Lohre
- 1399–1419 Ulrich von Ensingen
- 1419–1449 Johann Hültz von Köln
- 1450 Matthäus Ensinger
- 1452–1472 Jodokus Dotzinger von Worms
- 1472–1480 Konrad Vogt, par interim
- 1480–1485 Konrad Vogt
- 1486–1490 Hans Meiger (oder Meyer)
genannt Hammer
- 1491–1493 Conrad Sifer
- 1493–1495 Lorentz von Vendenheim, par interim
- 1495–1509 Jakob von Landshut

1510–1519	Hans Hammer
1520–1551	Bernard Nonnenmacher aus Heidelberg
1552–1556	Hieronymus Fürkorn
1556–1564	Marx Schan
1565–1576	Hans Uhlberger
1576–1608	Hans Thoman Uhlberger
1608–1610	Hans Karl Uhlberger
1611–1620	Konrad Vogt
1621	Hans-Jacob Winter
1622–1643	Hans Heckler
1642–1654	VAKANZ
1654–1682	Hans Georg Heckler
1683–1702	Josef Lautenschlager
1702–1713	VAKANZ
1713–1759	Johann Michael Erlacher
1760–1763	Johann Wagner
1764–1785	Johann Lorentz Götz
1785–1794	Johann Georg Götz
1794–1811	Anton Klotz
1811–1823	Villot, Stadtarchitekt, par interim
1823–1835	Spindler
1835–1838	Fries, Stadtarchitekt, par interim
1837–1880	Gustav Klotz
1880–1889	Hermann Petiti, par interim
1889	August Hartel
1890–1894	Franz Schmitz
1894–1897	Ott, Stadtbaumeister, Ludwig Arntz, par interim
1895–1903	Ludwig Arntz
1902–1905	Johann Knauth, par interim

1904–1920	Johann Knauth
1921–1922	Ch.-A. Pierre, par interim
1922–1927	Clément Dauchy
1927–1929	Ch.-A. Pierre, par interim
1929–1941	Ch.-A. Pierre
1941–1971	Anselme Schimpf (seit 1939 „architecte-adjoint de l'OND“)
1971–1999	Jean-Richard Haeusser

Architectes en chef des Monuments historiques

1921–1939	Rober Danis
1945–1980	Bertrand Monnet
1981–1991	Pierre Prunet
1991–1999	Bernard Fonquernie

Architectes en chef des Monuments historiques/ Architectes de l'Œuvre Notre-Dame

1999–2012	Christiane Schmückle-Mollard
seit 2012	Pierre-Yves Caillault

Abbildungen

Titelbild, Abb. 10, 11:	Jérôme Dorkel, Eurométropole de Strasbourg
Abb. 1–2, 5, 7–9, 12, 13:	Fondation de l'Œuvre Notre-Dame
Abb. 3, 4:	Fondation de l'Œuvre Notre-Dame/ Matthias Rutkowski
Abb. 6:	Fondation de l'Œuvre Notre-Dame/ Stéphane Potier

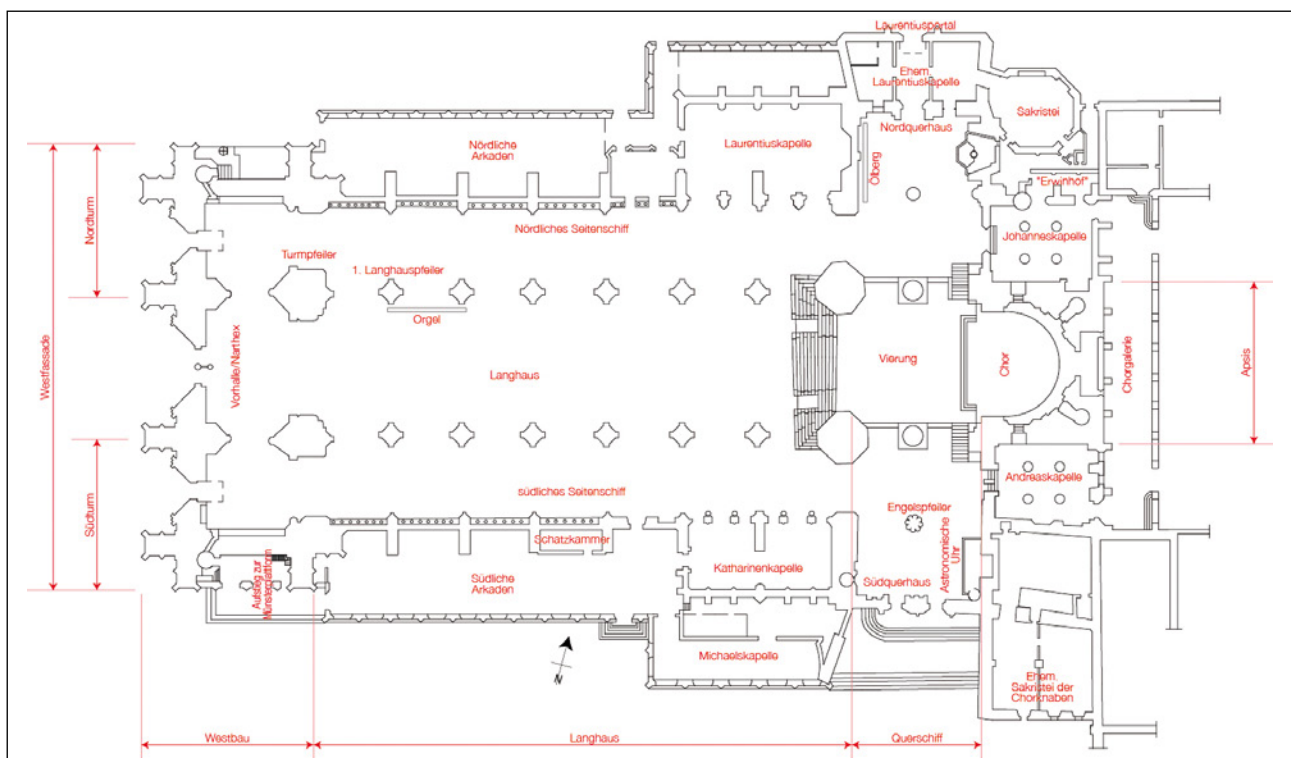


Abb. 13 Grundriss des Straßburger Münsters

Die Arbeitsweise der Straßburger Münsterbauhütte (Fondation de l'Œuvre Notre-Dame)

von Eric Salmon



Die Stiftung Œuvre Notre-Dame, die die Straßburger Münsterbauhütte betreibt, ist eine in Frankreich einzigartige Institution, die vor 800 Jahren gegründet wurde. Seit der Errichtung des gotischen Münsters im 13. Jahrhundert bis heute konnte die Stiftung die Jahrhunderte überdauern, nicht zuletzt dank ihrer in Europa einmaligen rechtlichen Stellung. Ihre Existenz verdankt die Stiftung ihrer Fähigkeit immer offen zu bleiben für den Einsatz neuer Techniken. Hinzu kommt die Motivation ihrer Mitarbeiter, die die Instandhaltung des Münsters zu ihrer Leidenschaft gemacht haben.

Die Straßburger Münsterbauhütte

Die Existenz der Stiftung Œuvre Notre-Dame mit ihrer Münsterbauhütte ist eine Besonderheit, die mit der Geschichte der Stadt Straßburg zusammenhängt. Dies beinhaltet die Arbeitsteilung zwischen der Stiftung Œuvre Notre-Dame und der französischen Denkmalpflege, was die Sanierung und Unterhaltsarbeiten am Münster betrifft.

In Frankreich werden die Sanierung und Instandhaltung der Kathedralen generell wie folgt organisiert:

- Der Staat ist Eigentümer, Bauherr und Auftraggeber.
- Der Bauleiter ist ein Chefarchitekt der französischen Denkmalpflege. Er fertigt die Sanierungskonzepte an und ist für die Bauüberwachung zuständig.
- Private Baufirmen führen die Arbeiten durch.

Im Fall der Straßburger Kathedrale (Abb. 1) ist es jedoch etwas anders: Dort existiert seit dem frühen 13. Jahrhundert eine Stiftung, die den Bau der gotischen Kathedrale vorantrieb und finanzierte. Seit dem Jahr 1999 regelt ein zwischen dem französischen Staat und der Stiftung Œuvre Notre-Dame abgeschlossenes Rahmenabkommen die Instandhaltung neu.

Alle zehn Jahre wird ein Programm für Sanierungsprojekte erstellt, das vom Präfekten des Département Alsace (in Vertretung des Eigentümers) und dem Straßburger Bürgermeister in seiner Funktion als Verwalter der Stiftung Œuvre Notre-Dame genehmigt wird. Es ist die Grundlage für die über den Zeitraum von zehn Jahren geplanten Arbeiten, die zwischen dem Staat und der Stiftung aufgeteilt werden.

Die für die Sanierungen von Baudenkmälern gültigen französischen Denkmalpflegegesetze verlangen pro Sanierungsvorhaben die Anfertigung dreier Studien: Eine Vorstudie leistet einen historischen Überblick, listet die unterschiedlichen Schadensphänomene an dem zu sanierenden Bauteil auf und stellt die Grundzüge der durchzuführenden Arbeiten dar. Der Antrag auf Arbeitsgenehmigung (frz. *Dossier Architectural et Technique*) enthält die einzelnen Vorhaben und stellt einen Finanzplan vor. Die Abschlussdokumentation (frz. *Dossier des ouvrages exécutés*) beschreibt alle Maßnahmen, die während des gesamten Zeitraums der Sanierung ausgeführt wurden und listet die verwendeten Steine und Materialien auf.

Die Münsterbauhütte ist zuständig für Maurer-, Steinmetz- und Bildhauerarbeiten sowie für die Steinkonservierung. Glasfenster- und Dacharbeiten werden von der Denkmalpflege öffentlich ausgeschrieben und spezialisierten Firmen überlassen.

Die regionale Direktion für die kulturellen Angelegenheiten des Elsass (frz. *Direction des affaires culturelles*, abgek. DRAC) steuert die Kulturpolitik des französischen Staates in der Region Alsace. Sie vertritt den Eigentümer der Kathedrale und ist für öffentliche Ausschreibungen zuständig. Sie regelt auch die Aufteilung der Aufträge an öffentliche und private Unternehmen.

Die Stiftung Œuvre Notre-Dame ist der Kulturabteilung der Stadt Straßburg unterstellt. Es handelt sich jedoch um eine privatrechtliche Stiftung, deren oberster Verwalter der Straßburger Oberbürgermeister ist. Sie organisiert auch öffentliche Ausschreibungen für spezielle Arbeiten, die nicht in ihrem Kompetenzfeld liegen.

Die Stiftung Œuvre Notre-Dame ist auf drei Standorte verteilt: Die Verwaltungsbüros befinden sich in dem gegenüber der Kathedrale gelegenen mittelalterlichen Haus des Frauenwerkes (*Maison de l'Œuvre Notre-Dame*). Die Steinmetz-, Bildhauer- und Konservierungswerkstätten befinden sich seit 2005 in unmittelbarer Nähe. Der Steinlagerplatz und weitere Werkstätten wie Schmiede und Schreinerei sind dagegen in der Peripherie von Straßburg, im Meinau-Viertel, angesiedelt. Hier befinden sich auch das Lapidarium und die Gipsabgusssammlung.

Unter den 32 Angestellten der Stiftung sind 24 technische Mitarbeiter der Münsterbauhütte. Es handelt sich um so genannte „Gebäuderestauratoren“ unterschiedlicher Ausbildung, darunter Steintechniker, Steinmetze, Bildhauer, Maurer, ein Schmied und ein Schreiner sowie eine auf Steinkonservierung spezialisierte Geologin.



Abb. 1 Gesamtansicht des Straßburger Münsters, 2009

Die Stiftung bildet Lehrlinge aus. Von den drei Auszubildenden absolvieren zwei den Lehrlingsbrief (CAP) und einer das Berufsdiplom für Steinmetze (BP). Sie werden nicht zum Personal der Stiftung gezählt.

Die Arbeiten der Münsterbauhütte

Die Arbeiten der Münsterbauhütte sind wie folgt organisiert:

Der technische Leiter

Der technische Leiter (und zugleich Stellvertreter des Direktors) leitet in Vertretung des Bauherren die von der Stiftung finanzierten Sanierungsprojekte und stellt die Zeit- und Kostenpläne der einzelnen Projekte auf. Er fungiert als Verbindungsperson zwischen dem Chef-Architekten und den technischen Teams.

Der Hüttenmeister

Der Hüttenmeister ist für den operativen Teil der Arbeiten zuständig. Er organisiert, plant und koordiniert die Arbeitsverteilung zwischen den verschiedenen Werkstätten.

Das Planungsbüro (Abb. 2)

Das Planungsbüro setzt sich aus einem Verantwortlichen, einem Steintechniker und einer Spezialistin für die Konservierung von Sandsteinen zusammen.

Der Leiter des Büros unterstützt und berät den Chef-Architekten. Dabei kann er auf den reichen Dokumentenbestand der Stiftung zurückgreifen (technische Bibliothek, Gipsabgussammlung, Fotoarchiv,

Plansammlung). Auch verfügt er über Kenntnisse über das Gebäude und über die über Jahrhunderte verwendeten Bautechniken und Materialien. Das ist eine äußerst wichtige Aufgabe, da die Erbauer des Münsters zahlreiche Spuren wie Steinmetzzeichen, Werkzeugspuren, Eisenklammern, Wolfs- und Zangenlöcher hinterlassen haben. Sie geben Hinweise für die Datierung der einzelnen Bauelemente und helfen, Original von Kopien zu unterscheiden.

Der Leiter des Restaurierungsbüros erstellt seit dem Jahr 2000 zudem ein Wartungsheft für das Münster, in dem alle Probleme gelistet werden. Dazu zählen z. B. der mangelhafte Wasserabfluss oder punktuelle Verschlechterungen sowie Sicherheitsprobleme. Dieses Wartungsheft enthält das Reinigungsprogramm, die Organisation der Schneeräumung und die verschiedenen vorgesehenen Maßnahmen. Die Arbeiten werden zwischen dem Staat, der Stiftung und der Kirchenfabrik aufgeteilt. Dieses wird vom Konservator der Denkmalpflege, dem Leiter der Stiftung, dem Chef-Architekten und dem für die Sicherheit von Staatsbauten zuständigen Gebäudearchitekten abgezeichnet.

Der Steintechniker

Der Steintechniker ist als ausgebildeter Steinmetz damit beauftragt, die zu ersetzenden Steine aufzumessen sowie Steinzettel und Schablonen anzufertigen. Dabei ist es wichtig, die Informationen exakt zu übermitteln. Er koordiniert die Erstellung von Mauermaßen anhand von photogrammetrischen Plänen und Vor-Ort-Aufmaßen. Die Kartographierung der zu ersetzenden oder zu konservierenden Steine wird auf

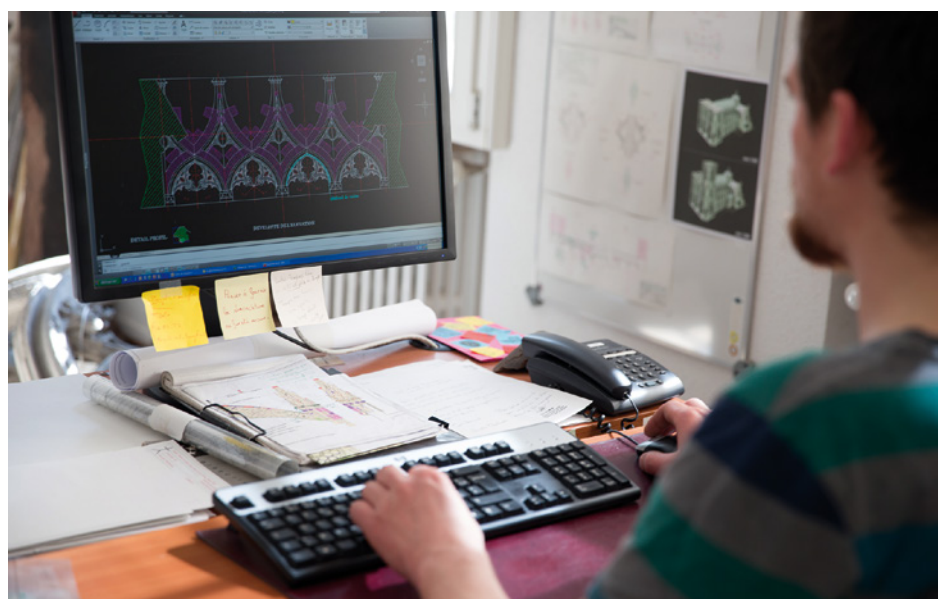


Abb. 2
Anfertigung eines Steinzettels im
Planungsbüro

einem Zeichenbrett, meistens jedoch am Computer in 2D- oder in 3D-Darstellung vorgenommen.

Auf dem Gerüst dienen diese Pläne dazu, die zu ersetzenden oder zu konservierenden Steine zu lokalisieren. Bei der Erstellung von Plänen für den Steinzuschnitt wird sogleich die zu ersetzende Sandsteinart, seine Eigenart, seine Farbe und seine Versatzrichtung ermittelt.

Der Steintechniker bereitet die Arbeit für die Steinmetze und Bildhauer anhand von 1:1-Aufrissen, Steinzetteln und Schablonen vor. Diese dienen dann der Anfertigung von möglichst genauen Kopien der zu ersetzenden Elemente.

Die Beauftragte für Konservierungsstudien

Die Beauftragte hat einen wissenschaftlichen Blickwinkel über die Schadensphänomene der am Münster verwendeten Baumaterialien, insbesondere des Sandsteines. Ihre Aufgabe ist es, präzise Konservierungsprotokolle zu erarbeiten. Sie beteiligt sich an der Suche nach den bestmöglichen Behandlungsmöglichkeiten entsprechend den verschiedenen Materialarten und Schadensphänomenen. Sie forscht an möglichst effektiven Techniken zur Steinkonservierung, wie beispielsweise zur Festigung und Entsalzung der Steine und sucht nach geeigneten, weitgehend dem Originalmaterial entsprechenden Ersatzstoffen (Restauriermörtel, Injektionsmörtel für Risse etc.).

Im Bemühen um eine präventive Konservierung ist die Suche nach dem richtigen Baumaterial, eines mit dem Münster kompatiblen Sandsteins, eine ihrer Aufgaben. Dafür benötigt sie einerseits gute Kenntnisse über die seit mehr als 800 Jahren verwendeten Sandsteine sowie über deren Beständigkeit. Bei der Analyse und Auswahl möglicher Ersatzsandsteine für Restaurierungen spielen die mineralogischen und petrophysischen Eigenschaften eine große Rolle.

Die Steinschneidewerkstatt im Straßburger Meinau-Viertel
Der Leiter der Werkstatt ist ein erfahrener Steinmetz, der gute Kenntnisse über die Qualität der Sandsteine hat, was insbesondere bei der Sanierung kleinteiliger Arbeiten von großer Bedeutung ist.

Er nutzt seine engen Kontakte zu den Besitzern von Steinbrüchen sowohl im Elsass, wo die ursprünglichen Bausteine herkommen, als auch in Deutschland. Das erlaubt ihm einen Überblick zu erlangen über vorhandene, aber auch neue Sandsteinvorkommen, die für das Münster infrage kommen.

Er verwaltet das Steinlager der Münsterbauhütte, welches heute ca. 120 Kubikmeter umfasst (Abb. 3). Anders als bei früheren Restaurierungsmaßnahmen ist man seit 1999 dazu übergegangen, die originalen

Farbtöne der beim Münsterbau verwendeten Sandsteine zu respektieren. Die Palette der originalen Farbtöne variiert von dunkelrot bis hellgelb, umfasst aber auch graue Töne. Früher bevorzugte man einen farblich einheitlichen Sandstein.

Der Steinsäger

Der mit dem Steinschnitt befasste Steinmetz führt die verschiedenen Schnitte möglichst nahe an den Blockmassen aus, um die manuelle Abarbeitung zu erleichtern. Er wählt die Blöcke aus und verwaltet den Steinbestand. Er ist zugleich für die Wartung der eingesetzten Maschinen zuständig. Er schneidet die für die Werkstatt und die Baustelle benötigten Steine zu. Dabei muss er die Steinlage beachten und Aushöhlungen vornehmen, um die Arbeit für die Steinmetzen und Bildhauer bestmöglich vorzubereiten.

Die Steinmetzwerkstatt (Abb. 4)

Der Steinmetz ist alleine für sein Werkstück verantwortlich, vom Beginn bis zum Ende der Ausführung. Für einige Stücke kann die verwendete Arbeitszeit mehr als tausend Stunden betragen. Der Steinmetz überträgt mittels verschiedener vom Steintechniker vorbereiteter Schablonen und des Steinzettels die Maße auf den Steinblock. Dieser extrem wichtige Arbeitsabschnitt verlangt größte Genauigkeit.

Die Bearbeitung wird alleine durch Handarbeit bewerkstelligt. Dies geschieht mit Werkzeugen, die es ermöglichen, die Arbeiten gemäß der überlieferten Bau- und Restaurierungstechniken auszuführen. Die Steinmetze sind angehalten, die Oberflächenbearbeitung der Originalsteine zu imitieren. In der Steinmetzwerkstatt arbeiten neun Steinmetze und drei Auszubildende.

Die Bildhauerwerkstatt (Abb. 5)

Der Bildhauer muss zeichnen, modellieren und abformen können, um exakte Gipsabgüsse zu fertigen.



Abb. 3 Das Steinlager der Münsterbauhütte

Die Bildhauerarbeit dient der Umsetzung charakteristischer, organischer Formen insbesondere der gotischen Kunst, wohingegen die Steinmetzarbeit geometrische Formen reproduziert. So werden im Mittelalter die Bildhauer gemäß ihrer zumeist die Natur abbildenden Werke *imagiers* genannt. Die für die Sanierung des Münsters erforderliche Bildhauerarbeit fordert ein künstlerisches Einfühlungsvermögen und ein Verständnis für die unterschiedlichen Stile des Mittelalters.

Der Leiter der Bildhauerwerkstatt

Der Leiter der Bildhauer verteilt die Bildhauer- oder Konservierungsarbeiten sowie die Modellier- und Abformarbeiten, um die Gipsabgusssammlung zu vervollständigen.

Die beiden ihm unterstellten Bildhauer erstellen Zeichnungen und Modelle sowie Bildwerke, entweder als Ersatz für fehlende Stellen oder als Anstückungen für beschädigte Stellen.

Die Konservierungswerkstatt

Die auf Konservierungsaufgaben spezialisierten Mitarbeiter haben die Aufgabe, die zahlreichen an den Baumaterialien des Münsters (Sandstein, Mörtel, Farbspuren, Metalle) auftretenden Beschädigungen mit restauratorischen Maßnahmen zu behandeln. Die Konservierungspraxis umfasst die Erstellung einer Diagnose, die mit Laboranalysen einhergeht. Die Arbeiten müssen das Ursprungsmaterial bestmöglich respektieren.

Der Leiter der Konservierungswerkstatt ist ein gelernter Steinmetz, der seit zahlreichen Jahren in der Natursteinkonservierung ausgebildet wurde und der an den verschiedenen Vorstudien, Analysen, Tests und Maßnahmen auf der Baustelle oder in der Werkstatt teilnimmt.

Zwei Steinmetze sind so ausgebildet, dass sie Konservierungsmaßnahmen durchführen können.



Abb. 4 Die Steinmetzwerkstatt



Abb. 5 Anfertigung einer Kopie einer Kreuzblume in der Bildhauerwerkstatt



Abb. 6 Links: Vorbefeuchtung zwecks anschließender Rissverfüllung mit Injektionsnadel, rechts: Entsalzung eines gotischen Frieses mittels Kompressen





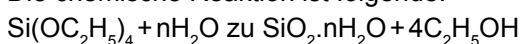
Abb. 7 Zerstörungsfreies Verfahren für die Messung der Luftdurchlässigkeit des Sandsteins

Das Team aus insgesamt drei Personen, das je nach Bedarf und Größe des zu sanierenden Bauteils aufgestockt wird, beteiligt sich an den verschiedenen Vorarbeiten. Sie setzen die verschiedenen Interventionstechniken gemäß der unterschiedlichen Schäden um: Dazu zählen Reinigung, Entsalzung, Injektion, Auffüllen und Aufkleben. Hinzu kommt die Aufmörtelung fehlender Teile, Festigungen sowie das Hauen und Anpassen von Anstückungen und die Sanierung von Fugen (Abb. 6a, b).

Die hauptsächlich verwendeten Steinfestigungsmittel sind Produkte auf der Basis von Kieselsäureester (KSE), das mit der Feuchtigkeit der Luft (oder der Grundfeuchtigkeit des Steines) reagiert, um ein Kieselgel innerhalb des Porensystems im Sandstein zu bilden. Sie werden in verschiedenen Konzentrationen je nach Steinmaterial und Festigungswunsch angewendet.

Diese Produkte setzen sich zusammen aus Kieselsäureester (Orthokieselsäure) und einem neutralen Katalysator (Dibutylzinndilaurat).

Die chemische Reaktion ist folgende:



Kieselsäureester + Feuchtigkeit reagiert zu amorpher und wasserhaltiger Kieselsäure. Bei dieser Reaktion entweicht Ethanol und führt zur Gelbildung.

Entwicklung des Konservierungspools

Der Konservierungspool ist kürzlich durch die Schaffung einer neuen Stelle für eine Konservierungsbeauftragte verstärkt worden. So sollen die wissenschaftlichen und technischen Kenntnisse und die Suche nach neuen Lösungen zusammengeführt werden. Auf diese Weise soll das Labor der Münsterbauhütte in die Lage versetzt werden, Prüfreiheiten effektiv durchzuführen, die für die Konservierungsmaßnahmen notwendig sind.

So ist im Laufe des vergangenen Jahres ein neues, zerstörungsfreies Vor-Ort-Verfahren für die Messung der Luftdurchlässigkeit des Sandsteins eingesetzt worden – mit der Hilfe eines Praktikanten in Zusammenarbeit mit dem Forschungslabor der französischen Denkmalpflege (LRMH) (Abb. 7). Unseres Wissens ist es das erste Mal, dass dieses innovative Verfahren, welches aus der Ölindustrie stammt, in einem denkmalpflegerischen Kontext zur Anwendung kam.

Dadurch konnte die Wirksamkeit von zwei Festigerarten auf zwei Sandteintypen verglichen werden. Dies geschah mit dem Ziel, einen neuen Festiger, der den klimatischen Bedingungen der Baustelle entgegenkommt, mit unterschiedlichen Dosierungen zu testen. So soll eine dauerhafte wirkende Oberflächenbehandlung bei durchlässigen Baustoffen die ursprünglichen Materialeigenschaften so wenig wie möglich verändern.

Arbeiten am Münster

Die Baustellenmannschaft (Abb. 8)

Nach Abschluss der Stein- und Bildhauerarbeiten in der Werkstatt versetzt ein vielseitiges Team die Werkstücke. Es ist darüber hinaus auch für die Vorbereitung der Baustelle verantwortlich. Es führt die notwendigen Abbrucharbeiten durch und legt die von Fall zu Fall unterschiedlichen Versatztechniken fest – in Frage kommen Mörtel oder Blei.

Dabei wird streng auf den Arbeitsschutz geachtet.

Der Baustellenchef ist ein Maurer, der für den gesamten Sanierungsbereich verantwortlich ist, vom Aufbau bis zum Abbau des Gerüsts, einschließlich seiner Wartung.

Der Schreiner (Abb. 9)

Der Schreiner führt Reparatur- und Wartungsarbeiten am Münster durch, so z. B. an Türen und Holzvertäfelungen. Er ist auch ausgebildet, um auf der Baustelle Techniken des Dachstuhlbaus anzuwenden. Er entwickelt und verwirklicht Holzabsteifungen, die für den Versatz oder die Demontage von Bauelementen



Abb. 8 Transport eines Steinelements auf der Baustelle des südlichen Querhauses, 2014

notwendig sind. Er errichtet auch Baustellenzäune, die die Gerüste am Boden schützen.

Der Schmied (Abb. 10)

Der Schmied führt die Schmiedearbeit für die Werkzeuge der Steinmetze und der Bildhauer aus. Der Großteil der für die Steinbearbeitung benutzten Werkzeuge wird regelmäßig in der Schmiede gewartet und überholt. Wenn sie zu stark abgenutzt sind, werden sie dort neu geschmiedet. Die angewendeten Techniken, vom Hämmern bis zum Aushärten, werden – soweit möglich – mit den althergebrachten



Abb. 9 Schreinerarbeiten



Abb. 10 Schmiedearbeiten



Abb. 11 Aktion „Sommerputz“ des Münsters, 2015

Werkzeugen und mit den ursprünglichen Steinmetztechniken ausgeführt. Der Schmied ist auch in der Lage, Werkzeuge zu konstruieren, die heute nicht mehr im Gebrauch sind. Dies trifft insbesondere auf die Steindächsel (frz. *polka*) zu, die vom Ende des 12. bis zur Mitte des 14. Jahrhundert am Münster benutzt wurde. Dieses Werkzeug verschwand seitdem aus den Werkstätten. Die charakteristischen Spuren, die das Werkzeug hinterlässt, werden bei den Restaurierungsarbeiten des 19. Jahrhunderts durch die Zahnfläche imitiert. Mit dem Steindächsel haben Mitarbeiter der Münsterbauhütte erstmals 2006/2007 bei Instandsetzungsarbeiten wieder einige Säulen der Zwerggalerie der Vierung restauriert.

Der Schmied arbeitet auch am Münster und an den Stiftsgebäuden. Er erledigt Kunstschmiedearbeiten und sorgt für die Verbesserungen der Gebäudesicherheit. In erster Linie fertigt er Schutzvorrichtungen für ungesicherte Bereiche und bringt Taubenschutzgitter an. Auch fällt die Konservierung von schmiedeeisernen Gittern in seinen Aufgabenbereich.

Die Bauunterhaltsarbeiten am Münster (Abb. 11)

Direkt am Münster gelegen und damit ständig dort präsent kümmert sich die Stiftung Œuvre Notre-Dame auch um die Wartungsarbeiten an dem Gotteshaus. Diese umfassen punktuelle Sofortmaßnahmen, die in einem Wartungsheft vermerkt werden, sowie regelmäßige Maßnahmen. Dazu zählt die Reinigung des Münsters, die einmal pro Woche nach einem klar definierten Plan in den verschiedenen Bereichen stattfindet.

Diese Arbeiten leitet der Baustellenverantwortliche. Beteiligt daran sind alle technischen Mitarbeiter. In den Wintermonaten arbeitet die Mehrzahl der Steinmetze in der Werkstatt, die anderen bleiben mit den Maurern am Münster, um Wartungsarbeiten durchzuführen oder die Baustelle vorzubereiten. Im Frühjahr kehrt, je nach Arbeitsfortschritten, ein großer Teil der Steinmetze und Bildhauer auf die Baustelle zurück.

Zusammenfassung

Die Organisation der Münsterbauhütte ist seit ihrem Ursprung bis zu unseren Tagen relativ ähnlich geblieben. Dabei arbeiten die Mitarbeiter die Bauhütte unter Wahrung der Tradition mit den verschiedenen Fachleuten zusammen. Ihre Geschichte zeigt, dass sie stets die modernsten Restaurierungstechniken angewendet hat. So gehörte sie unter den Bauhütten zu den ersten, die photogrammetrischen Pläne nutzen, ein originalgetreues 3D-Modell der Kathedrale entwickelten oder neue innovative Messmethoden einsetzen.

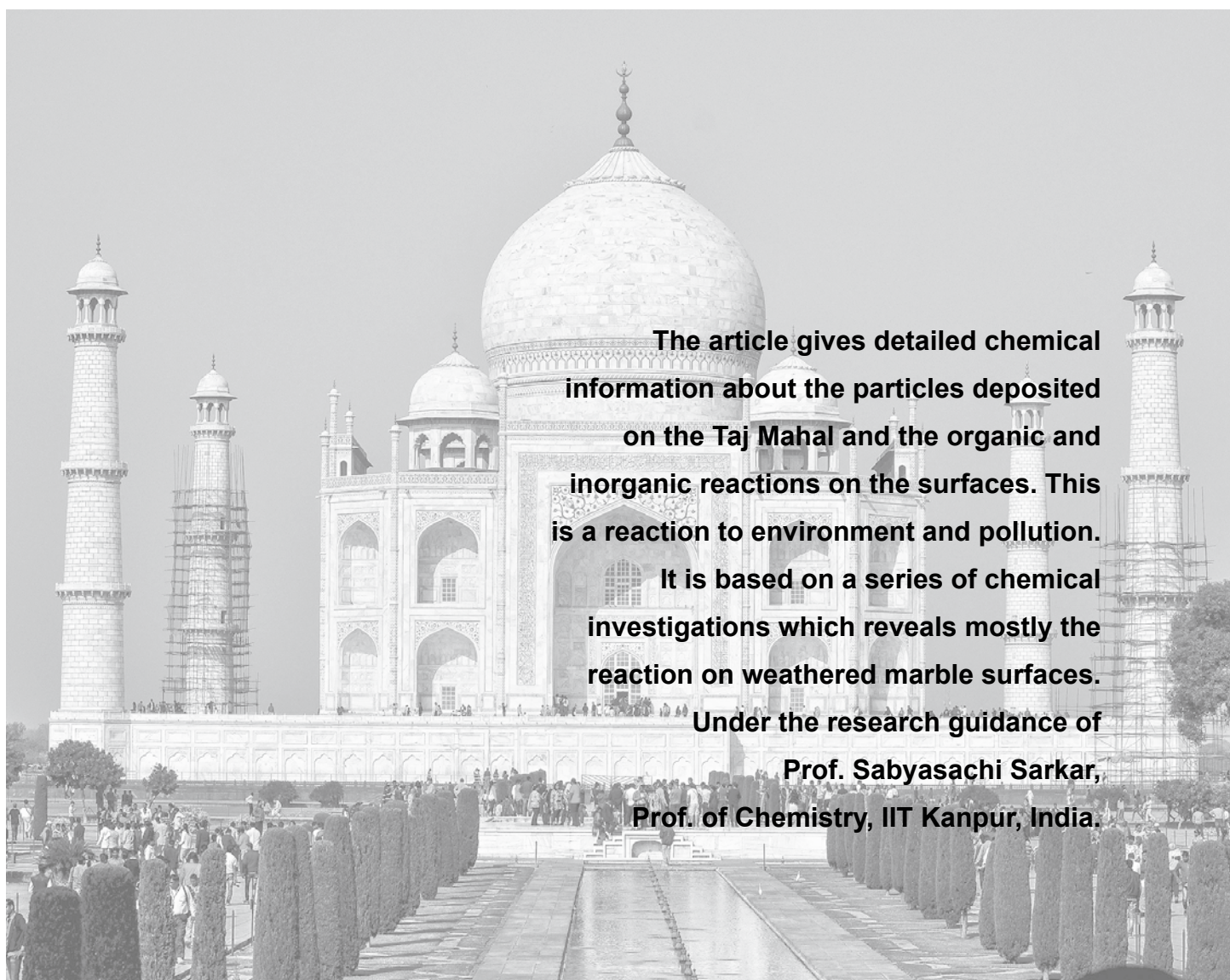
Abbildungen

Titel: Frantizek Zvardon/Editions La Nuée Bleue
Abb. 1, 5–7, 11: Fondation de l'Œuvre Notre-Dame
Abb. 2–4, 8–10: Jérôme Dorkel, Eurométropole de Strasbourg

Chemistry and Deposition of Airborne Particulates on the Taj Mahal at Agra/India

Investigations on Soiling at Monuments in a Semi-Arid Zone of India.

von Deepankar Banerjee



The article gives detailed chemical information about the particles deposited on the Taj Mahal and the organic and inorganic reactions on the surfaces. This is a reaction to environment and pollution.

It is based on a series of chemical investigations which reveals mostly the reaction on weathered marble surfaces.

Under the research guidance of Prof. Sabyasachi Sarkar, Prof. of Chemistry, IIT Kanpur, India.

1 Introduction

The environmental species impacting upon the Taj Mahal at Agra have been studied. In this research endeavour based on research projects in different aspects of aerosol-substrate reaction studies, the impacts and implications of various phenomena have been considered. Thus impact of precipitation, determination of origin of aerosols, impact of pollutants, impact of dust, marble weathering phenomena, filter analysis and impact of bacteria and related micro flora have been studied in the light of existing research methodologies and sampling profiles. The pollution grade and situation can be obtained from the Central Pollution Control Board (C.P.C.B.) under Ministry of

Environment and Forests, Government of India (Table 1).

2 Methodology and samples

The elemental profile and morphology of aerosols and marble were studied by the SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy and Energy dispersive spectroscopy), the mineralogical profile was studied by XRD (X-ray diffraction), the organic matter of aerosols, algae were studied by FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy). The water soluble fractions of the organic aerosols were analysed by NMR Spectroscopy.

Tab. 1 Pollution grade and situation, Central Pollution Control Board (C.P.C.B.) under Ministry of Environment and Forests, Government of India. Explanation: SPM = Suspended Particulate Matter

Parameters → Years ↓	SO ₂ µg/m ³	NO ₂ µg/m ³	SPM µg/m ³
2002	5	22	376
2003	4	22	352
2004	5	18	309
2005	9	22	306
2006	6	22	316
2007	6	23	296
2008	7	22	304
2009	6	20	334
2010	5	20	333
2011	4	20	290
2012	5	18	322
2013	4	17	275
2014	4	15	277



Fig. 1 Location of the samples investigated: water spout with and without black crusts (left side), pieces of crusts (right side)

Samples and Sampling

Micro samples of crust particles have been collected as a result of natural weathering phenomena. Micro samples peel off or give away from places such as water spouts or water passage areas (Fig 1). Dust fall is a monthly measurement of dust deposited on a monthly basis. The algal input into the dust fall, soluble organic and inorganic content of aerosols from dust fall have been studied. Dust from high volume filter samples (Dust collected by High Volume Sampler, Particle diameter is on the coarse mode. The height of the sampling station is 20 meters from the ground level.), coarse dust from High Volume Samplers have been collected and studied. Marble with algal growth have been collected from the monument stores and studied. The equipment used for dust sampling was located at the north-west corner of the monument and height of 20 meters from the ground level, the equipment was an "Envirotech" make High Volume Sampler.

Chemical Composition of the Dust by different methods

The samples studied were :

- Dust** was characterised for seasonal, morphological, mineralogical, elemental profiles. (Particle size has not been measured but it is in the coarse mode). Grain size has not been measured.

- Composite dust:** Composite dust represents the dust profile of an entire year. The XRD (X-ray diffraction) results of this dust gave the presence of Kaolinite, Microcline, Quartz, Calcite, Hematite, Magnetite and Iron Oxide Hydroxide (Table 2).
- Composite dust represents the dust of all seasons (summer, winter and rainy). **Seasonal profiles of the dust:**
 - Summer dust: the summer dust analysed by XRD gave the presence of Kaolinite, Microcline, Quartz, Calcite, Hematite (Table 3).
 - Winter dust: the winter dust analysed by XRD gave the presence of Kaolinite, Microcline, Quartz, Calcite, Hematite, Magnetite (Table 4).
- Elemental profile:** of the dust analysed by SEM-EDS system gave the percentage composition of Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe and Mn (Table 5). The SEM images of the dust showed a Silicate matrix in which soil oriented minerals with Si/Al elements have appearances of Iron oxide particles. The Iron oxide particles show a typical particle morphology along with soil oriented particles. Soil oriented geometrical patterns like rectangular, rhomboidal and other irregular shaped particulate patterns could be seen^{2,3} (Fig 2).

Tab. 2 X-ray Data of the composite dust (I. Expt. = Intensity of Experimented Sample , I. Std. = Standard Value of Intensity as per JCPDS Software, dA° Expt. = d Values of Experimented Sample, dA° Std. = Standard d Values)

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Kaolinite $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$	78-2110	52.43	100	7.23	7.12
Potassium Aluminium Silicate (Microcline) KAlSi_3O_8	19-926	49.02	100	4.22	4.20
Quartz SiO_2	46-1045	100	100	3.31	3.34
Calcite CaCO_3	05-0586	39.15	100	3.00	3.03
Hematite Fe_2O_3	33-0664	29.62	100	2.68	2.70
Magnetite Fe_3O_4	77-1545	25.46	100	2.53	2.53
Iron Oxide Hydroxide FeOOH	18-639	28.06	100	2.50	2.50

Tab. 3 X-ray data of summer dust

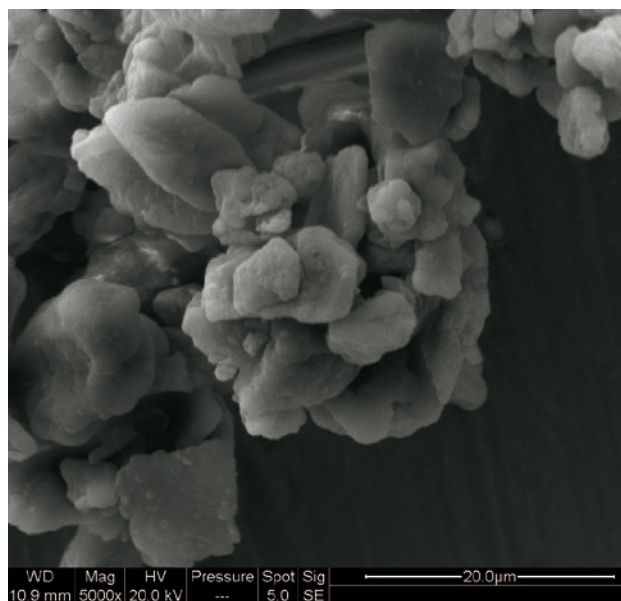
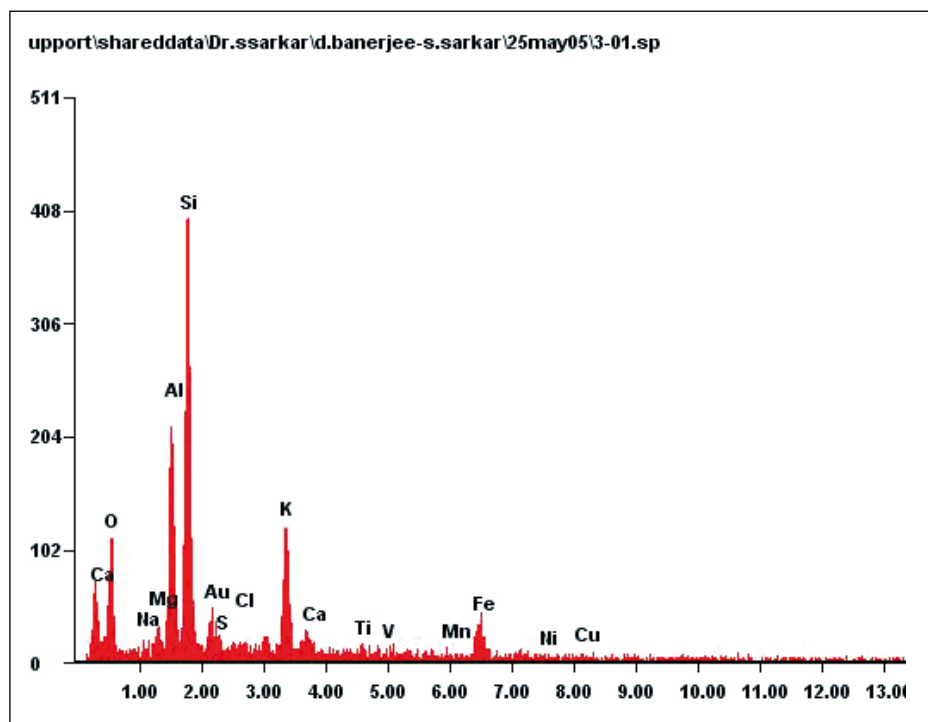
Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA Expt.	dA Std.
Kaolinite $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$	78-2110	62	100	7.7	7.12
Potassium Aluminum Silicate (Microcline) KAlSi_3O_8	19-926	66	100	4.2	4.22
Quartz SiO_2	46-1045	100	100	3.32	3.34
Calcite CaCO_3	05-0586	69	100	3.01	3.03
Hematite Fe_2O_3	33-0664	65	100	2.72	2.70

Tab. 4 X-ray data of winter dust

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Kaolinite $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$	78-2110	60	100	7.5	7.12
Potassium Aluminium Silicate (Microcline) KAlSi_3O_8	19-926	62	100	4.22	4.22
Quartz SiO_2	46-1045	77	100	3.32	3.34
Hematite Fe_2O_3	33-0664	62	100	2.85	2.70
Magnetite Fe_3O_4	19-629	61	100	2.40	2.53

Tab. 5 EDS data of dust (calibrated)(Wt % = weight percent)

Element	Wt %
Na	01.50
Mg	02.76
Al	19.30
Si	39.51
S	00.58
Cl	01.03
K	13.93
Ca	01.76
Mn	01.38
Fe	11.74
Ni	01.58
Cu	02.95

**Fig. 2** SEM- Image of dust**Fig. 3** EDS spectra of dust

Tab. 6 X-Ray data of High volume filter sample dust

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Kaolinite $\text{Al}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$	78-2110	62.23	100	7.16	7.12
Potassium Aluminium Silicate (Microcline) KAlSi_3O_8	19-926	56.43	100	4.26	4.22
Quartz SiO_2	46-1045	64.37	100	3.30	3.34
Calcite CaCO_3	05-0586	46.64	100	3.03	3.03
Hematite Fe_2O_3	33-0664	42.86	100	2.77	2.70
Hematite $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	13-534	33.52	100	2.69	2.69
Iron Oxide Hydroxide δFeOOH	13-87	36.98	100	2.55	2.55

Tab. 7 X-Ray data of fresh marble (marble used in conservation)

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Calcite CaCO_3	05-0586	100	100	3.00	3.03
		16.46	14	2.45	2.49
		20.77	18	2.27	2.28
		19.44	18	2.10	2.09
		23.59	17	1.90	1.91
		21.53	17	1.87	1.87

Tab. 8 X-Ray data of weathered marble

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Calcium Oxalate Hydrate Whewellite $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	20-231	35.95	100	5.93	5.93
Calcium Carbonate Hydrate $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	15-20	16.31	100	4.39	4.33
Calcite CaCO_3	05-0586	100	100	3.01	3.03
Calcium Iron Magnesium Carbonate Ankerite [Ca(Fe, Mg) (CO_3)]	33-282	49.8	100	2.86	2.9
Calcium Carbonate Hydrate $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	24-513	11.00	100	2.66	2.63
Magnetite Fe_3O_4	19-629	8.27	100	2.56	2.53

2. Analysis of High volume filter sample:

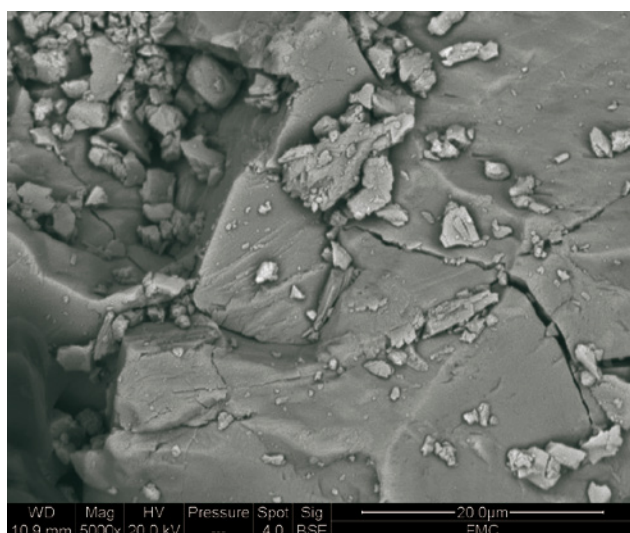
The High volume filter sample was analysed by XRD and the minerals identified were Kaolinite, Microcline, Quartz, Calcite, Hematite, Magnetite and Iron Oxide Hydroxide. Thus the mineralogical profile of the composite dust and the High volume filter sample were similar (Table 6).

3. Mineralogical analysis of marble:

- A Mineralogical analysis of fresh marble (marble used in conservation and restoration): The XRD results of such marble gave the presence of Calcite phases in relative intensities (Table 7).
- B Mineralogical analysis of weathered marble with black crust: The XRD results of such marble specimen gave the presence of Whewellite, Calcium carbonate hydrate, Ankerite and Magnetite (Table 8).

Tab. 9 FTIR band assignments for organic content of marble crust

Bands cm^{-1}	Functional groups
2924	CH_2 symmetric
2852	CH_2 asymmetric
1748	$\text{C}=\text{O}$ stretching of esters
1561	Substituted aromatics
1460 } 1377 }	C-H deformation of CH_3 and CH_2
1146	C-O-C asymmetric or symmetric stretching of esters and carbohydrates
739	Aryl mono-substituted or C-H

**Fig. 5** SEM-image of fresh marble**Tab. 10** EDS of fresh marble

Element	Wt %
Si	02.95
Ca	97.05

Tab. 11 Analysis of weathered marble with black crust by EDS

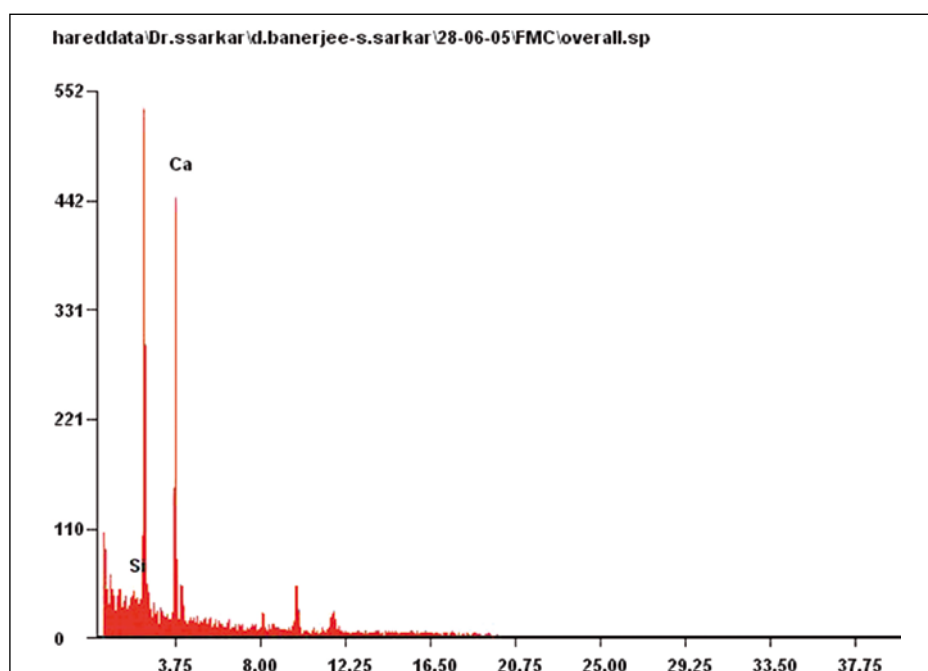
Element	Percentage
AL	1.30
Si	0.0
Ca	84.77
Mn	6.74
Fe	7.20

4. Weathering of the Marbles and analytic results:

The marbles exposed were investigated for organic composition of the crusts, the overall composition of the marbles and chemical reactions due to soiling and biological attack.

5. Analysis of organic content of the weathered marble crust by FTIR spectroscopy:

Crust is considered a general term of a fallen micro marble sample. In some cases the crusts also contain biological matter like algae. The FTIR analysis gave the presence of CH_2 symmetric and asymmetric stretch, $\text{C}=\text{O}$ stretching of esters, substituted aromatics, C-H deformation of CH_3 and CH_2 , C-O-C asymmetric or symmetric stretching of esters and carbohydrates, Aryl mono-substituted or C-H stretch⁴ (Table 9).

**Fig. 4** EDS spectra of fresh marble (marble used in conservation and restoration)

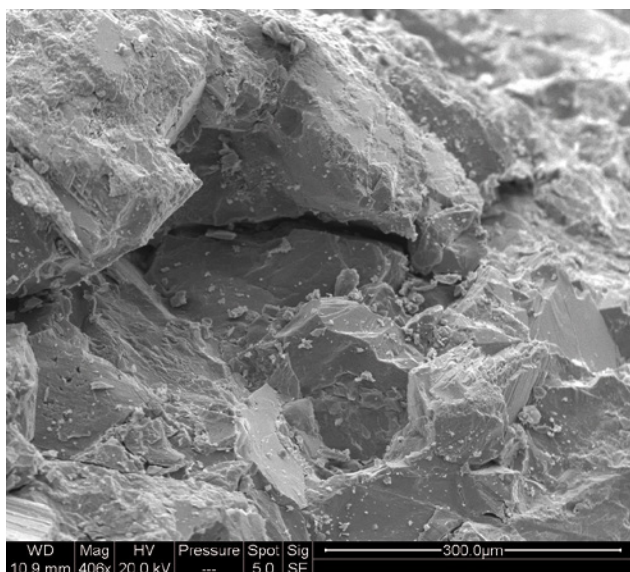


Fig. 6 SEM image of weathered marble with black crust

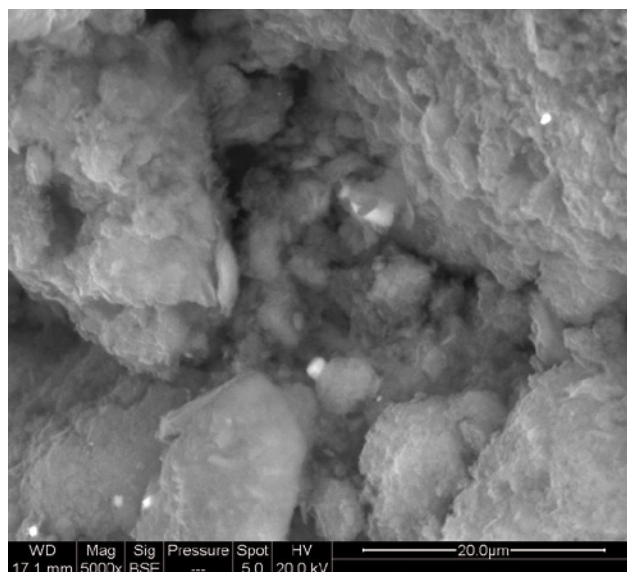


Fig. 7 SEM image of Algal growth on marble crust

Tab. 12 X-ray data of marble with algal crust

Name of Mineral	P.D.F. Card	I. Expt.	I. Std.	dA° Expt.	dA° Std.
Calcium Oxalate Hydrate Whewellite $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	75-1313	10.66	100	5.94	5.92
Calcium Silicate CaSiO_3 (Wollastonite)	27-88	5.86	100	2.92	2.97
Calcium Carbonate Hydrate $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	34-513	11.15	100	2.65	2.63

6. Elemental analysis of marble:

A Analysis of fresh marble (marble used in conservation and restoration)

The analysis of fresh marble by a SEM-EDS system gave the presence of Calcium 97.05 % and Si-2.95 %, the SEM images revealed a Calcite matrix in which the grains are in different forms without any cracks, gaps or pores (Table 10, Fig 5). Analysis of a fresh marble already done by Energy Dispersive Spectroscopy. (Relative percent because of the EDS-method, which can not detect CO_3 , water and oxide.)(Fig 4)

Analysis of weathered marble crust by a SEM-EDS system gave the presence of Calcium 84.7 %, Al- 1.3 % , Fe -7.2 % and Mn- 6.7 %, the SEM images showed weathering profiles. Pits, pores were visible. Micro and macro pores were visible with different shapes. Such pores might have occurred due to fracturing mechanisms. The marble showed preliminary weathering profiles (Table 11, Fig 6).

7. Mineralogical profile of marble with black crust:

Marble with algal crust was analysed by XRD and the phases found were Whewellite, Wollastonite (standard high pressure and temperature formation within the metamorphic process) and Calcium carbonate hydrate (Table 12).

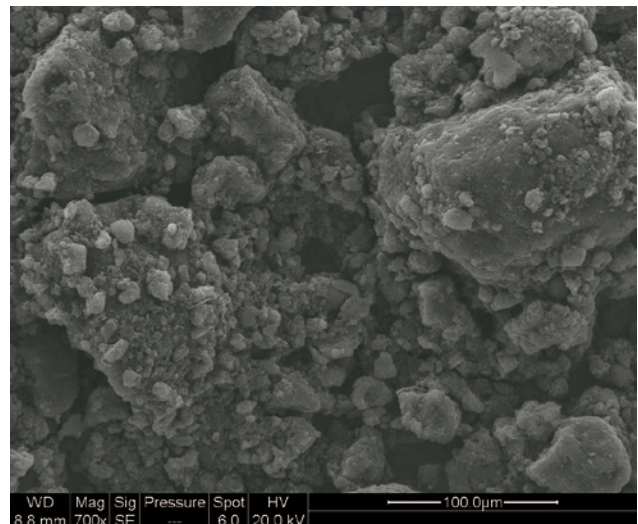
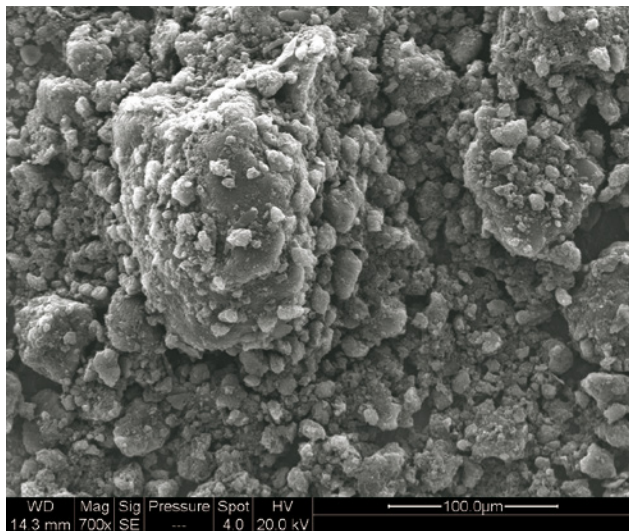
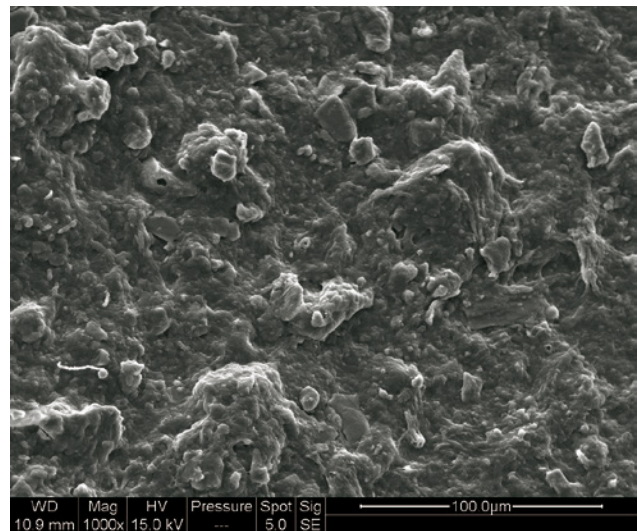
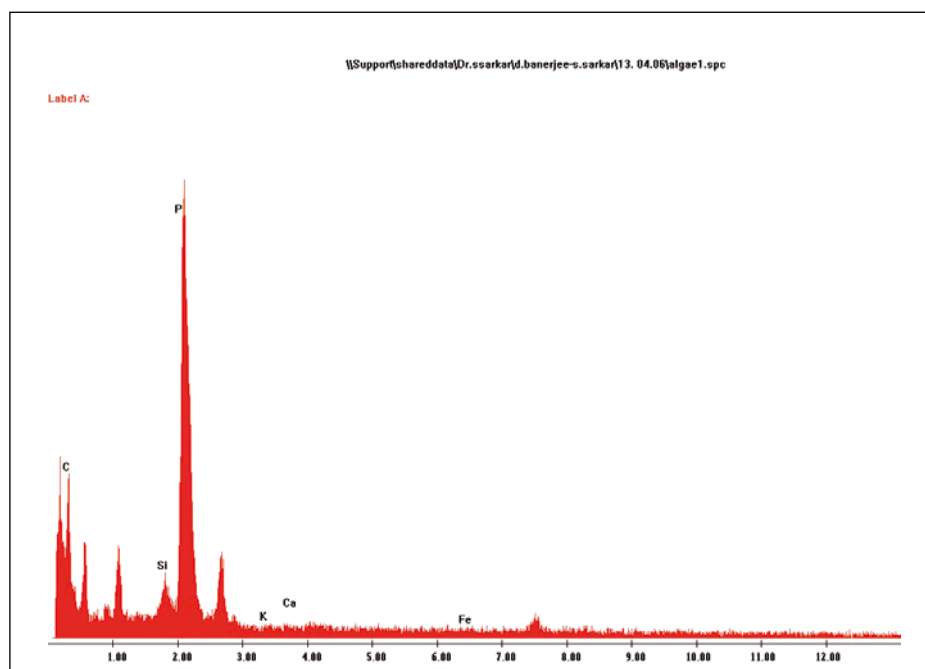
Wollastonite may have been formed by changes in temperature witnessed by the geographical area where temperature variations are between 1 °C in winters to 45 °C in summer. Calcium carbonate hydrate may have been formed by the action of water on the marble. The impact of algal growth on the weathered marble can be seen by the presence of its metabolic product Whewellite.

8. Analysis of weathered marble encrusted with algae (algal growth on marble):

SEM images of algal growth on weathered marble were examined. The Calcite grains were intermixed with the bioorganic cellular material of the blue-green algae. The algal mass had penetrated into the weak zones of the calcitic mass. The

Tab. 13 EDS analysis of seasonal soluble dust from dust fall

Element	Summer	Winter	Rainy
	Wt %	Wt %	Wt %
Mg	11.0	13.5	9.66
Al	3.75	1.01	6.3
Si	32.5	5.3	31.0
K	12.0	0.0	13.48
Ca	13.4	76.48	18.2
Fe	27.0	3.7	21.3

**Fig. 8** SEM image of soluble summer dust from dust fall**Fig. 9** SEM image of soluble winter dust from dust fall**Fig. 10** SEM image of algae**Fig. 11**
EDS spectra of algae

resulting topography was a organo-mineral complex. The fibrillar material of the algal cell wall had become interspersed with the micron sized calcite grains. Calcite grains had been impregnated with algal filamental invasions, which had encrusted the small pits and pores of the calcitic mass (Fig 7).

9. The chemical composition of the soluble dust:

The dust was investigated by XRD, the soluble part of the dust was estimated as soluble dust fall by filtering the soluble part of the dust fall sample through a Whatman 42 filter paper. The soluble content of the dust from the dustfall was analysed by SEM-EDS method. The soluble dust from the dust-fall thus represents the water soluble fraction.

10. Analysis of soluble dust:

A The soluble dust from the dust fall samples was analysed by a SEM-EDS system. **Seasonal profiles of the soluble dust:-**

- I. **Summer season soluble dust:** Summer soluble dust gave the percentage composition of Mg-11 %, Al-3.75 %, Si-32.5 %, K-12 %, Ca-13.4 % and Fe-27.4 %
- II. **Rainy season soluble dust:** Rainy season soluble dust gave the percentage composition of Mg-9.66 %, Al-6.3 %, Si-31 %, K-13.4 %, Ca-18.2 % and Fe-21.3 %.
- III. **Winter season soluble dust:** Winter season soluble dust gave the percentage composition of Mg-13.5 %, Al-1 %, Si-5 %, K-0 %, Ca-76.5 % and Fe-3.7 % (Table 13).

The SEM images of all the seasonal profiles of soluble dust show agglomerated clay structure in which the soil particles were closely attached to each other, micro and macro grains were visible. Fragmental evidences of Iron oxide particles along with the basic soil oriented Si/Al elemental profiles of particles were visible. Clay particles in different irregular sizes-

Tab. 14 FTIR analysis of algae

Bands cm^{-1}	Functional groups
3418 cm^{-1}	O - H and N - H of water Amide A
2923 cm^{-1}	CH_2 stretch of Fatty acids
2853 cm^{-1}	CH_2 stretch of Fatty acids
1637 cm^{-1}	Amide I of Protein of β pleated sheet structure.
1463 cm^{-1}	CH_2/CH_3 of Lipids Amide II
1026 cm^{-1}	Carbohydrates
583 cm^{-1}	} Mixed Si - O deformations and Octahedral sheet vibrations
519 cm^{-1}	
467 cm^{-1}	

micro, medium and large particles can be seen. These particles were identical with the morphological structure of the airborne dust particles (Fig 8, 9).

The clay profiles are identical of a typical soil oriented particle matrix.

11. Analysis of algae from dust fall deposits:

The algae from the dust fall samples was analysed by SEM-EDS, thus the algae analysed was from the dust fall deposit and not from the marble crust.

I. Algae chemical analysis by SEM-EDS:

The blue green algae which grow on the Calcitic mass of the monument showed a Chlorophyllous cell structure matrix based on natural organic polymers like Proteins, Sugars and Phosphates. Some evidences of other microbial mass like fungal strains can also be ascertained. Evidences of metal particulates embedded on the algal mass can be seen in the SEM images (Fig 10).

Tab. 15 NMR of water soluble summer aerosol

ppm values	Functional Groups	Identifications
0.9–1.9ppm	C - H	Purely aliphatic moieties
1.9–3.2ppm	H - C - C =	Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons)
3.3–4.1ppm	H - C - O	Protons bound to oxygenated aliphatic Carbon atoms (hydroxy or alkoxy groups)
6.5–8.3ppm	Ar - H	Aromatic protons
4.1–4.5ppm		Organo Nitrates

Tab. 16 NMR of water soluble rainy season aerosol

ppm values	Functional Groups	Identifications
0.9–1.9PPM	C-H	Purely aliphatic protons
1.9–3.2ppm	H-C-C=	Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons)
3.3–4.1ppm	H-C-O	Protons bound to oxygenated aliphatic Carbon atoms (hydroxy or alkoxy groups)
6.5–8.3ppm	Ar-H	Aromatic protons

Tab. 17 NMR of water soluble winter season aerosol

ppm values	Functional Groups	Identifications
0.9–1.9PPM	C-H	Purely aliphatic protons
1.9–3.2ppm	H-C-C=	Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons)
3.3–4.1ppm	H-C-O	Protons bound to oxygenated aliphatic Carbon atoms (hydroxy or alkoxy groups)
6.5–8.3ppm	Ar-H	Aromatic protons

The elemental analysis by EDS gave imprints of Phosphates, Carbon and silica absorbed on the surface of the algae (Fig 11).

II. Algae analysis by FTIR spectroscopy:

The algae gave signatures of water absorption on proteins, CH₂ stretch of fatty acids, Amide I of Proteins of β pleated sheet structure, CH₂/CH₃ of Lipids Amide II, Carbohydrates, Mixed Si-O deformations and Octahedral sheet vibrations (Table 14).

12. Organic aerosols – chemical composition of the water soluble and insoluble fractions:

The organic aerosol was collected from the Glass Fiber filter paper from the High Volume Samplers and the organic matter taken was the water soluble fraction.

13. Analysis of water soluble fractions of Organic aerosols:

The water soluble fraction of the organic aerosols extracted from filters (qualitative) were analysed based upon seasonal profiles by NMR spectroscopy:

I. Water soluble summer aerosol:

Functional groups identified were purely aliphatic moieties, Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons), Protons bound to oxygenated

aliphatic carbon atoms (hydroxyl or alkoxy groups), Aromatic protons and Organo Nitrates (Table 15).

II. Water soluble rainy season aerosol:

Functional groups identified were purely aliphatic Protons, Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons), Protons bound to oxygenated aliphatic carbon atoms (hydroxyl or alkoxy groups), Aromatic protons (Table 16).

III. Water soluble winter season aerosol:

Functional groups identified were purely aliphatic Protons, Protons bound to aliphatic carbon atoms adjacent to unsaturated groups like Alkenes (allylic protons) Carbonyl or Imino groups (heteroallylic protons) or aromatic rings (benzylic protons), Protons bound to oxygenated aliphatic carbon atoms (hydroxyl or alkoxy groups), Aromatic protons. (Table 17)

14. Analysis of total insoluble matter in the dust fall:

The analysis of the total insolubles have been studied in the seasonal patterns by FTIR spectroscopy.

I. Summer season total insoluble matter:

The band assignments gave imprints of absorbed water on polymeric compounds, CH₂ symmetric and CH₂ asymmetric, Amide I and

Tab. 18 FTIR analysis of total insoluble matter in summer dust fall

Bands cm^{-1}	Functional groups
3690 cm^{-1}	Outer Hydroxyl groups
3401 cm^{-1}	3402-3344 cm^{-1} OH stretching of Polymeric compounds.
2924 cm^{-1}	CH_2 Group Symmetric
2855 cm^{-1}	CH_2 group A symmetric
1651 cm^{-1}	Amide I band
1546 cm^{-1}	C-N stretching vibration of Peptidic band of Proteins Amide II band.
1424 cm^{-1}	1424-1417 cm^{-1} Phenolic OH C=O stretching of Carboxylates.
1384 cm^{-1}	Nitrates
1254 cm^{-1}	Sulphonic group of Polysachcharides
1019 cm^{-1}	Silicates Kaolinite structure
465 cm^{-1}	Quartz

Amide II, nitrates, Phenolic OH C=O stretching of Carboxylates, Sulphonic group of Polysachcharides, Silicates with Kaolinite and Quartz. (Table 18)

II. Winter Season total insoluble matter:

The band assignments gave imprints of absorbed water on polymeric compounds, CH_2 symmetric and CH_2 asymmetric, Amide I and Amide II, nitrates, Sulphonic group of Polysachcharides, Carbonyl COO-vibration, Kaolinites well ordered, Quartz. (Table 19)

3 Conclusions for the weathering of the surfaces at the Taj Mahal

The pollution load on the site can be assessed as natural and indicative also of possible anthropogenic inputs. Iron from the dust gets settled on the weak zones of the monument and can aid in crust formation. The organic fraction of the soluble dust resembles Humic like substances. Such organic compounds can also settle on the weak and weathered zones of the monuments. Emissions from industry, vehicular exhausts, burning of biomass by municipal or domestic purposes can also contribute to the chemical nature of the pollution. Such airborne anthropogenic particulate inputs have not been quantified yet in terms of magnitude, actual dispersion rates, deposition and residence time. In the overall scenario it seems that the

Tab. 19 FTIR analysis of total insoluble matter in winter dust fall

Bands cm^{-1}	Functional groups
3690 cm^{-1}	Outer Hydroxyl groups
3401 cm^{-1}	3402-3344 cm^{-1} OH stretching of Polymeric compounds.
2924 cm^{-1}	CH_2 Group Symmetric
2852 cm^{-1}	CH_2 group A symmetric
1649 cm^{-1}	Amide I band
1541 cm^{-1}	Amide II band
1385 cm^{-1}	Nitrates
1255 cm^{-1}	Sulphonic group of Polysachcharides
1240 cm^{-1}	1240-1237 cm^{-1} COO-Vibration.
1031 cm^{-1}	Kaolinites well ordered
469 cm^{-1}	470 cm^{-1} Quartz.

natural effects of aerosols seem to have a long term impact on the monument. This study has attempted to determine all possible particulate impact by analysis.

References

1. D. Banerjee Ph. D thesis, 2006, Agra University, India and references there in. Institute registered at St.Johns College, Agra
All work however done at Chemistry Department, IIT Kanpur under the research guidance and mentorship of Prof. Sabyasachi Sarkar. Total Pages 211
2. Manju C.S. N. Nair V. and Lalithambika M., Clays and Clay Mins, 49, 4, 355–369, 2001
3. Schiavon N. and Zhou L. Environ Sci Technol, 30, 12, 3624–3629, 1996
4. Gualteri M., Andrioletti M., Mantecca P., Vismara C. and Camatini M. (2005): Particle and Fibre Technology, doi 10.1186/1783-8977-2-1 March 2005

Dr. Michael Auras

Institut für Steinkonservierung e. V.
Große Langgasse 29, 55116 Mainz
auras@ifs-mainz.de

Dr. Deepankar Banerjee

Assistant Superintending Archaeological Chemist
Archaeological Survey of India office of Superintending Archaeological Chemist
63/4, Kendralaya, Sanjay Place
Agra, 282002, U.P./India

Dr. Sabine Bengel

Kunsthistorikerin und Responsable du fonds documentaire
Fondation de l'Œuvre Notre-Dame
3 Place du Château, F-67076 Strasbourg Cedex
sabine.bengel@strasbourg.eu

Dipl.-Ing. Heike Dreuse

Materialforschungs- und -prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität
Coudraystraße 9, 99423 Weimar
heike.dreuse@mfpa.de

Felix Eckel

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
eckel@geophysik.uni-kiel.de

Ercan Erkul

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
erkul@geophysik.uni-kiel.de

Moritz Fehr

Ruhr-Universität Bochum
Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik
Universitätsstraße 150, 44780 Bochum
moritz.fehr@ruhr-uni-bochum.de

Susann Halbeisen

Staatl. geprüfte Technikerin für Baudenkmalpflege und Altbauerneuerung
Denkmalpflege Mühlhausen
Huschenbeth GmbH & Co. KG
Thomas-Müntzer-Straße 15, 99974 Mühlhausen
info@denkmalpflege-muehlhausen.de

Michael Hauser

MA of Arts BFH, Konservierung/Restaurierung
Architektur-Steinkonservierung, Steinhauer
Wylersstrasse 101, CH-3014 Bern
hauser.rest@gmail.com

Dipl. Rest. (FH) Markus Huschenbeth

Denkmalpflege Mühlhausen
Huschenbeth GmbH & Co. KG
Thomas-Müntzer-Straße 15, 99974 Mühlhausen
info@denkmalpflege-muehlhausen.de

Dr.-Ing. Heike Kirsten

Ingenieurbüro für Steinsanierung und Denkmalpflege
Johannesstraße 178, 99084 Erfurt
kirsten-isd@email.de

Dr. Daniel Köhn

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
dkoehn@geophysik.uni-kiel.de

Prof. Dr. Thomas Meier

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
meier@geophysik.uni-kiel.de

Priska Rast

Betriebsökonomin FH
Graffitibeauftragte Stadt Zürich
Stadt Zürich Immobilien, Fachstelle Graffiti
Lindenhofstrasse 21, CH-8021 Zürich
graffiti@zuerich.ch

Eric Salmon

Technischer Leiter
Fondation de l'Œuvre Notre-Dame
3 Place du Château, F-67076 Strasbourg Cedex
eric.salmon@strasbourg.eu

Dipl. Rest. (FH) Philipp Schubert

Denkmalpflege Mühlhausen
Huschenbeth GmbH & Co. KG
Thomas-Müntzer-Straße 15, 99974 Mühlhausen
info@denkmalpflege-muehlhausen.de

Detlef Schulte-Kortnack

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
dsk@geophysik.uni-kiel.de

Tim Steinkraus

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Geowissenschaften
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
timstein@geophysik.uni-kiel.de

Prof. Dr. Siegfried Siegesmund

Georg-August-Universität Göttingen
Abteilung für Strukturgeologie und Geodynamik
Goldschmidtstraße 3, 37077 Göttingen
ssieges@gwdg.de

Dipl. Rest. (FH) Ute Tuch

Atelier für Denkmalpflege und Restaurierung
Haunstetterstr. 112, 86161 Augsburg

Prof. Dr. Robert Sobott

Labor für Baudenkmalpflege Naumburg
Domplatz 1, 06618 Naumburg
lfbd-sobott@t-online.de

Dr.-Ing. Hans-Werner Zier

Materialforschungs- und -prüfanstalt
an der Bauhaus-Universität
Coudraystraße 9, 99423 Weimar
hans-werner.zier@mfpa.de



Erhalten historischer Bauwerke e. V.

Wir wollen zur Erhaltung und zur Pflege unseres kulturellen Erbes einen aktiven Beitrag leisten. Im Mittelpunkt unserer Aktivitäten stehen die Denkmalpflege und die Bewahrung historischer Bauwerke sowie orts- und landschaftsprägender Ensembles.

Der Verein verfolgt anerkannt ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige und damit steuerbegünstigte Zwecke.

unsere Aktivitäten

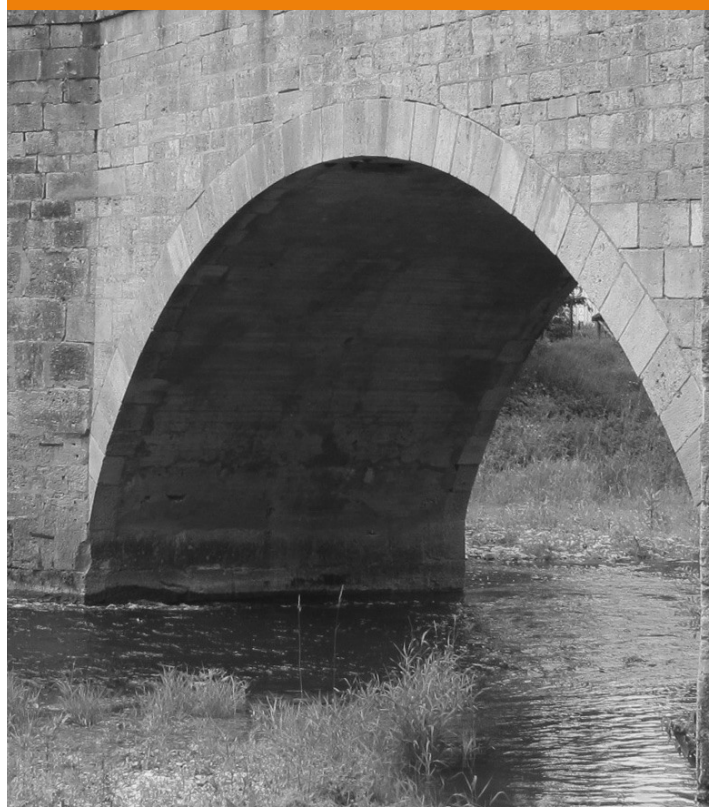
Zur Förderung der Denkmalpflege setzen wir uns ein für

- die Information von Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern im industriellen, kommunalen und privaten Bereich,
- die Initiierung und die Durchführung von Untersuchungen und Forschungsaufgaben an speziellen Objekten,
- die Einrichtung und den Betrieb eines Dokumentations- und Beratungszentrums,
- die Förderung der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft.

Wir veranstalten Seminare, Tagungen und Ausstellungen. Fachpublikationen können über den Verein bezogen werden.

Der Verein hat ordentliche und fördernde Mitglieder. Diese erhalten bei allen Vereinsaktivitäten einen Preisrabatt und werden bei der Anmeldung zu Veranstaltungen bevorzugt.

unsere Ziele



NEUES WISSEN
FÜR ALTE BAUWERKE

BAUSUBSTANZ

Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege

www.bausubstanz.de



ca. 80 Seiten je Heft
ISSN 2190-4278
erscheint viermal im Jahr

Die **BAUSUBSTANZ** ist eine Fachzeitschrift für alle, die sich professionell mit der Instandhaltung, Sanierung, Restaurierung und Pflege alter Bauwerke beschäftigen. Mit einer Mischung aus Reportagen über gelungene Sanierungsobjekte, der Vorstellung von Techniken, Baustoffen und Verfahren sowie wissenschaftlichen Beiträgen möchte die **BAUSUBSTANZ** Ihnen viermal im Jahr Neues, Bewährtes und Wichtiges aus dem weiten Feld der Bausanierung bieten.

Fraunhofer IRB Verlag
Der Fachverlag zum Planen und Bauen
www.baufachinformation.de

Bestellung:
Tel. 0711 970-2500 | Fax -2508 | E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de

Fachliteratur

Leitfaden Steinkonservierung

Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein



Rolf Snethlage, Michael Pfanner
4., überarb. und erw. Aufl. 2013,
347 Seiten, zahlr., teilw. farb. Abb., Tab.,
Kart.

ISBN 978-3-8167-8633-7

E-Book: ISBN 978-3-8167-8819-5

Der Leitfaden erklärt in verständlicher Form alles Wissenswerte über die Grundlagen der Konservierung und über die Notwendigkeit von Untersuchungen und Kontrollmessungen.

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

Leitfaden für die Planung und Ausführung von Neuverfugungen an Natursteinmauerwerk



Heike Dreuse, Hans-Werner Zier, u.a.
Bauforschung für die Praxis 114
2015, 103 Seiten, zahlr. Abb. u. Tab., Kart.
ISBN 978-3-8167-9515-5

Dieser Leitfaden ist eine praxisnahe Handlungsanweisung für Bauherren, Planer und Handwerker für die Neuverfugung von Natursteinmauerwerk. Anhand mehrerer Objektuntersuchungen wurden die Zustände von Mauerwerken aufgenommen und allgemeine Anforderungen für die Vorgehensweise abgeleitet.

Unterschiedliche Stein- und Mörtel Eigenschaften wurden erfasst und bewertet und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit unter realen Bedingungen überprüft.

Natursteinbauwerke

Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen



Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2014, 300 S., zahlr. Abb. u. Tab., Kart.
ISBN 978-3-8167-9196-6
E-Book: ISBN 978-3-8167-9197-3

Die Bausubstanz vieler Natursteinbauwerke ist durch Umwelteinflüsse gefährdet. Für die Erfassung und Bewertung von Schäden sowie für die Planung und Ausführung von Instandsetzungen ist ein umfassendes

Fachwissen erforderlich, das dieses Buch liefert. Es befasst sich ausführlich mit der Bestandsaufnahme am Gebäude, der Kartierung von Schäden sowie geeigneten Sanierungsmaßnahmen. Die Autoren gehen dabei gezielt auch auf planerische Aspekte, Strategien zur Schadensprävention und aktuelle Normen ein.

Leitfaden Naturstein-Monitoring

Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien



Hrsg.: Michael Auras, Jeannine Meinhardt, Rolf Snethlage
2010, 301 Seiten, zahlr. farb. Abb. u. Tab., Kart.
ISBN 978-3-8167-8407-4

2008 startete das Projekt »Steindenkmäler im Einfluss anthropogener Umweltverschmutzung – Entwicklung von Methoden und Kriterien zur Langzeitkontrolle von Verwitterung und Konservierung«. Ziel war es, einfache und verlässliche Messmethoden

zur Langzeitkontrolle festzulegen, die auch noch nach Jahren sicher angewandt und interpretiert werden können. In diesem Leitfaden werden die Anwendung und Auswertung der Messmethoden vorgestellt. Insgesamt 34 Beispiele werden ausführlich beschrieben.

Zur Vervollständigung Ihrer Bibliothek – die Tagungsbände der Jahre 2010 – 2015

Natursteinsanierung Stuttgart 2010

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

Natursteinsanierung Stuttgart 2011

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

Natursteinsanierung Stuttgart 2012

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

Natursteinsanierung Stuttgart 2013

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2013, 120 Seiten, zahlr. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-8924-6
E-Book: ISBN 978-3-8167-8925-3

Natursteinsanierung Stuttgart 2014

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2014, 128 S., zahlr. teilw. farb. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-9167-6
E-Book: ISBN 978-3-8167-9168-3

Natursteinsanierung Stuttgart 2015

Hrsg.: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert
2015, 136 S., zahlr. teilw. farb. Abbildungen u. Tabellen, Kartiert
ISBN 978-3-8167-9404-2
E-Book: ISBN 978-3-8167-9405-9

Fraunhofer IRB Verlag

Der Fachverlag zum Planen und Bauen

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

ISBN 978-3-8167-9598-8



9 783816 795988

Hochschule
für Technik
Stuttgart

Fakultät B, Bauingenieurwesen



IGP Ingenieurbüro
Dr. Ing. Gabriele Patitz

in Zusammenarbeit mit



Baden-Württemberg

REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART
LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE