

# Die Instandsetzung des Blauen Turms in Bad Wimpfen

Aktuelle Forschung an Kulturdenkmalen

Tagungsband zum Kolloquium am  
17. Mai 2019 in Bad Wimpfen



Fraunhofer IRB  Verlag

Herausgeber: Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

## **Die Instandsetzung des Blauen Turms in Bad Wimpfen**

Aktuelle Forschung an Kulturdenkmalen

Tagungsband zum Kolloquium am 17. Mai 2019 in Bad Wimpfen



Herausgeber: Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

# Die Instandsetzung des Blauen Turms in Bad Wimpfen

## Aktuelle Forschung an Kulturdenkmalen

Tagungsband zum Kolloquium am 17. Mai 2019 in Bad Wimpfen

Veranstalter:

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA)  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart  
<https://www.mpa.uni-stuttgart.de>

Stadtverwaltung Bad Wimpfen  
Rathaus  
Marktplatz 1  
74206 Bad Wimpfen  
<https://stadt.badwimpfen.de/rathaus.html>

Barthel & Maus  
Beratende Ingenieure GmbH  
Infanteriestr. 11a/ Geb. C  
80797 München  
<https://barthelundmaus.de/>

Landesamt für Denkmalpflege  
im Regierungspräsidium Stuttgart  
Berliner Straße 12  
73729 Esslingen am Neckar  
<https://www.denkmalpflege-bw.de/>

**Fraunhofer IRB Verlag**

Herausgeber:

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Dr. Friedrich Grüner, Dr. Jürgen Frick

Pfaffenwaldring 32

70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685-66750 und +49 711 685-63381

E-Mail: [friedrich.gruener@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:friedrich.gruener@mpa.uni-stuttgart.de), [juergen.frick@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:juergen.frick@mpa.uni-stuttgart.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-0301-3

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0302-0

Redaktion: Dr. Friedrich Grüner, Dr. Jürgen Frick

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Umschlagfotos: MPA Universität Stuttgart (Dr. Frank Lehmann, Dr. Michael Stegmaier)

Druck und Bindung: jetoprint GmbH, Villingen-Schwenningen

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 des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2019

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

## Inhaltsverzeichnis

Grußwort des Bürgermeisters von Bad Wimpfen Claus Brechter _____	7
Vorbemerkung von Professor Dr. Claus Wolf, Präsident des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart _____	9
Bauforschung am Blauen Turm als ingenieurmäßige Ursachenforschung _____ <i>Peter Kifinger</i>	11
Das Wahrzeichen retten! Wieviel Denkmal bleibt vom Turm? _____ <i>Ulrike Schubart</i>	29
Voruntersuchungen und Sanierungskonzept _____ <i>Helmut Maus</i>	37
Ermittlung eines gebäudespezifischen Bemessungswertes für die Mauerwerksdruckfestigkeit am Beispiel des Blauen Turmes in Bad Wimpfen _____ <i>Michael Stegmaier</i>	47
Numerische Modellierung des Mauerwerks im Blauen Turm auf Grundlage von kleinformatischen Mauerwerksprüfkörpern _____ <i>Josipa Bošnjak</i>	57
Bauwerksüberwachung am Blauen Turm Konzeptionierung, Instrumentierung und Betrieb eines Monitoringsystems zur Überwachung der strukturellen Integrität des Blauen Turms in Bad Wimpfen _____ <i>Frank Lehmann, Friedrich Grüner, Michael Schreiner, Jennifer Hof</i>	65
Statische Berechnungen zum staufischen Mauerwerk _____ <i>Mark Böttges</i>	75
Innovative Bindemittelsysteme für besondere Ansprüche Teil 1 – Bindemittelsystem für Mauerwerksinjektionen am Blauen Turm _____ <i>Frank Rüßmann</i>	85
Innovative Bindemittelsysteme für besondere Ansprüche Teil 2 – Formulierte Kalke als Fugenmörtel am Blauen Turm _____ <i>Petra Egloffstein</i>	89
Zustandserfassung am Mauerwerk des Blauen Turmes Mauerwerksöffnungen und Überprüfung von Injektionsmusterfeldern _____ <i>Friedrich Grüner</i>	93

Klebeversuche am Muschelkalkstein	
Ergebnisse von Rissinjektionen im Labor und an Musterflächen vor Ort _____	105
<i>Hans Ettl</i>	
Konservierung von oberflächennahen Schädigungen an Werksteinen am Blauen Turm in	
Bad Wimpfen _____	111
<i>Karl Fiedler</i>	
Objektüberwachung unter ›erschweren‹ Bedingungen	
Ein Beitrag von strebewerk. Architekten GmbH zu den Maßnahmen am Blauen Turm _____	121
<i>Stefan Schädel</i>	

## Grußwort

### Wissenschaftliches Kolloquium zur Sanierung des Blauen Turmes

Die Sanierung des Blauen Turmes zur Wiederherstellung seiner Standfestigkeit ist die seither kostenintensivste Sanierungsmaßnahme eines Einzelgebäudes in unserer Stadt. Das 800 Jahre alte Bauwerk hat in seiner wechselvollen Geschichte viele Umbaumaßnahmen, Reparaturen und Katastrophen überstanden. Die Summe all dieser Eingriffe sowie der nicht zu vernachlässigende Zahn der Zeit führten zu dem komplexen Schadensbild, das nun planerisch wie technisch äußerst anspruchsvolle, umfangreiche Sicherungsmaßnahmen erforderlich machte.

Neben seinen Funktionen als früherer Hochwachturm und touristisch wichtiger Aussichtspunkt von Bad Wimpfen, ist der Blaue Turm für die Bevölkerung unserer Stadt seit jeher von einer außerordentlich hohen emotionalen Bedeutung. Als Landmarke grüßt er den Gast wie den Heimkehrenden schon von der Ferne. In seinem Schatten aufzuwachsen bedeutet ein besonders inniges Heimatverständnis zu entwickeln. Dies und die durch viele steinerne Zeugen heute noch nachvollziehbare reichsstädtische Tradition der Stadt führen zu einem gesunden Bürgerstolz, der im Blauen Turm seinen allseits anerkannten Repräsentanten hat. Umso größer war daher auch der Schock in der Bevölkerung, als im Jahr 2012 die immensen Probleme der Gebäudesubstanz deutlich wurden. Dank der finanziellen Unterstützung des Landes, des Bundes, der Denkmalstiftungen und großzügiger privater Zuwendungen, kann die finanzielle Seite für die Durchführung der notwendigen Untersuchungen, Planungen und Bauarbeiten nach heutigem Stand dargestellt werden. Allen beteiligten Fachleuten und ausführenden Firmen sowie dem Landesamt für Denkmalpflege kann ich versichern, dass Gemeinderat und Bevölkerung mit großem Interesse hinter ihrer Arbeit stehen und dem Projekt von ganzem Herzen Erfolg wünschen.

Claus Brechter  
Bürgermeister  
Bad Wimpfen, im April 2019



## Vorbemerkung

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

der Blaue Turm in Bad Wimpfen ist nicht nur Wahrzeichen der Stadt Bad Wimpfen, sondern ist als Kulturdenkmal von besonderer Bedeutung und Denkmal von nationalem Rang ins Denkmalsbuch des Landes Baden-Württemberg eingetragen. Er steht seit jeher im Fokus denkmalpflegerischen Bemühens und ich freue mich sehr, dass seiner Sanierung nun sogar eine eigene wissenschaftliche Tagung gewidmet wurde. Für die Gelegenheit, uns im Kreise von Experten ausführlich darüber auszutauschen, danke ich der Stadt Bad Wimpfen, dem Büro Barthel und Maus und vor allem der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart sehr. Sie hat das Kolloquium als 6. Teil ihrer Vortragsreihe konzipiert, was ihm ein besonderes Gewicht verleiht und sicherlich auch dazu beigetragen hat, dass zahlreiche Teilnehmer/innen den Weg nach Bad Wimpfen gefunden haben. Dafür danke ich Herrn Kollegen Garrecht sehr herzlich.

Bevor wir uns gleich dem Bauwerk en détail zuwenden, lassen Sie mich, als Vertreter der Landesdenkmalpflege, kurz auf den Blauen Turm als Kulturdenkmal eingehen:

Wie bereits angesprochen, handelt es sich bei dem Blauen Turm um ein Denkmal von besonderer Bedeutung, d. h. er ist nach § 28 Denkmalschutzgesetz Baden-Württemberg geschützt, in das Denkmalsbuch eingetragen und genießt Umgebungsschutz. Der Blaue Turm ist der Bergfried der größten staufischen Pfalz in Deutschland, zugleich die einzige Pfalz auf Baden-Württembergischem Boden. Der im Kern stauferzeitliche Buckel-Quader-Turm über quadratischem Grundriss, erhebt sich 58 m über Bad Wimpfen und prägt mit seinen fünf Turmknöpfen unverkennbar die Stadtsilhouette hoch über dem Neckartal. Um 1200 errichtet, teilte er in den letzten mehr als 800 Jahren das Schicksal vieler historischer Bauten: mehrere Brände, 1674, 1848 und zuletzt 1984, Umbauten und Ergänzungen führten zu seiner heutigen Gestalt. Die Form seiner 1848 erneuerten Haube stammt ursprünglich aus dem Barock, die Türmerwohnung und sein neugotischer Aufbau aus dem 19. Jahrhundert.

Der Blaue Turm ist zweifellos ein in seiner Monumentalität beeindruckendes Bauwerk, das absolute Stabilität ausstrahlt, und so stört das Stahlkorsett, das er seit 2014 trägt, ein wenig das Bild. Es handelt sich dabei um eine Sicherungsmaßnahme, die im Zuge eines umfassenden Voruntersuchungsprogramms von 2012 bis 2016 angebracht werden musste. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts waren erste große Risse in der Turmwandung festgestellt worden, die im Laufe der Zeit dergestalt zunahmen, dass das Mauerwerk erheblich beeinträchtigt wurde. Ende der 1960er- und zu Beginn der 1970er-Jahre versuchte man mittels Stahlvernadelung und insgesamt 300 Tonnen Zementmörtel, den Turm zu stabilisieren, was aber die Rissbildung nicht aufhalten konnte, sodass zuletzt nur auf das Stahlkorsett als ultima ratio zur Notsicherung zurückgegriffen werden musste.

Auf der Grundlage der umfangreichen und durch Landesmittel geförderten Voruntersuchungen konnte dann im Sommer 2016 ein im Detail mit der Denkmalpflege abgestimmtes Sicherungs- und Instandsetzungskonzept mit belastbarer Kostenschätzung vorgelegt werden. Mit den Instandsetzungsmaßnahmen wurde im Herbst 2017 begonnen. Die Arbeiten wurden und werden in mehreren Bauabschnitten durchgeführt und sollen bis Sommer 2021 zum Abschluss kommen. Es werden v. a. statisch-konstruktive Maßnahmen durchgeführt, wie die Verfestigung des Füllmauerwerks durch Injektionen und das Vernadeln bzw. Verspannen der inneren und äußeren Mau-

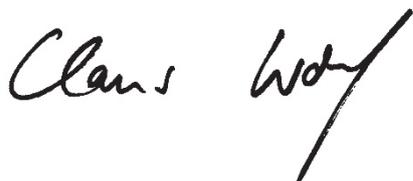
erwerksschale sowie restauratorische Maßnahmen wie die Herstellung einer gesicherten, gereinigten und witterungsgeschützten Oberfläche. Die Gesamtkosten der Maßnahmen, einschließlich der Voruntersuchungen, belaufen sich auf ca. 7,2 Mio. Euro, wovon das Land Baden-Württemberg von 2012 bis 2019 insgesamt bereits 1.722.000 Euro an Förderung aus dem Denkmalförderungsprogramm zugeschossen hat. Weitere 600.000 Euro werden der Deutschen Stiftung Denkmalschutz und über 500.000 Euro der Denkmalstiftung Baden-Württemberg verdankt. Aus dem Etat der Bundesministerin für Kultur und Medien kommen noch bis zu 400.000 Euro hinzu.

Zum Vergleich hier die Kosten und Fördersummen, die zu Beginn der 1970er-Jahre und nach dem Brand von 1984 anfielen: von den damals insgesamt 2,8 Mio. D-Mark Gesamtkosten wurden rund 876.000 D-Mark aus Mitteln der Landesdenkmalpflege bestritten.

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen ist verdienstermaßen und entsprechend seiner kulturhistorischen Bedeutung also schon immer ein Schwerpunkt der Denkmalförderung Baden-Württembergs gewesen. Diese Förderung erschöpft sich aber keineswegs »nur« in einer direkten finanziellen Zuwendung. Ihr unverzichtbarer Bestandteil ist die fachliche Unterstützung durch die Experten/innen und Spezialisten/innen des Landesamtes für Denkmalpflege. Hier ist vor allem Otto Wölbert zu nennen, unseren erst seit kurzem pensionierten Fachmann für Steinrestaurierung, der überall, wo er im Land wirkte, und damit selbstverständlich auch hier am Blauen Turm, Maßstäbe gesetzt hat. Im Namen der Landesdenkmalpflege danke ich ihm sehr dafür! Ein weiterer Dank geht an die für den Kreis zuständige Gebietsreferentin, Frau Ulrike Schubart, für ihr langjähriges Engagement für den Blauen Turm. Für ihre kontinuierliche Arbeit und das Bemühen im wahrsten Sinne des Wortes, tragfähige Lösungen für den Erhalt des Turmes zu finden, danke ich dem Ingenieurbüro Barthel & Maus, dem Büro Strebewerk und selbstverständlich den Kollegen von der MPA in Stuttgart, denen wir auch die Publikation der Tagung verdanken. Ohne des Engagements der Stadt und ihrer Bürgerinnen und Bürger ist ein solches Jahrhundertvorhaben wie die Rettung des Blauen Turmes aber nicht zu stemmen, weshalb ich auch Herrn Oberbürgermeister Brechter an dieser Stelle stellvertretend für Bad Wimpfen ebenfalls meinen Dank aussprechen möchte!

Erlauben Sie mir nun noch zum Schluss eine – rhetorische – Frage zu beantworten, die Sie sich vielleicht während der Beschreibung der Schäden am Mauerwerk des Turmes gestellt haben: »Wie lang wird dieses Bauwerk wohl noch stehen?...«.

Hierzu zitiere ich jemanden, der es schon aus ureigenem Interesse einfach wissen muss – Frau Blanca Knodel, die Türmerin des Blauen Turms, die dort jahrzehntelang in bevorzugter Lage logierte: »Der Turm steht seit 800 Jahren und das wird er auch weiterhin!«



Prof. Dr. Claus Wolf  
Präsident des Landesamtes  
für Denkmalpflege Baden-Württemberg  
Esslingen, im April 2019

# Bauforschung am Blauen Turm als ingenieurmäßige Ursachenforschung

Peter Kifinger

**Abstract:** Massive, fortschreitende Schäden am Mauerwerk des Blauen Turmes in Bad Wimpfen veranlassten im Jahr 2012 statisch-konstruktive Begutachtungen, im Zuge derer auch die Baugeschichte betrachtet wurde. Eine detaillierte Übersicht zur gesamten baulichen Entwicklungs- und Veränderungsgeschichte des Objektes, die im Rahmen einer ingenieurmäßigen Untersuchung hätte herangezogen werden können, lag bislang nicht vor. Daher wurden, überwiegend anhand graphischer und schriftlicher Überlieferungen, die baulichen Eingriffe, früheren Schäden und Sanierungen am Blauen Turm unter besonderer Berücksichtigung statisch relevanter Aspekte rekonstruiert bzw. dokumentiert. Während eines parallel am Bauwerk laufenden Untersuchungsprogramms wurde auch der Aufbau des Mauerwerks aus bauhistorischer Sicht analysiert. Aus den Ergebnissen der Bauforschung konnten wesentliche Erkenntnisse zu Schadensursachen und -mechanismen sowie Grundlagen für die Instandsetzungskonzeption abgeleitet werden.

**Keywords:** Baugeschichte, Blauer Turm, Königspfalz Wimpfen, Bauforschung, Veränderungsgeschichte, Bauphasen, Lastabtrag, Lasteinleitung, staufisches Mauerwerk, opus spicatum, Schadensgeschichte, Rissentwicklung, Instandsetzungen

## 1 Forschungsstand und Fragestellung

»Es ist schon alles gesagt, nur noch nicht von allen.« – man mag im ersten Moment an das Bonmot des Humoristen Karl Valentin denken, angesichts des hier dargelegten Unterfangens einer möglichst umfassenden Bauforschung zum Blauen Turm in Bad Wimpfen, mithin einem der markantesten Bauteile der größten deutschen staufischen Königspfalz. Anlass dieses Unterfangens war ein sehr konkreter: Zahlreiche, sich erneut verschlimmernde Risse im Natursteinmauerwerk des Blauen Turmes hatten das Regierungspräsidium Stuttgart, Referat 86 - Denkmalpflege im Jahr 2012 bewogen, eine "Auswertung von Unterlagen über statisch-konstruktive Maßnahmen, aktuelles Schadensbild und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen« in Auftrag zu geben. Im Zuge einer überblickshaften Dokumentation von Schäden, Schadensfortschritt und bisherigen statischen Maßnahmen erwies sich eine vollständige Übersicht zur Baugeschichte und besonders zur komplexen Veränderungsgeschichte des Turmes jedoch als notwendiges Desiderat.

Grundsätzlich kann auf eine durchaus umfassende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der (Bau-) Geschichte der staufischen Königspfalz von Wimpfen am Berg zurückgegriffen werden, deren systematische Erforschung, abgesehen von den überblickshaften stadtdenkmaltypischen Publikationen des 19. Jahrhunderts, mit der grundlegenden Monographie »Die Königspfalz Wimpfen« von Fritz Arens im Jahr 1967 [2] ihren (späten) Anfang nahm. Die bisher umfassendste Publikation zur Entstehungs- und Baugeschichte der Anlage lieferte neben zahlreichen Erkenntnissen zum historischen Hintergrund der Pfalz eine erstmalige, vollständige Beschreibung aller erhaltenen Bauteile mit geschichtlichem Abriss.

In der Folge entstand eine – längst nicht abgeschlossene – lose Reihe von Beiträgen zur Pfalz Wimpfen aus dem Bereich der Burgenforschung und der Archäologie des Mittelalters. Meist waren begleitende archäologische Grabungen bei Baumaßnahmen im Burgviertel (vielfach initiiert vom Verein Alt-Wimpfen) Anlass für diese Einzeluntersuchungen, unter denen etwa der durchaus spektakuläre Fund eines dritten Bergfriedes im Jahr 1983 hervorsticht [vgl. 3 / 11]. Im selben Jahr war Bad

Wimpfen auch zentrales Thema des Sammelbandes zur Mittelalterarchäologie des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg [17]. Die bislang letzte, größer angelegte Auseinandersetzung mit der Pfalz Wimpfen stellte die unter diesem Titel vor Ort stattfindende Jahrestagung der Wartburg-Gesellschaft im Jahr 2011 dar; der Tagungsband hierzu erschien 2013 [29].

In vielen der Veröffentlichungen nimmt die bis heute nach wie vor nicht abschließend geklärte Frage der genauen Datierung der Pfalz und ein darum entstandener, regelrechter »Glaubenskrieg« [29, S. 7] erheblichen Raum ein. Für den Blauen Turm etwa fehlt nicht bloß ein absolutes Baudatum, auch seine relative Einordnung in die Bauabfolge der Pfalz und insbesondere der drei Bergfriede wird nach wie vor sehr kontrovers diskutiert [4, S. 73f. / 14]. Die überwiegend kunsthistorischen bzw. archäologischen Ansätze, die die Forschungen zu Wimpfen prägen, widmen sich dabei dezidiert der Erforschung einer Kaiserpfalz in ihrer Erbauungs- und Blütezeit des 12. und 13. Jahrhunderts und der Frage nach einer wissenschaftlichen Rekonstruktion ihrer ursprünglichen Erscheinung, oder, wie es Thomas Biller beispielhaft für den Blauen Turm formulierte, dass man die »ursprüngliche Gestalt aus den erheblichen Reparaturen und Umbauten herauschält« [4, S. 74]. Spätere Veränderungen,

Umbauten und Zufügungen, mithin die gesamte Baugeschichte der Objekte im Sinne einer Veränderungsgeschichte, sind für die Pfalzgebäude Wimpfens bislang kaum systematisch behandelt worden.

Als Grundlagenermittlung im Rahmen der statisch-konstruktiven Untersuchung eines Bauwerkes mit gravierenden, die Standsicherheit beeinträchtigenden Defiziten ist die Kenntnis relevanter baulicher Eingriffe am Ursprungsbestand – und zwar bis in jüngste Zeit – allerdings unerlässlich. Mithin bedurfte es einer ingenieurmäßigen Erforschung des überlieferten Bestandes sowie aller seiner statisch relevanten Veränderungen, um daraus resultierende Schadensursachen und Schadensmechanismen ableiten und präzise Instandsetzungslösungen konzipieren zu können. Methodisch musste dies überwiegend anhand historischen Plan- und Bildmaterials sowie präziser Auswertung schriftlicher Quellen erfolgen, da der Bestand in seiner momentanen Form kaum mehr als eine grobe Überprüfung der so gewonnenen Erkenntnisse zuließ: Mehrere Brände und schließlich die Sanierung von 1971 mit einem Ausstemmen und maschinellen Verfugen der Außenmauern sowie dem Aufbringen einer vollflächigen Spritzbetonschale im Inneren machten ein Arbeiten mit Detailbefunden am Objekt nahezu unmöglich.



Bild 1 »Ansicht von Wimpfen. Nach der Natur gezeichnet, gestochen und gemalt von August Bayer 1796« [Quelle: StA Heilbronn]

## 2 Baugeschichte I: Ursprungszustand und bauliche Entwicklung bis 1848

Die frühe Baugeschichte des Blauen Turmes bzw. sein erbauungszeitlicher Zustand sind nur äußerst lückenhaft nachzuvollziehen. Gleichwohl täuscht seine heutige Erscheinung mit dem historistischen Aufsatz, dem stark überarbeiteten Mauerwerk und dem weitgehenden Verlust von Ausstattung und Baudetails darüber hinweg, dass quantitativ ein wesentlicher Teil der hochmittelalterlichen Substanz in Form des beeindruckenden, bis in eine Höhe von etwa 24,1 m erhaltenen Blausteinquaderturmes überliefert ist (alle Höhenangaben bezogen auf die unterste Treppenstufe des südseitigen Einganges). Er erhebt sich über einem annähernd quadratischen Grundriss von 10,22 m auf 10,26 m, die Mauerstärke beträgt im Sockelbereich durchschnittlich 3 m, wobei die Westseite als Hauptgriffsseite etwa 50 cm stärker ausgebildet ist als die der Pfalz zugewandte Ostseite. Bis zur obersten Lage des überlieferten staufischen Turmunterbaus nimmt die Mauerstärke in mehreren inneren Rücksprüngen ab, diese Versätze im Mauerwerk sind i.W. als die bauzeitlichen Höhenlagen der Turmgewölbe zu identifizieren, deren Decken mit mächtigen Balkenlagen ausgebildet waren [2, S. 123]. Das eigentliche Hauptgeschoss mit Aborterker und dem typischen Hocheingang liegt heute, durch Geländeabtrag bedingt, etwa 10,6 m (historisch ca. 7 m) über dem Straßenniveau. Außen war ein hölzerner Zugangsbalkon vorgelagert, dessen vermauerte Balkenlöcher noch Anfang des 20. Jahrhunderts zu erkennen waren. In der untersten Ebene bestand jahrhundertlang ein als Gefängnis genutzter Gewölberaum »ohne Verbindung mit dem übrigen Innenraum« [18, S. 174] – da es jedoch bis 1852 keinen ebenerdigen Zugang in den Turm gegeben hatte, war dieser Raum wohl von innen über eine Falltür und Leiterstellungen erreichbar. Die genaue Höhenlage des 1848 zerstörten Gewölbes lässt sich nicht mehr nachvollziehen, da es »offenbar gründlich beseitigt und der innen entstandene Ausbruch gut verblendet wurde«, wie Arens noch vor Auftrag der Spritzbetonschale im Turminnen feststellen konnte [2, S. 122]. Die heutige Stockwerksteilung geht ohne historischen Bezug auf den Innenausbau nach dem Brand von 1848 zurück (s.u.), zudem wurden 1944 aus Luftschutzgründen im unteren Drittel zwei Stahlbetondecken eingezogen. Bei dem einzigen äußeren Mauerrücksprung auf einer Höhe von 16,5 m handelt es sich, wie das

einheitliche Mauerwerk zeigt, nicht um eine Zäsur zweier Bauphasen. Ungewöhnlich ist, dass diese Kante auf der Westseite nur in den Eckbereichen vorzufinden ist, während der mittlere – leicht vorgewölbte – Teil der Mauer quasi ohne jeglichen Versatz durchläuft. Ob möglicherweise bauliche Probleme während der Ausführung den Absatz hervorbrachten, lässt sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht nachweisen.

Noch weitaus weniger ist zum bauzeitlichen oberen Abschluss des Blauen Turmes bekannt. Ein entscheidender Aspekt ist hierbei das (durchaus ungewöhnliche) Fehlen aussagekräftiger Stadtansichten aus der Zeit vor der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert. Auch bei Merian findet sich keine Darstellung Wimpfens in Form jener recht detaillierten Veduten, die ansonsten für die allermeisten Reichstädte vorliegen. Anhand einiger schematischer Darstellungen sowie über Analogieschlüsse ist aber zumindest eine ungefähre Vorstellung zu den frühen Dachabschlüssen des Blauen Turmes möglich.

### 2.1 Bauphase 1:

Für den ursprünglichen Zustand als Bergfried der staufischen Kaiserpfalz zu Beginn des 13. Jahrhunderts lässt sich ein abschließender Zinnenkranz als Brustwehr einer Wachplattform rekonstruieren, die von einem eher flachen Zeltdach bedeckt wurde [vgl. 21, S. 221f.].



Bild 2 Darstellung Wimpfens in einer Wandmalerei des 15. Jh. Der Blaue Turm ist der markante Bau in Bildmitte. [Quelle: Arens 1967, S. 51]

Die Dachkonstruktion selbst dürfte als relativ schlichte, zimmermannsmäßige Holzkonstruktion aufgeführt worden sein, entweder direkt auf die Zinnen aufgesetzt oder aber als eigene Ständerkonstruktion, deren Schwellen und Pfosten um Umgangsbreite hinter der Brustwehr zurückgesetzt waren [21, S. 222]. In beiden Fällen handelte es sich

um einen sehr leichten Aufbau, dessen geringe Lasten je nach Ausbildung überwiegend auf der äußeren oder inneren Mauerschale auflagerten (Bild 3). Eine Wandmalerei in der Kreuzkapelle im nahen Duttenberg aus dem späten 15. Jahrhundert (Bild 2) liefert hierzu einen Hinweis. Zwar kann dieser einfache Stadtprospekt, der den Hintergrund eines sakralen Motivs bildet, nicht zweifelsfrei als Darstellung Wimpfens angesehen werden, die Abfolge der einzelnen Bauten erinnert aber recht genau an die Stadtsilhouette, wie sich diese von Duttenberg aus dem Betrachter präsentiert. Sowohl der Rote wie auch der Blaue Turm, der als markantester Bau in dem Gefüge gezeigt wird, tragen jenes typische, schlichte Pyramidendach. Interessanterweise findet sich die seltsam verzerrt anmutende Bau-gruppierung rechts des Blauen Turmes, die nur vage als die zweitürmige Stadtkirche zu identifizieren ist, in fast identischer Weise auch auf einem wesentlich späteren und genaueren Stich von 1796, der Wimpfen aus nahezu gleichem Blickwinkel zeigt (Bild 1).

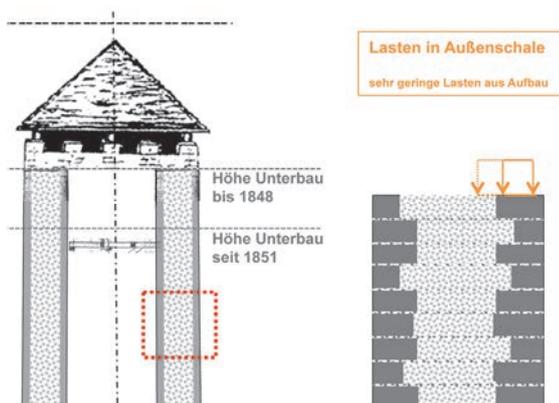


Bild 3 Lastenleitung in den Natursteinunterbau in Bauphase 1 (~1300 bis ~1450) (Schemaskizze)

## 2.2 Bauphase 2:

Eindeutige Belege für eine zweite, spätmittelalterliche Bauphase fehlen zwar (bislang), doch aufgrund der nachgewiesenen Funktion des Blauen Turmes als Hochwacht der Reichsstadt, die dauerhaft mit einem Türmer besetzt war, kann ein Umbau im Spätmittelalter als relativ gesichert angesehen werden. Im Unterschied zur vormaligen Verteidigungsfunktion mit stets nur kurzfristiger Besetzung der Wehrplattform musste ein geeigneter Innenraum geschaffen werden, der einen dauerhaften Wohnaufenthalt ermöglichte. Hierzu sind zahlreiche zeitgenössische Vergleichsbeispiele für die erhöhten Komfortanforderungen bei solchermaßen genutzten Türmen und dementsprechende Aufbauten überliefert. Einen ungefähren Eindruck eines nun

wesentlich höheren, aufwendigeren Turmaufbaus geben zwei sehr schematische Darstellungen Wimpfens aus der Zeit des Dreißigjährigen Krieges. Die Stiche zur *Schlacht von Wimpfen* im Jahre 1622 zwischen den katholischen Truppen Tillys und dem protestantischen Markgrafen von Baden-Durlach zeigen neben ausführlich illustriertem Kriegsgeschehen auch staffagehafte Ansichten der nahegelegenen Reichsstadt (Bild 4).

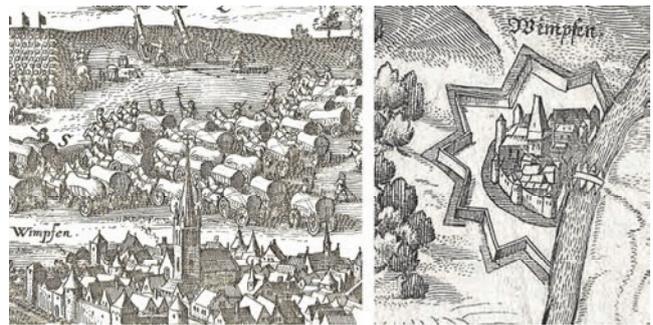


Bild 4 links: Ausschnitt aus dem »Theatrum Europaeum« von Mathäus Merian, rechts eine Darstellung Wimpfens aus »Aurea austriaca« von Nicolaus Bellus [Quelle: Bayerische Staatsbibliothek]

Da in beiden Fällen keine getreue Wiedergabe der Einzelbauten vorliegt, scheint es plausibel, den jeweils größten einzelnen Turm als den Blauen Turm zu identifizieren, was dessen Dimension und Lage am höchsten Punkt der Stadt entspricht. Bei Nicolaus Bellus trägt dieser Turm ein gut erkennbares zusätzliches Geschoss mit hohem Spitzhelm, während in Matthäus Merians berühmtem *Theatrum Europaeum* ein ebenfalls von einem Spitzhelm bekrönter Turm mit vier Ecktürmchen erkennbar ist - dass dieser scheinbar an eine Kirche angefügt ist, darf man der bloß illustrierenden Funktion des am unteren Bildrand platzierten Städtchens zuschreiben; vedutenhafte Genauigkeit ist hier nicht zu erwarten.

Dennoch lassen sich die beiden, immerhin dezidiert als Darstellungen Wimpfens bezeichneten Miniaturen recht gut mit einer auf das Jahr 1609 datierten Darstellung in einem Predigtbuchbild aus Leingarten bei Heilbronn in Deckung bringen. Wie schon in der Duttenberger Darstellung als Hintergrund eines sakralen Motivs, ist hier neben einem Bau mit Treppengiebel, der an das sogenannte Steinhaus erinnert, ein Turm mit einem steilem Spitzhelm und Ecktürmchen über einem eingeschossigen Fachwerkaufbau wiedergegeben (Bild 5). Es muss jedoch als fraglich gelten, ob es sich bei dem dargestellten Bauensemble tatsächlich, wie meist kolportiert, um eine Ansicht von Wimpfen handelt.



Bild 5 Darstellung des Blauen Turmes in einem »Predigtbuch« aus Leingarten bei Heilbronn [Quelle: StA Bad Wimpfen]

Für einen Zeitraum etwa vom 15. Jahrhundert bis zum Jahr 1674 ist also von einem größeren Aufbau mit mindestens einem Geschoss aus Fachwerkwänden, möglicherweise mit leichter Auskrugung, auszugehen, über dem sich das hölzerne Dachwerk eines steilen Spitzhelmes mit Ecktürmchen erhob. Die Lasten dieses nun bereits deutlich schwereren, im Vergleich zum mächtigen Mauerwerk des Unterbaus aber gewichtsmäßig wohl vernachlässigbaren Aufsatzes lagerten nun vollständig und ggf. leicht exzentrisch auf der äußeren Mauerschale auf (Bild 6).

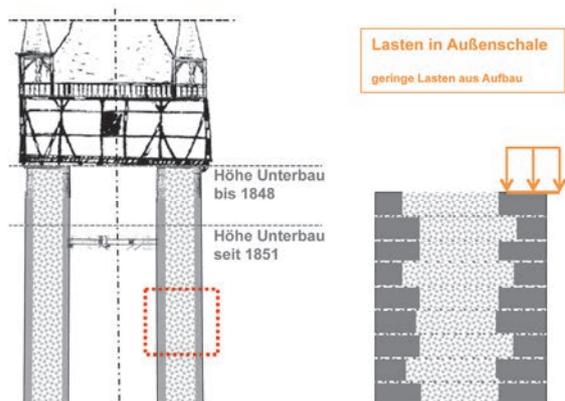


Bild 6 Lastenleitung in den Natursteinunterbau in Bauphase 2 (~1450 bis 1674) (Schemaskizze)

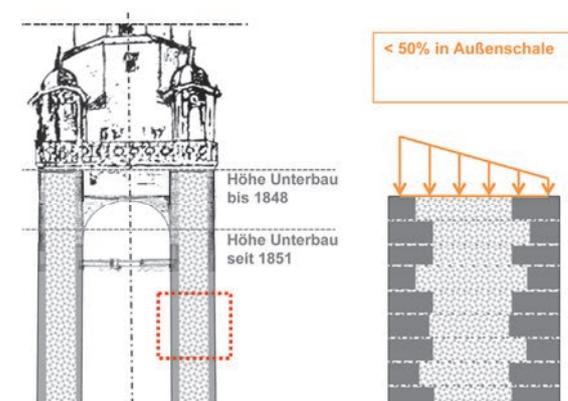


Bild 7 Lastenleitung in den Natursteinunterbau in Bauphase 3 (1674 bis 1848) (Schemaskizze)

### 2.3 Bauphase 3:

Zahlreiche Blitzeinschläge aufgrund seiner exponierten Lage wie auch größere Stadtbrände führten immer wieder zu Schäden und größeren Zerstörun-

gen am Blauen Turm. Der Chronist Ludwig Frohnhäuser erwähnt beispielsweise, dass der Blaue Turm 1657 »restaurirt« wurde. Wenige Jahre später, am 16. Januar 1674, kam es zu einem größeren Feuer im Burgviertel; hierbei wurden 30 Gebäude zerstört und »auch der Blaue Turm brannte gänzlich aus« [9, S. 362]. Beim anschließenden, schon 10 Tage später vom Rat der Stadt beschlossenen Wiederaufbau [28, S. 28] erhielt er dann jenen barocken Abschluss, dessen Grundstruktur eines mehrfach abgetreppten, oktogonalen Aufbaus mit geschweiften Dächern und Ecktürmchen in einer Vielzahl von Veduten ab dem Ende des 18. Jahrhunderts festgehalten ist. Darüber hinaus liefert eine anonyme Zeichnung vom 4. April 1844, die den Blauen Turm von Osten zeigt (vgl. Bild 8), sehr genaue Angaben zum barocken Zustand: Auf dem staufischen Bergfried befindet sich nun ein um Umgangsbreite zurückgesetzter, im ersten Geschoss quadratischer Turmaufbau, wohl die Türmerwohnung, mit größeren Fensteröffnungen. Im zweiten Geschoss geht der Aufbau in einen Oktogongrundriss über und verjüngt sich allseitig zu einem dritten, niedrigeren Geschoss; den Abschluss bildet eine geschweifte Haube mit aufgesetzter, offener Laterne. Die putzsichtigen Außenwände dürften aller Wahrscheinlichkeit als Fachwerkbau ausgebildet worden sein. Die Türmchen an den Ecken waren offene, baldachinartige Konstruktionen mit filigranem Holzständerwerk, ihren oberen Abschluss bildeten gleichfalls geschweifte Hauben.

Anhand dieser Disposition lagerten die Lasten aus dem nunmehr nach innen versetzten Turmaufbau erstmals rein auf der inneren Mauerschale bzw. teils auf dem Füllmauerwerk. Als Substruktion für den neuen Abschluss waren, wohl auf einem beste-

henden Mauerabsatz, im obersten Geschoss des Unterbaus an allen vier Seiten Mauerwerksbögen vor die innere Schale gesetzt worden (Bild 7).

### 3 Baugeschichte II: Der Brand 1848 und der folgende Wiederaufbau (Bauphase 4)

An baulicher Substanz ist vom barocken Turmabschluss allerdings ebenso wenig überliefert wie von seinen möglichen Vorgängern, da der Blaue Turm in einer kalten Januarnacht des Jahres 1848, »während das Wasser allenthalben gefroren war« [18, S. 173], bis auf den Mauerwerksunterbau ausbrannte.

Ein Stadtbrand in unmittelbarer Umgebung hatte ausgerechnet auf den Sitz der Hochwächters übergegriffen, da durch Funkenflug die hölzernen Ecktürmchen entzündet worden waren. Nach rascher Ausbreitung des Feuers auf den gesamten Aufbau – der Türmer konnte in letzter Minute gerettet werden – stürzte die Glocke im Turm herab und durchschlug das gemauerte Gewölbe des Gefängnisses. Der Brand im Innern des steinernen Turmes muss, genährt von den hineinstürzenden Resten des Aufbaus und den hölzernen Zwischendecken, so gewaltig gewesen sein, dass aufgrund der hohen Temperaturen erst nach 14 Tagen mit den Aufräumarbeiten begonnen werden konnte [Friedrich Feyerabend in 28. S. 32f.]

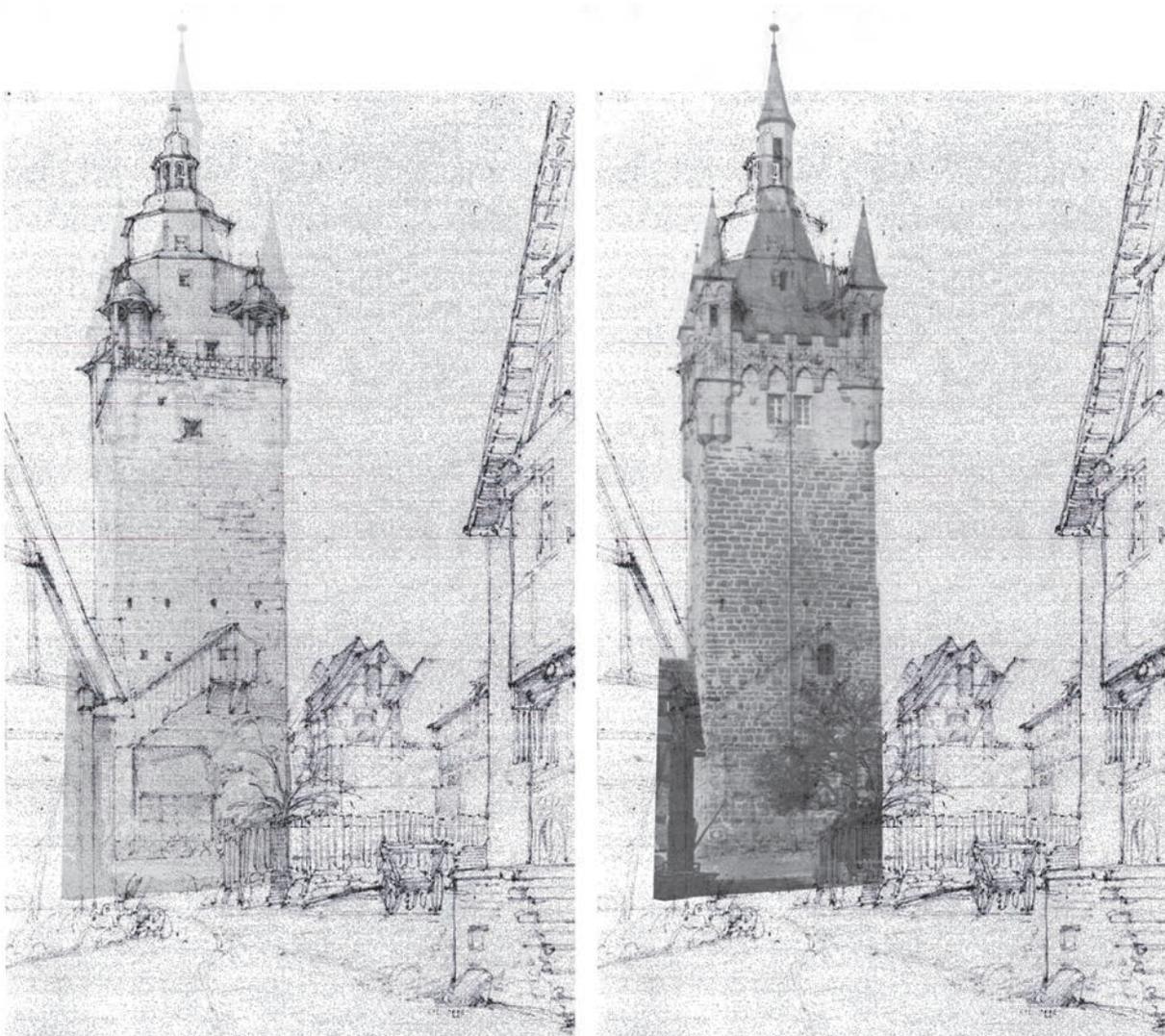


Bild 8 Der Blaue Turm mit barockem Aufbau vor 1848 (links; anonyme Zeichnung von 1844) und nach dem Wiederaufbau von 1851/52 (rechts; Fotografie von G. Leins um 1900). [Quelle: StA Bad Wimpfen / Arens 1967, S. 54; Grafiküberlagerung: Barthel & Maus]

Erste Planungen zur Wiederherstellung wurden kurz darauf von dem Darmstädter Architekten Misselbeck vorgelegt (Bild 9). Wie schon beim barocken Abschluss sah dieser vor, dass die Türmerwohnung, nun von einem gefalteten Spitzhelm in romanischen Formen bekrönt, für einen Umgang etwas zurückgesetzt werden sollte. Somit wären die Lasten von Türmerwohnung und Turmhelm in der inneren Hälfte auf den Querschnitt des mittelalterlichen Mauerwerks aufgetroffen. Lediglich die vorkragenden Ecktürmchen hätten ganz auf der äußeren Mauerschale aufgestanden. Ebenfalls in dieser Planung taucht als neuer Zugang anstelle des Hocheingangs erstmals die in den Sockel der Südmauer eingebrochene ebenerdige Türe auf, nachdem schon 1846 das Gelände um den Turm herum abgetragen und dabei das grob bearbeitete Fundamentmauerwerk über eine Höhe von etwa 3 m freigelegt worden war [2, S. 120].

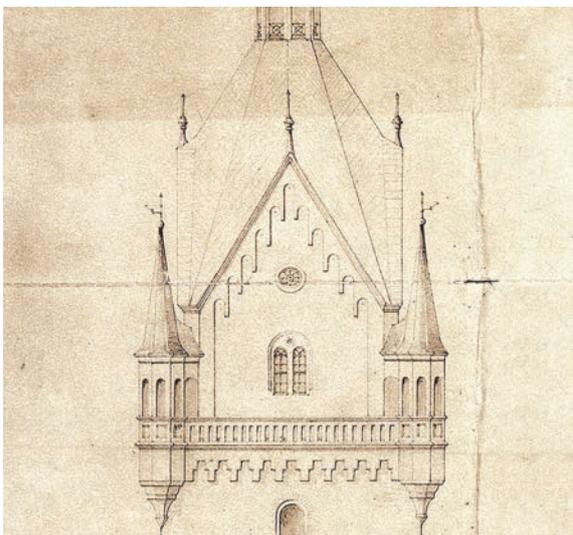


Bild 9 Aufriss des Turmaufbaus nach Entwurf von Misselbeck, 1848 [Quelle: StA Bad Wimpfen]

Bereits im Vorfeld des Wiederaufbaus hatte man das durch den Brand sicherlich in Mitleidenschaft gezogene mittelalterliche Mauerwerk des Turmes hinsichtlich seiner »Haltbarkeit und Tragfähigkeit [...] durch Stadtbaumeister De Millas, Heilbronn und drei Wimpfener Maurermeister« überprüfen lassen [25, S. 38]. Während der allgemeine Zustand des Unterbaus offenkundig als ausreichend standfest angesehen wurde, um einen Wiederaufbau in Angriff zu nehmen, muss die Begutachtung ergeben haben, dass die Substanz im oberen Teil schadhhaft war. Aus den Misselbeck'schen Planungen ist ersichtlich, dass das historische Mauerwerk bis auf eine Höhe von 94 hessischen Fuß (23,5 m) abgetragen und anschließend auf die ursprüngliche Höhe neu aufgemauert worden wäre. Mithin hätte am

oberen Abschluss des staufischen Turmes sogar mehr entfernt werden sollen, als dies letztlich geschehen ist – das bauzeitliche Mauerwerk ist heute bis in eine Höhe von gut 24 m erhalten.

Die Revolutionswirren und die Knappheit der Mittel verzögerten die Ausführung und anders als nach dem Brand im 17. Jahrhundert war ein Wiederaufbau des Turmes durchaus umstritten; nur die Zweckbindung der Versicherungssumme führte schließlich zur Wiederaufnahme der Planungen. Aus Kostengründen wurde Kreisbaumeister Frank mit einem reduzierten Entwurf beauftragt; nach dessen vorzeitigem Tod übernahm der hessische Bauaufseher Haensel die Planungen. Unterzeichnet sind die Ausführungsentwürfe mit dem Namen Horst, der wohl auch für die Ausführung verantwortlich war. Bei der schließlich 1851/52 umgesetzten Planung wurde ein offener Umgang auf dem mittelalterlichen Unterbau aufgegeben, stattdessen wurden die Mauern der Türmerwohnung außenbündig auf den historischen Teil aufgesetzt (vgl. Bild 13). Flankiert wird der nun erheblich größere, quadratische Aufbau von Ecktürmchen aus Quadermauerwerk, die auf vorkragenden Konsolen aufsitzen und zweigeschossig angelegt sind. Den Umgang mit vorkragender steinerner Zinnenbrüstung verlegte man oben auf die Türmerwohnung; darüber erhebt sich dann der steile hölzerne Spitzhelm mit Laterne (Bild 10).

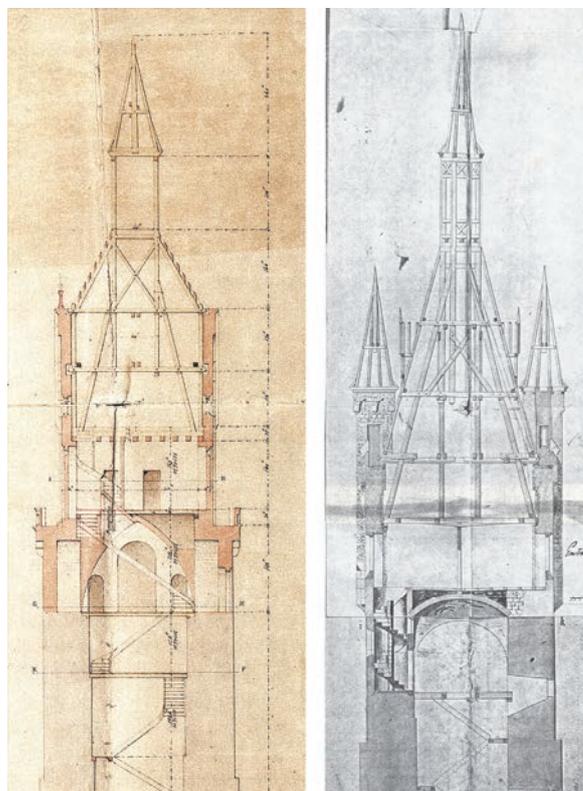


Bild 10 Schnitte des Turmaufbaus von Misselbeck (links) und Haensel (rechts) [Quelle: StA Bad Wimpfen]

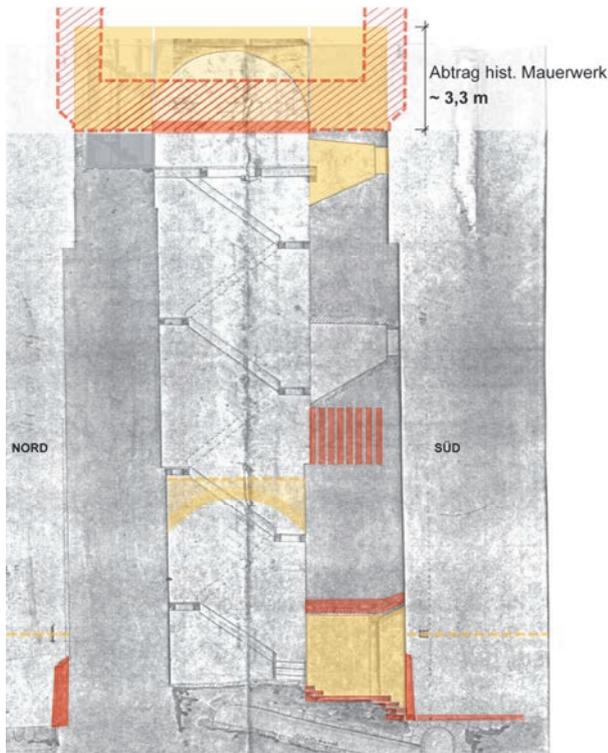


Bild 11 Umbauten am mittelalterlichen Turmunterbau im Zuge der Wiederherstellung 1851/52. Bestand= grau / Abbruch= gelb / Neubau= rot.

Wie schon bei Misselbeck berücksichtigt, musste der obere Teil des Bestandsmauerwerks aufgrund von Brandschäden und der jahrelangen Bewitterung des ungedeckten Umganges abgetragen werden.

Im Gegensatz zu den ersten Planungen wurde der Unterbau jedoch nicht wiederaufgemauert: Das großformatige Quadermauerwerk reicht ohne erkennbare Zäsur bis unmittelbar an den neugotischen Aufbau heran, und da keine weiteren Baufugen am Bestand erkennbar sind, kann ein Wiederrichten des abgetragenen Mauerwerks ausgeschlossen werden, was auch mit den Berichten aus der Wiederaufbauzeit in Deckung zu bringen ist: »Nach Entfernung der verkalkten Steine des Obertheils wurde der noch erhaltene Theil des Thurmes mit einem feuerfesten Gewölbe abgeschlossen und darüber der jetzige Neubau aufgesetzt [...]« [18, S. 174f.]. Erich Scheible nennt für die Arbeiten sogar sehr genaue Maßangaben, laut derer von dem „oberen verkalktem Mauerwerk, welches man zuvor zur Überprüfung seiner Festigkeit an einer Stelle aufgegraben hatte und das nun 13 Fuß [3,25 m] hoch abgebrochen werden sollte, seiner mangelnden Festigkeit wegen einige Fuß mehr entfernt werden mußte« [25, S. 43].

Tatsächlich ergibt sich aus der Überlagerung der historischen Pläne und dem heutigen Bestand, dass die Höhe des staufischen Turmes um mindestens 3,3 m verringert wurde. Dabei verschwand quasi das gesamte oberste Stockwerk »samt der Verstärkungsbogen« [2, S.124], die den zurückversetzten barocken Aufsatz getragen hatten. Der reduzierte Unterbau wurde daraufhin mit der bis heute erhaltenen flachen Gewölbetonne abgeschlossen (vgl. Bild 11).

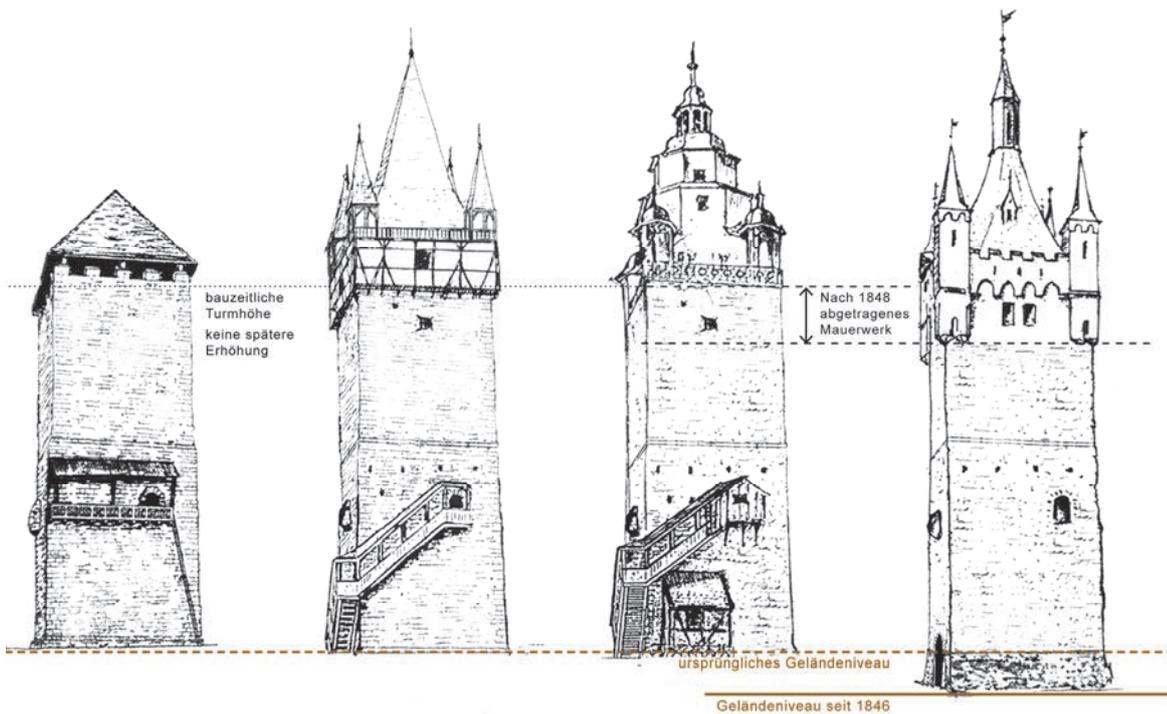


Bild 12 Übersicht zu den vier Bauphasen des Blauen Turmes [Quelle: Barthel & Maus nach Geipert/Haberhauer]

Die Zweifel an der Tragfähigkeit des historischen Mauerwerks blieben indes während der Wiederaufbauphase trotz vorheriger Begutachtung bestehen; der Rat der Stadt stellte gar mehrfach den Antrag, »die Großherzogliche Oberbaudirektion solle eine zehnjährige Garantie dafür leisten, weil [der Rat] daran zweifelte, daß der untere Teil die Tragfähigkeit besitze, die Last zu tragen« [25, S. 43]. (Der damalige Bürgermeister sollte mit seiner saloppen Entgegnung »nicht für zehn Jahre wird es eine [...] Behörde mit gutem Gewissen tun können, sondern für 500 Jahre«, arg danebenliegen.) Mehrere statische Maßnahmen des Wiederaufbaus zeigen, dass auch den Ausführenden gewisse Bedenken in Hinsicht auf den Natursteinunterbau nicht gänzlich fremd waren: »Die Basis [wurde], um dem Thurm mehr Festigkeit zu geben, mit einem Sockel umzogen, und um die Stärke der Mauern zu vermehren, füllte man die oberen Gefängnisse in der Wandung mit Mauerwerk aus« [18, S. 174f.]. Der mit Ausnahme der Ostseite den Turm umschließende Sockel wurde dem freigegrabenen ehemaligen Fundamentmauerwerk allerdings nur vorgeblendet – Horst hatte sich in Kenntnis des Mauerwerksaufbaus mit relativ loser Füllung »in sehr einsichtiger Weise gegen das geplante Einstemmen eines Sockels in die äußere Mauerchale widersetzt« [30, S. 50]. Dafür wurde die Ausmauerung der »Gefängnisse«, gemeint ist hier der in die Mauerstärke eingelassene, gewinkelte Zugang zum Aborterker, äußerst sorgfältig ausgeführt (vgl. Abb 11). Die Tatsache, dass bei der ab 1971 erfolgten Mauerwerksinjektion in diesem Bereich der Südwand nur verhältnismäßig geringe Mengen an Zement eingebracht werden konnten, belegt ein vollständiges Verschließen der Hohlräume mit festem Mauerwerk (vgl. Abb 21).

Zur Verstärkung des Unterbaus ließ Horst zudem insgesamt vier Anker direkt unterhalb der Türmerwohnung in das mittelalterliche Mauerwerk einziehen; die heute nicht mehr vorhandenen Anker wurden vermutlich im Zuge der von Klaus Pieper projektierten statischen Maßnahme durch neue Spanankergervierten ersetzt und daraufhin rückgebaut.

#### 4 Bauhistorische Bemerkungen zum Lastabtrag

Angesichts der grundlegenden Umgestaltungen, die der Turmaufbau im Laufe seiner 800-jährigen Baugeschichte erfuhr, haben auch die damit verbundenen Änderungen der Lasteinleitung in den historischen Natursteinunterbau einen nicht zu vernachlässigenden Stellenwert. Anhand der Erkenntnisse zu den frühen Bauphasen waren die Lasten aus den

zugehörigen Turmabschlüssen recht gering und angesichts des immensen Eigengewichts des ursprünglich gut 27 m hohen und im Schnitt mehr als 2,7 m starken Natursteinmauerwerks eher vernachlässigbar (vgl. Bild 3 und 6). Auch der 1674 errichtete barocke Aufbau dürfte keine signifikante Lasterhöhung mit sich gebracht haben, wohl aber eine erstmalige Lastumlagerung. Die um Umgangsbreite zurückgesetzte Konstruktion saß, wie erwähnt, über die beim Wiederaufbau entfernten Entlastungsbögen ausschließlich auf der inneren Schale des mehrschaligen Mauerwerks (vgl. Bild 7).

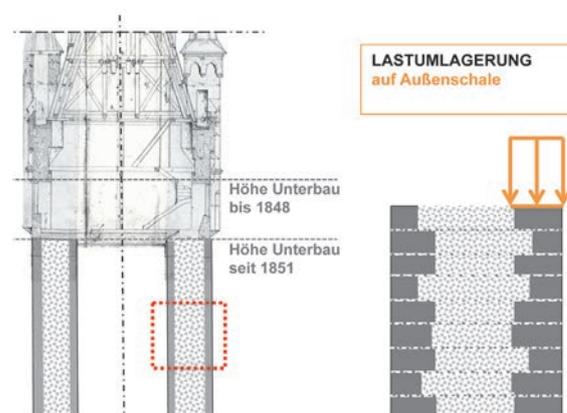


Bild 13 Lasteinleitung in den Natursteinunterbau in Bauphase 4 (nach 1852) (Schemaskizze)

Der Neubau des Turmabschlusses in den Jahren 1851/52 führte also nicht zu einem neuen Erscheinungsbild, sondern auch zu einer genauen Umkehrung der Lasteinleitung: Der neugotische Aufbau wurde nach außen hin bündig auf das Bestandsmauerwerk, mithin also rein auf die äußere Schale aufgesetzt. Ecktürme und Brüstung des Umgangs kragen darüber hinaus, belasten also die Außenschale sogar leicht exzentrisch (Bild 13). Weiterhin leiten die knapp 1m starken Bruchsteinmauern der Türmerstube das Eigengewicht des gesamten Turmaufbaus mit seinem hohen Spitzhelm aufgrund der mittig angeordneten, in einer Nische gruppierten Fenster überwiegend in die Eckbereiche des Unterbaus ein, die damit höher beansprucht sind als die Wandmitte. Eine derartige Lastkonzentration auf die Außenschale und dort wiederum auf die Randbereiche war vor 1848 definitiv nicht vorhanden. Durch die Verwendung von massivem Natursteinmauerwerk und die beträchtliche Höhe der Holzkonstruktion des Turmhelmes erreichte nun auch erstmals das Eigengewicht des Turmabschlusses eine relevante Größenordnung – allerdings nur in Verbindung mit der geometrischen Komponente des Lastabtrages. In vielen historischen Berichten, auch noch im Zusammenhang mit der statischen

Sicherung 1971, wird häufig die »enorme Auflast der Turmkrone« [7, S. 34] von 1851/52 als Ursache der Schäden im mittelalterlichen Natursteinmauerwerk angesehen. Rechnet man jedoch überschlägig das Gewicht des heutigen Aufbaues gegen die Masse des beim Wiederaufbau entfernten historischen Mauerwerks sowie der barocken Substanz, so ergibt sich, dass sich die absoluten Lasten, die der verbliebene Unterbau aufnehmen muss, nicht nennenswert erhöht hatten. Verändert hatte sich – wie schon in den vorangegangenen Bauphasen – also im Wesentlichen die **Lastenleitung**.

## 5 Exkurs: Das »staufische« Mauerwerk des Blauen Turmes

Eines der bekanntesten, man möchte sagen populärsten Merkmale staufischer Bauten stellt der sogenannte Buckelquader dar. Bei dieser Steinmetztechnik werden die Kanten mit einem sauberen Randschlag hergestellt, wogegen die dabei stehengebliebene Bosse nicht abgearbeitet wird, sondern, mehr oder weniger roh belassen und deutlich vorspringend, zur »wehrhaften« Erscheinung solchermaßen ausgeführter Bauwerke beiträgt. Beim Blauen Turm liegt, da der Randschlag fehlt, kein Buckelquadermauerwerk im engeren Sinne vor, auch wenn durchaus vorstehende Bossen auftreten (Bild 14).



Bild 14 Staufisches Blausteinmauerwerk am Blauen Turm mit teils vorspringenden Bossen

Wohl aber handelt es sich gemäß Zeitstellung und Kontext eindeutig um »staufisches« Mauerwerk und so wird dem Natursteinunterbau des Blauen

Turmes auch technisch eine gewisse »Erwartungshaltung« zuteil: »Angemerkt sei hier noch eine Unstimmigkeit bei der Beurteilung des Mauerwerks des Blauen Turmes. Cichy spricht von ‚mit fast bindungslosem Bruchgestein verfülltem Zweischalengemäuer‘, in das bei Zementinjektionen während der 1971 erfolgten Sanierung 300 Tonnen Zementmörtel verpresst werden mussten. Diese ‚ruinöse Mauertechnik‘ wäre in staufischer Zeit bei Großbauten einzigartig [...]“ [14, S. 47]. Dabei sind genaue Beschreibungen einer staufischen Mauertechnik in der diesbezüglichen Literatur äußerst rar, zu den wenigsten Buckelquaderbauten liegen überhaupt schriftlich festgehaltene Erkenntnisse zum inneren Aufbau, besonders des Füllmauerwerks, vor. In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung dominiert in auffälliger Weise fast ausschließlich die ikonographische Komponente der Bauweise. Doch auch wenn dieses Mauerwerk wohl schon in der erbauungszeitlichen Anwendung oftmals als »Bedeutungsträger« [26] fungierte, war es zuerst einmal eine Bearbeitungs- und Bautechnik im Steinbau der Stauferzeit. Bezeichnenderweise ist im Zusammenhang mit Buckelquadermauerwerk auch sehr häufig von einer »Verkleidung« – gleichsam im Semperschen Sinne – die Rede. Dies täuscht darüber hinweg, dass die beiden äußeren Schalen und ihre jeweilige Verzahnung mit dem Mauerwerk statisch eine Einheit bilden. Die sichtbaren Buckelquader sind, bei all ihrer Bedeutungsqualität, keineswegs eine reine Verkleidung, sondern Teil der Konstruktion. Mithin sind Herstellungstechniken und unterschiedliche Konstruktionsweisen, insbesondere des Füllmauerwerks, aus bauhistorischer und denkmalpflegerischer Sicht von großem Interesse.

Die ab 2012 am Blauen Turm durchgeführten, interdisziplinären Voruntersuchungen, die explizit eine Analyse des Mauerwerks in technischer Hinsicht zum Ziele hatten, zeigten unter anderem den großen Einfluss der Verfügbarkeit von Rohstoffen auf die Ausführung und damit die technischen Eigenschaften des Mauerwerks; gut ablesbar an den beiden erhaltenen Bergfriede der Pfalz Wimpfen: Für den fast idealtypisch staufischen Quaderunterbau des Roten Turmes, der durch seine Doppelfunktion als Bergfried und (vermutlich kaiserlicher) Wohnturm ausgezeichnet ist, wurde mit beträchtlichem Aufwand Sandsteinmaterial herbeigeschafft, das eine sorgfältige steinmetzmäßige Bearbeitung, mithin die Ausbildung sauberer Buckelquader zuließ. Die große, nicht von derart repräsentativen Anforderungen beaufschlagte Baumasse des Blauen Turms konnte hingegen am besten durch die Verwendung des lokal im Neckartal anstehenden Muschelkalks, des sog. Blausteins, bewältigt werden.

Der plattig brechende Stein ließ recht gut die Herstellung umlaufend gleich hoher, »quaderähnlicher« Steinschichten zu, die gegenüber einfachem Bruchsteinmauerwerk weit besser geeignet waren, die Lasten eines Turmes von so beträchtlicher Höhe aufzunehmen und ein entsprechend wehrfähiges Bauwerk zu schaffen. Ein »Import« von hochwertigerem Sandstein war also nicht zwingend nötig. Das lokale Baumaterial ließ sich aber quer zu seiner geologischen Schichtung steinmetzmäßig nur mäßig gut bearbeiten, weshalb die Herstellung von Buckelquadern mit sauberem Randschlag und einigermaßen ebenmäßiger Quaderform auch in die Tiefe des Mauerwerks hinein mit diesem Stein nicht zu leisten war. Die sichtbare Stirnseite konnte zwar leidlich rechteckig abgearbeitet werden, die Gesamtform der Steine, insbesondere bei den tiefen Bindersteinen, ist jedoch oft eher die einer Platte mit unregelmäßig gebrochenen Rändern. Die in sich gleichmäßig hohen horizontalen Steinlagen am Blauen Turm mit stets ohne Versatz durchlaufenden Lagerfugen, aber zueinander deutlich variierenden Höhen (der Steinlagen) dürften somit Folge des verwendeten Rohstoffes sein: je nachdem, wie die Steine sich beim Brechen entlang ihrer geologischen Schichtung zurichten ließen, wurden fast würfelförmige Quader, großformatige Bindersteine und dünne Platten ihrer Höhe nach zusammensortiert und lagenweise verbaut (Bild 15).



Bild 15 Auswertung der Steinlagen am Turmunterbau. Ostseite (links; in Überlagerung mit einer historischen Fotografie mit noch deutlich erkennbarem Fugenschnitt) und Nordseite (rechts)

Dies bedingte letztlich auch die – statisch relevante – Eigenart der teils erheblich variierenden Einbindetiefen der Schalen in Kernmauerwerk. Während etwa die Außenschale durchschnittlich knapp 50 cm stark ist, finden sich darin eher quaderförmige, 40–45 cm hohe Blöcke, die nur gut 30 cm in die Tiefe reichen und dünne Platten von oft weniger als 15 cm Höhe, aber fast 1 m Tiefe; solche Unterschiede in der Einbindetiefe bestehen auch innerhalb ein und derselben Steinlage.

Zum Aufbau des Kernmauerwerks wurden erstmalig beim Einbrechen des neuen Südeinganges genauere Erkenntnisse gewonnen. Die Beobachtung von Horst, dass die Mauern »im Innern aus losen und unregelmäßig geworfenen Steinen, die teilweise allen Verbandes durch Mörtel entbehrten« [25, S. 43; vgl. 30, S. 50] bestehen, ist eine etwas laienhaft formulierte, aber im Kern äußerst zutreffende Beschreibung dessen, was nun im Zuge umfassender Bestandsuntersuchungen auch festgestellt werden konnte. Allerdings wurde das kleinteiligere Steinmaterial im Kern nicht völlig regellos zwischen die Schalen »geworfen«, vielmehr ist es, wie »bei allen Burgenbauten [dieser Zeitstellung] eine Schicht um Schicht abgeglichen eingebaute Füllung« [19, S. 11] – eine solche Ausführung mit schichtweisem Höhenabgleich des Mauerkerne war bei den schwer kontrollierbaren Einbindetiefen der Schalensteine am Blauen Turm auch geradezu unerlässlich. An allen Befundöffnungen fiel zudem auf, dass die meist plattigen Steine der Füllung fast immer schräg gestellt waren, »eine sorgfältig gesetzte und vermittelte Füllung, oft Schicht um Schicht wechselnd etwas geneigt, so daß nach dem Abnehmen der Außenschale ein fischgrätartiges Muster sichtbar wird. Man nennt diese Technik in Anlehnung an römische Bauten „opus spicatum“ [19, S. 11f.] Diese präzise Beobachtung Wilfried Pfefferkorns an Türmen gleicher Zeitstellung ist eine der seltenen Beschreibungen zur Bautechnik staufischen Mauerwerks und im Wesentlichen auch auf den vorliegenden Fall zutreffend. Anhand der jüngsten Untersuchungen ist das Kernmauerwerk beim Blauen Turm zwar kein regelmäßiges opus spicatum, wohl aber eine an dessen Technik angelehnte, sehr ökonomische und zeitsparende Verwendung des zur Verfügung stehenden (Rest-)Materials. Die dünnen, plattenartigen Überbleibsel, die bei der Herstellung der Außenschalen anfielen, eigneten sich recht gut, um sie mehr oder weniger stehend in den Mauerkern einzubauen. Da man wohl auch bei den kleinen Steinen eine Bearbeitung quer zur Schichtung vermeiden wollte, stellte man die gleichmäßige Oberkante der Füllung durch entsprechend unterschiedliche Neigungswinkel her: Manche der Steine stehen fast genau vertikal, andere sind relativ flach geneigt.

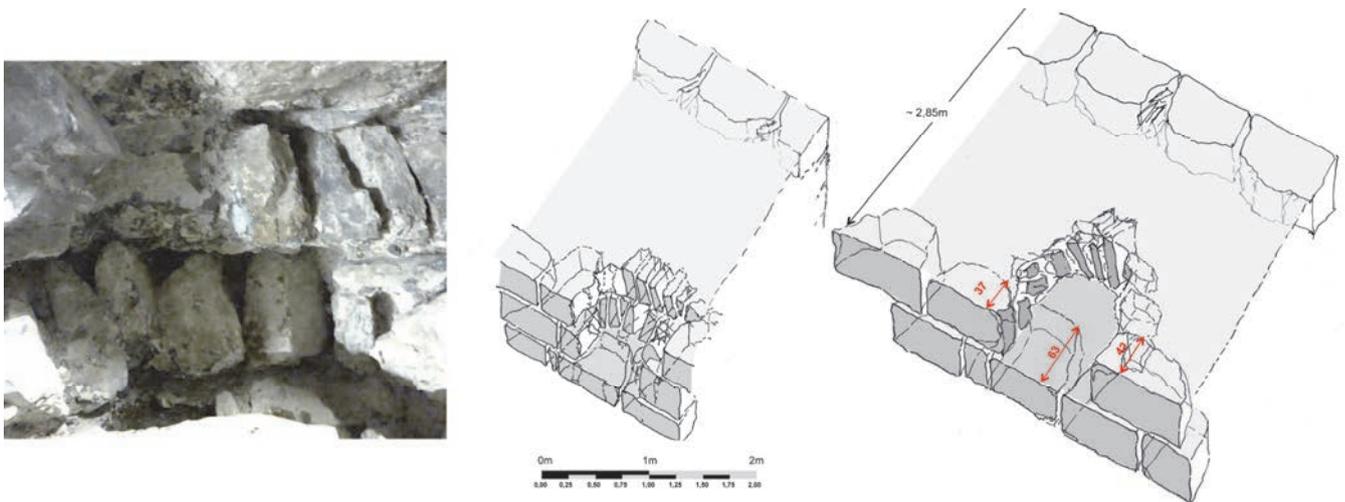


Bild 16 Füllmauerwerk des Blauen Turmes anhand von Befundöffnungen: stehende Steinplatten an einer Öffnung in der Innenschale (links / Mitte) und schräggestellte Steine an einer Öffnung in der Außenschale (rechts)

Von nicht unerheblichem Vorteil war dabei auch, dass für die Ausführung des Füllmauerwerks keine Steinmetze nötig waren, sondern das bloße »Hineinschichten« und Vermörteln von Mauern und sogar von Handlangern ausgeführt werden konnte. Die Füllsteine wurden dabei offenbar nicht einzeln in Mörtel gesetzt, sondern weitgehend »trocken« zwischen die Schalen eingelegt und dann mit einer Schicht eines relativ festen Mörtels glatt abgezogen, der dabei kaum in die Zwischenräume eindrang – eine derartige Mauertechnik für mittelalterliche Füllungen wird von Otto Piper detailreich beschrieben [21, S. 98]. Zwischen vielen der geneigten Steinen ist tatsächlich oft fast kein Mörtel vorhanden. Somit erklärt sich der für die Sanierung äußerst bedeutsame, erhebliche Hohlraumanteil im Mauerwerk teilweise aus dessen Herstellungsvorgang.

## 6 Baugeschichte III: Die »Schadensgeschichte« des Blauen Turmes

Bereits recht rasch nach dem Wiederaufbau von 1851/52 müssen am Blauen Turm erhebliche Risse im mittelalterlichen Natursteinmauerwerk aufgetreten sein. Schon vor 1870 wurden daher umfassende statische Sicherungen durchgeführt; namentlich der Einbau von Zugankern: »In der Folge zeigte es sich, daß der Oberbau zu schwer war und die Mauern des Thurmes aus einander zu weichen begannen; diesem Uebelstande wurde durch eiserne Klammern abgeholfen« [18, S. 175]. Es handelt sich dabei wohl um die erhaltenen, auf halber Turmhöhe sichtbar vor den inneren Mauerflächen durchgezoge-

nen Anker mit außenliegenden runden Ankerplatten (vgl. Abb 17). In den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts wurde zudem ein erstes »Rissmonitoring« mit Ton- und Glasröhren angebracht, das auf weitere Bewegungen im Mauerwerk schließen ließ. Friedrich Feyerabend berichtet in seinen recht blumig formulierten »Geschichten vom Blauen Turm« von geradezu panikhafte Reaktionen der Wimpfener Bürger; der Türmer wurde wohl Hals über Kopf evakuiert und man schloss bereits Wetten, in welche Richtung der Blaue Turm beim Einsturz wohl fallen würde [28, S. 46f.].

Weder der Blaue Turm selbst noch die mit seinem Erhalt Betrauten kamen in der Folgezeit zur Ruhe. Ein von Kreisbauinspektor Zimmermann und Regierungsbaumeister Zeller erstelltes Gutachten vom November 1903 berichtet nicht nur von vielen Rissen, sondern auch von einem gerissenen Anker und angeblich standsicherheitsgefährdenden Setzungen im Fundamentbereich [30, S. 49], die unter anderem auf den Bau der Bahnlinie unmittelbar unterhalb des Neckarhanges zurückgeführt wurden [32, S. 2]. Die darauf eilig hinzugezogene großherzoglich-hessische Denkmalpflege kam in einer erneuten Begutachtung des Turmes im März 1904 zu dem Schluss, dass »das ganze Mauerwerk durch lange senkrechte und schräge Risse, die teilweise durch die ganze Dicke der Mauer hindurchreichten, in eine Anzahl verbandloser Streifen zerlegt« sei [30, S. 49]. Anstelle der Setzungen wird eine zu hohe Belastung durch den Turmaufbau als Schadensursache identifiziert. Mit die wichtigsten Indizien für die Schadensgeschichte des Blauen Turmes sind freilich die präzisen Hinweise auf Risse im Mauerwerk schon vor 1848, die in einem Bericht des zuständigen Denkmalpflegers der Provinz Starkenburg, Georg

Wickop, aufgeführt sind: Aus mehreren Bauakten aus der Zeit des Wiederaufbaus 1852 ging demnach explizit hervor, »daß schon vorher Risse vorhanden waren, da in denselben von einer Auswechslung loser Steine und dem Auskeilen und Verfugen der vorhandenen Sprünge die Rede ist« [30, S. 49]. Deren volles Ausmaß zeigte sich, als zur Anbringung neuer Rissmarken im Spätherbst 1906 ein Gerüst an einer der Turmseiten errichtet »und ein Teil der Risse von der früheren Auskeilung befreit [wurde]. Die Schäden zeigten sich bedeutender, als zu erwarten war. Die Risse waren bis zu 15 cm breit, reichten metertief in das Innere hinein; dieses bestand zum größten Teil aus losen unregelmäßigen Brocken« (Den Zustand der Verfüllungen aus Mörtel und Zwicksteinen interpretierte man damals fälschlicherweise dahingehend, dass »diese Risse schon vor langer Zeit zu derselben Ausdehnung und Größe gelangt« [30, S. 51] waren.) Damit ist eindeutig belegt, dass eine offenkundig gravierende Schädigung des mittelalterlichen Mauerwerks bereits lange vor Aufsetzen des neuen, vermeintlich zu schweren Turmaufbaus bestanden haben muss!

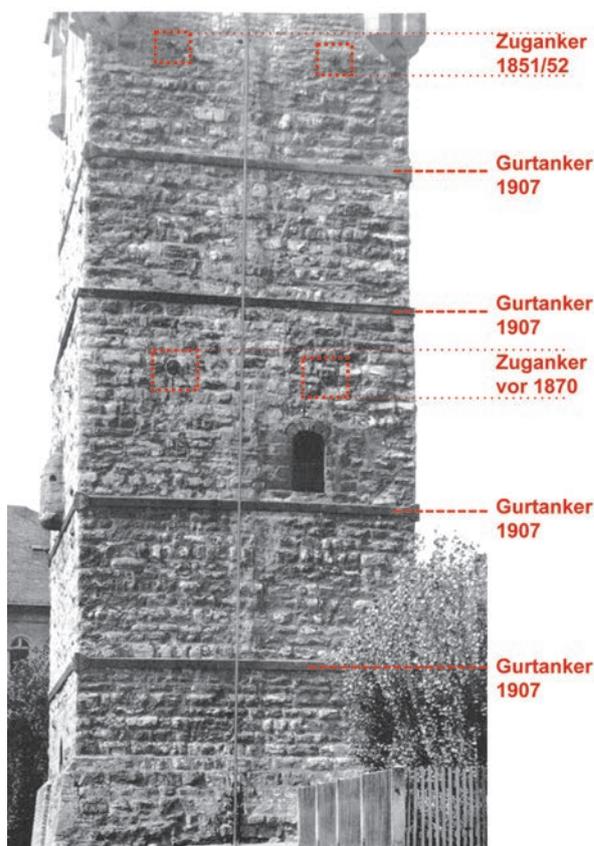


Bild 17 Statische Sicherungen am Turmunterbau nach 1852 [Quelle: Arens 1967, S. 55]

Im Zuge der Sanierung 1971 (s.u.) waren alle bisherigen Risse erneut verfüllt und durch eine vollständige maschinelle Neuverfugung der Außenschale, die ein Abstrahlen der Steinoberflächen nach sich zog, in vielen Bereichen unkenntlich gemacht worden. Zur Analyse der Rissentwicklung vor dieser Maßnahme wurden daher historische Fotografien, überwiegend aus der Mitte des 20. Jahrhunderts herangezogen, die in der Zusammenschau einen einigermaßen vollständigen Überblick über die vier Turmaußenseiten ermöglichten. Durch Entzerrung dieser Fotografien und Überlagerung mit aktuellen Bildplänen und vorliegenden Rissaufnahmen sowie der neuen Kartierung aus dem Jahr 2013 konnten die Rissverläufe zu unterschiedlichen Zeitstellungen überlagert werden. Dabei ließ sich eindeutig nachweisen, dass, auch unter Berücksichtigung gewisser methodischer Ungenauigkeiten, die »Hauptrisse« stets dieselben waren (Bild 19). Die bei den Sanierungen verschlossenen größeren Vertikalrisse waren also in der Folge immer wieder aufgegangen. Zusammen mit den Berichten von deutlich älteren Verfüllungen solcher Risse lässt sich damit schlüssig ein seit Jahrhunderten – und damit schon lange vor dem Wiederaufbau von 1852 bestehender – Schadensmechanismus am mittelalterlichen Mauerwerksgefüge identifizieren.

Dem schlechten Allgemeinzustand des Mauerwerks und der Tatsache, dass Ende 1906 ein weiterer Anker (vermutlich temperaturbedingt) riss, begegnete man Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem Anbringen einer außenliegenden Umgürtung des Turmes aus Flacheisen und C-Profilen in insgesamt vier Höhenlagen – der von Wickop erwähnte, spektakuläre Einsturz des Campanile von San Marco im Jahr 1902 dürfte damals noch allen Beteiligten Erinnerungswert gewesen sein...



Bild 18 Gerissene Gurtanker und Schäden am Mauerwerk im Jahr 1970 [Quelle: SAIB, Nachlass Klaus Pieper]

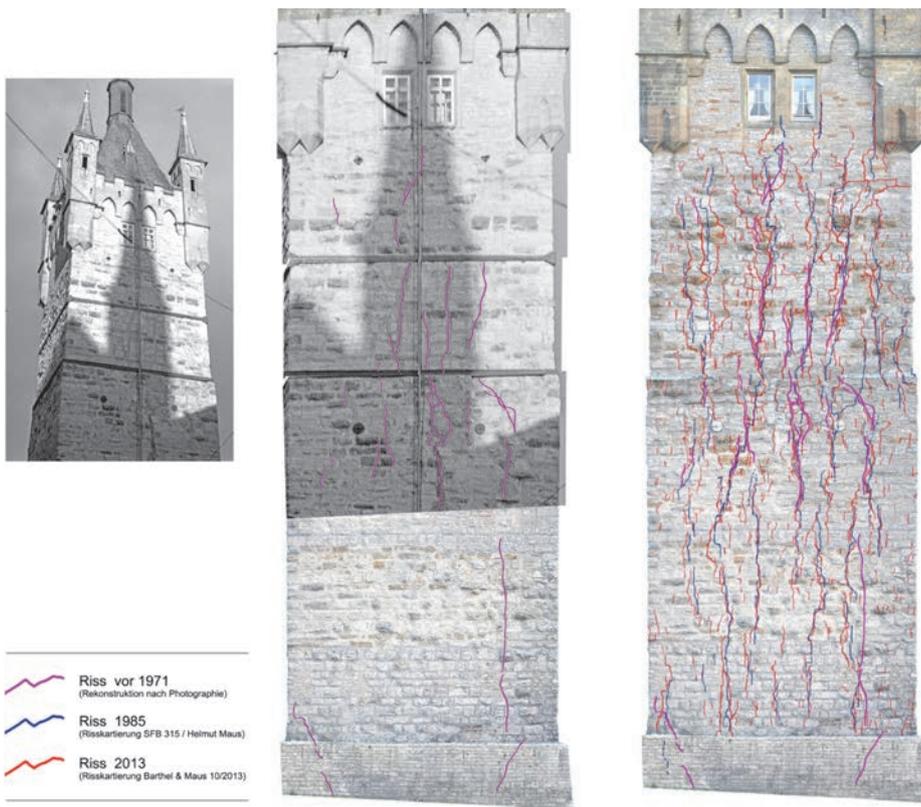


Bild 19 Rekonstruktion des historischen Rissbildes anhand von Fotografien (links / Mitte). Die Überlagerung (rechts) zeigt, dass die immer gleichen Hauptrisse jeweils wieder aufgingen. [Quelle: Foto Marburg / Lala Aufsberg, 1952]

Trotz der Anker und entgegen der damaligen Annahme, die Rissbildung (in Folge einer einmaligen Lasterhöhung durch den neuen Aufbau) wäre zum Erliegen gekommen, kamen bis Anfang der 1970er Jahre weitere Schäden hinzu; zwei der eisernen Bänder rissen. Prof. Klaus Pieper aus Braunschweig, der zur Begutachtung hinzugezogen wurde, stellte – wie schon seine Vorgänger – fest, dass an allen vier Wänden »sich je zwei Risszüge etwa in Wandmitte durch den ganzen Turm [ziehen] Die Risse sind in der Mitte des Turmes am stärksten und verlaufen sowohl im Fundament als auch im obersten Geschoss des Turmmauerwerks. Im neugotischen Mauerwerk des Aufbaus sind nur Ausblasungen des Mörtels, aber keine Risse vorhanden [...]“ [32, S. 3]. Während an den Außenmauern die Schäden vor allem im mittleren Höhenbereich verstärkt auftraten, zeigten die Innenseiten des Turmes vermehrt in den oberen Eckbereichen deutlich aufgehende Risse. Auf der Südseite beschreibt Pieper zudem eine starke, neuere Rissbildung, die er mit den gebrochenen Ankerbändern in Verbindung brachte. (Hier sei auf die im Rahmen des laufenden Monitorings festgestellte, aktuelle Aufweitung des Mauerwerks in diesem Bereich verwiesen. Siehe hierzu den Beitrag von *Lehmann et al.* im selben Band).

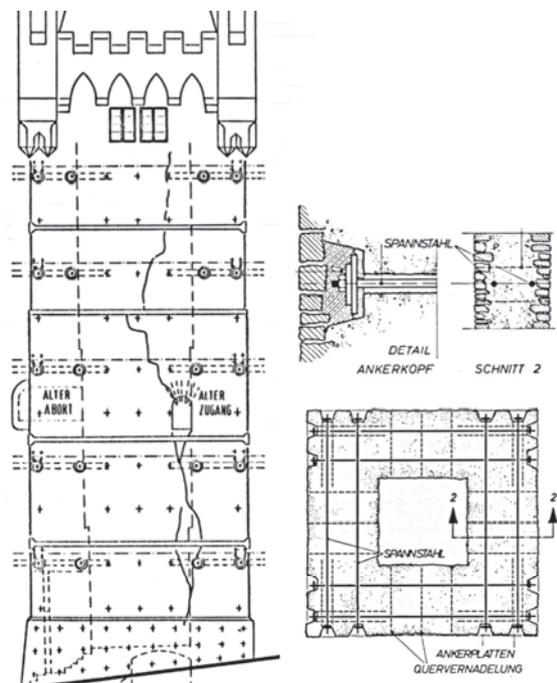


Bild 20 Maßnahmenpläne von Prof. Dr.-Ing. Klaus Pieper zur Instandsetzung des Blauen Turmes, 1971. Ansicht, Grundriss Ankerlagen und Ankerkopfdetail. [Quelle: August Wolfsholz Ingenieurbau GmbH]

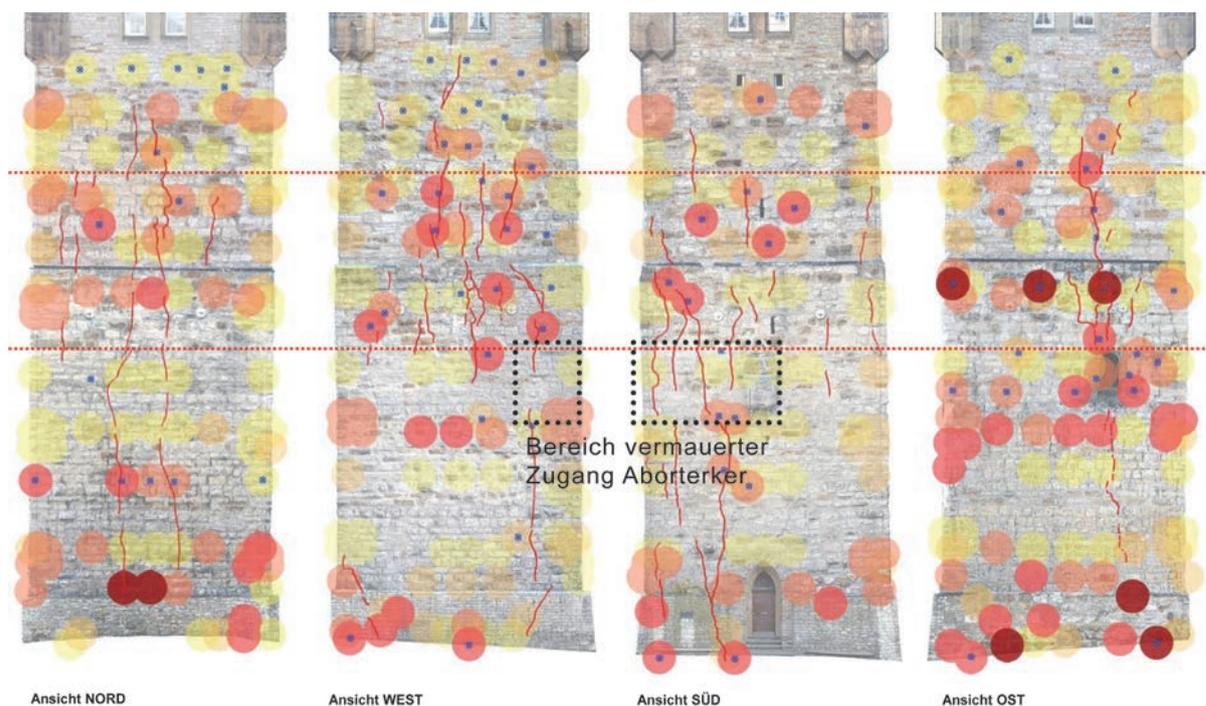


Bild 21 Auswertung der Mauerwerksinjektion mit grafischer Verortung der Injektionsmengen (geringe Menge= gelb / hohe Menge= rot)

Dem Gutachten ist bereits ein recht detailliertes Instandsetzungskonzept beigelegt, das neben der Mauerwerksinjektion und –vernadelung den Einbau doppelter Ankergevierte in 5 Ebenen empfiehlt. Obwohl Befundöffnungen fehlten und stattdessen Erfahrungswerte zum inneren Aufbau des Mauerwerks herangezogen wurden [32, S. 1], schlägt Pieper den verdeckten Einbau der Anker „etwa 40 cm hinter der Wandoberfläche“ [32, S. 6] vor; aus optischen Gründen wie auch als Korrosionsschutz. Die exakt so ausgeführten Spannanker wurden also teils vollständig durch die Außenschale aus massiven Quadern gebrochen und gegen das relativ instabile Füllmauerwerk gesetzt.

Im Zuge der injektionsmaßnahmen wurde ein Hohlraumvolumen im Mauerwerk festgestellt, das alle Erwartungen (und Befürchtungen) bei weitem übertraf. Nach dem Einbringen 273 t Portlandzementsuspension über die gesamte Höhe wurden aufgrund des sehr hohen Verbrauchs nochmals weitere 132 t von mit Sand im Verhältnis 1:1 abgemagertem Material injiziert. Schließlich wurde die Maßnahme beendet, ohne dass ein Verfüllen aller Hohlräume erreicht war. Vorbereitend waren zudem die Innenwände nach dem Ausstemmen der Fugen mit Spritzbeton überzogen worden, welcher als Fugenverschluss für die Mauerwerksinjektion diente [33, Aktenvermerk vom 22.06.1971]. Die Maßnahme von 1971 wurde für die vorliegende Untersuchung anhand genauer Dokumentationen

der ausführenden Firma August Wolfsholz GmbH umfassend ausgewertet. Neben einer genauen Verortung aller Anker und Vernadelungen anhand aktueller Bildpläne erfolgte eine graphische Analyse der mengenmäßigen Verteilung der Mauerwerksinjektionen, die Rückschlüsse auf die Verteilung der zuvor bestehenden Hohlräume ermöglichte (Bild 21).

Am 17. Mai 1984 wurde der Blaue Turm nach einem Blitzeinschlag zum dritten Mal in seiner (überlieferten) Geschichte ein Raub der Flammen. Der brennende Turmhelm fiel »teilweise ins Gebäudeinnere und teilweise auf die Freifläche des hinteren Rathausplatzes« [28, S. 65]. Nach umgehender Planung des Wiederaufbaus wurde der Turmhelm im folgenden Jahr durch den Architekten Dr. Walther-Gerd Fleck in Anlehnung an die alte Form neu errichtet; die Tragwerksplanung führte das Stuttgarter Ingenieurbüro Joachim Lindner durch. Aus Brandschutzgründen wurde dabei auch eine sog. Trümmertasse oberhalb der Türmerwohnung eingebaut. Das massive Stahlbetonbauteil, das bei einem erneuten Brand ein Durchschlagen der Holzkonstruktion in die Wohnung verhindern soll und wannenartig zwischen die Brüstungen des Umgangs gesetzt ist, stellte eine deutliche Lasterhöhung für den Turmunterbau dar.

Während des Wiederaufbaus fanden Untersuchungen am Mauerwerk durch Mitarbeiter des SFB 315

der Universität Karlsruhe statt. Bei einer Rissaufnahme durch Helmut Maus, einen der Autoren dieses Bandes, wurde dabei ein erneutes, erhebliches Aufreißen der Natursteinmauern festgestellt [27]. Und die Schadensgeschichte setzte sich weiter fort: 2002 wurden wiederum Glasstreifen zur Risskontrolle angebracht, 2010 folgte ein erneutes Gutachten durch Ulrike Henes-Klaiber [31].

Mit den ab 2012 begonnenen interdisziplinären Untersuchungen, deren Erkenntnisse und Ergebnisse zusammengeführt und in einem Instandsetzungskonzept umgesetzt wurden, hoffen die Beteiligten, die Schadensgeschichte des Blauen Turms nun zu einem konsolidierten Ende gebracht zu haben.

## 7 Zusammenfassung

Angesichts der erheblichen Schäden am mittelalterlichen Mauerwerk des Blauen Turmes wurde als Teil der Grundlagenermittlung für die Konzeption einer Instandsetzung die Baugeschichte des Blauen Turmes dokumentiert. Ziel war, die jahrhundertelangen (auch jene teils wieder verschwundenen) Änderungen des Ursprungsbaus soweit nachzuvollziehen, dass sich daraus der heutige Zustand des Turmes erklären und verstehen lässt - wobei »Zustand« in diesem Fall, der ingenieurmäßigen Fragestellung gemäß, durchaus in erster Linie als der statisch-konstruktive Zustand des Objektes verstanden werden sollte.

Die in der Folge erarbeitete »Veränderungsgeschichte« ermöglichte einen Überblick zu den verschiedenen Zuständen der Lasteinleitung in das mittelalterliche Mauerwerk des Turmunterbaus. Besonders relevant ist dabei die Tatsache, dass entgegen vielfacher Annahme im Zuge des Wiederaufbaus 1851/52 keine wesentliche Lasterhöhung durch den historistischen Turmaufsatz stattfand, da gleichzeitig ein erheblicher Abtrag historischen Mauerwerks vorgenommen worden war.

Die Auswertung der seit dieser Wiederherstellung greifbaren Schadens- und Instandsetzungsgeschichte des Bauwerks ergab, dass eine Schädigung des Mauerwerks schon vorher bestanden haben muss – mithin war nicht der vermeintlich zu schwere Aufsatz die initiale Ursache der Risse im Mauerwerk. Schadensursache und Schadensmechanismus waren also in der Folge im Ursprungsbestand zu suchen.

Begleitend zu einem mehrjährigen Untersuchungsprogramm wurden außerdem Erkenntnisse zum Aufbau des Mauerwerks und dessen entstehungsbedingter Besonderheiten gewonnen. Insbesondere die Dokumentation und Interpretation der schräg gestellten Füllsteine und des hohlraumreichen,

mörtelarmen Gefüges im Kern lieferte eine wichtige Grundlage für die Instandsetzungskonzeption.

## Literatur

- [1] Arens, Fritz, Buckelquader, in: Schmitt, Otto / Gall, Ernst / Heydenreich, Ludwig H. / Augustyn, Wolfgang / Wirth, Karl-August (Hg.), Reallexikon zur Deutschen Kunstgeschichte, Bd. III (1950), München 1937ff., Sp. 44–47
- [2] Arens, Fritz, Die Königspfalz Wimpfen, Berlin 1967
- [3] Arens, Fritz, Der Fund eines dritten Bergfrieds in der Pfalz Wimpfen, in: Much, Franz J. / Stuttgarter Gesellschaft für Kunst und Denkmalpflege (Hg.), Baukunst des Mittelalters in Europa, Stuttgart 1988, S. 659–664
- [4] Biller, Thomas, Die Pfalz Wimpfen: Anmerkungen zum Forschungsstand, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 66–77
- [5] Binding, Günther / Schmidt, Burghart, Die Datierung des Roten Turmes in der Pfalz Wimpfen, in: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (1983), S. 356–361
- [6] Binding, Günther, Deutsche Königspfalzen. Von Karl dem Großen bis Friedrich II. (765 - 1240), Darmstadt 1996
- [7] Cichy, Bodo, Die bauliche Sanierung des Blauen Turmes in Bad Wimpfen, in: Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hg.), Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege 2.1972, Stuttgart 1972, S. 34–37
- [8] Durdík, Tomáš, Buckelquader auf böhmischen Burgen der staufischen und spätprämyzidenzeit, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 217–225
- [9] Frohnhäuser, Ludwig, Geschichte der Reichsstadt Wimpfen, des Ritterstifts St. Peter zu Wimpfen im Thal, des Dominicanerklosters und des Hospitals zum Hl. Geist zu Wimpfen am Berg nach Urkunden zsgest. von Ludwig Frohnhäuser, Darmstadt 1870
- [10] Goer, Michael, Burgenforschung und Denkmalpflege in Baden-Württemberg, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 15–21
- [11] Haberhauer, Günther, Frühere Ausgrabungen im Bereich der Königspfalz Wimpfen, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 34–37
- [12] Hartmann, Hans-Heinz, Neue archäologische Erkenntnisse, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 38–44
- [13] Heid, F.H., Die Geschichte der Stadt Wimpfen, Heilbronn 1846

- [14] Hildebrandt, Ludwig H. / Knauer, Nicolai, Neue Erkenntnisse zu Anfang und Ende der Kaiserpfalz Wimpfen, in: Wartburg-Gesellschaft (2013), S. 45-65
- [15] Kautzsch, Rudolf, Die Kunstdenkmäler in Wimpfen am Neckar, Wimpfen am Neckar 1920
- [16] Knoch, Peter, Die Errichtung der Pfalz Wimpfen. Überlegungen zum Stand der Forschung, in: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (1983), S. 343-357
- [17] Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hg.), Forschungen und Berichte der Archäologie des Mittelalters in Baden-Württemberg, Bd. 8, Stuttgart 1983
- [18] Lorent, A. v., Wimpfen am Neckar, Stuttgart 1870
- [19] Pfefferkorn, Wilfried / Öffentliche Bausparkasse Württemberg (Hg.), Buckelquader an Burgen der Stauferzeit, Stuttgart 1977
- [20] Pieper, Klaus / Brüggemann, Bernhard, Von der konstruktiven Sicherung historischer Bauten, in: Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hg.), Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege 5.1976, Stuttgart 1976, S. 11-13.
- [21] Piper, Otto, Burgenkunde. Bauwesen und Geschichte der Burgen, Neue Auflage, Frankfurt 1967
- [22] Remmele, Martin, Die Entwicklung der mittelalterlichen Stadtbefestigung von Wimpfen am Berg, in: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (1983), S. 423-442
- [23] Robotti, Ciro, La Torre Azzurra, in: Restauro 5.1976, Neapel 1976, S. 43-48
- [24] Schefold, Max, Alte Ansichten aus Württemberg, 3 Bd., Stuttgart 1956ff.
- [25] Scheible, Erich / Verein »Alt Wimpfen« e.V., Verein zur Pflege der Geschichte und Kunstdenkmale (Hg.), Die Geschichte der hessischen Exklave Wimpfen, Bd. 2, Bad Wimpfen 2008, Ausz. aus dem Manuskript in Verein »Alt Wimpfen« e.V. (1985), S. 38-48
- [26] Schicht, Patrick, Buckelquader in Österreich. Mittelalterliches Mauerwerk als Bedeutungsträger, Petersberg 2011
- [27] SFB 315. Sonderforschungsbereich Erhalten Historisch Bedeutsamer Bauwerke - Bauefüge, Konstruktionen, Werkstoffe der Universität Karlsruhe (Hg.), Mitteilungen des Sonderforschungsbereiches 315. Mauerwerkssanierung am Blauen Turm in Bad Wimpfen, Bd. 2, Karlsruhe 1986
- [28] Verein »Alt Wimpfen« e.V., Verein zur Pflege der Geschichte und Kunstdenkmale (Hg.) / Haberhauer, Günther (Hg.), Sonderband zum Wiederaufbau des Blauen Turmes, Regia Wimpina Bd. 4, Bad Wimpfen 1985
- [29] Wartburg-Gesellschaft zur Erforschung von Burgen und Schlössern e.V. (Hg.) / Thomas Biller (Red.), Die Pfalz Wimpfen und der Burgenbau in Südwestdeutschland, Petersberg 2013
- [30] Wickop, Georg; Geschäftsbericht der Denkmalpfleger. Provinz Starkenburg, in: Hessen-Darmstadt, Großherzogl. Ministerium des Innern (Hg.), Jahresbericht der Denkmalpflege Hessen, Bd. 1, 1902-1907, Darmstadt 1910, S. 49-51

## Unveröffentlichte Berichte und Archivalien

- [31] Henes-Klaiber, Ulrike, Der Blaue Turm, Bad Wimpfen. Recherche zu Untersuchungen und Maßnahmen der Vergangenheit sowie Vorschläge für künftiges Vorgehen, Forbach, 30. Juni 2010 [Archiv des Landesamtes für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart]
- [32] Pieper, Klaus, Gutachten zur Sicherung des Blauen Turmes in Bad Wimpfen, 05. Januar 1971 [SAIB Sammlung für Architektur und Ingenieurbau der TU Braunschweig, Nachlass Klaus Pieper]
- [33] August Wolfsholz Ingenieurbau GmbH, Leonberg, Maßnahmendokumentation zur statischen Sicherung des Blauen Turmes 1971. Pläne, technische Unterlagen und Protokolle. [Firmenarchiv August Wolfsholz Ingenieurbau GmbH]

## Autor

Peter Kifinger  
 Barthel & Maus  
 Beratende Ingenieure GmbH  
 Infanteriestraße 11a  
 80797 München  
 Tel.: +49 89 286860-0  
 E-Mail: P.Kifinger@barthelundmaus.de



# Das Wahrzeichen retten!

## Wieviel Denkmal bleibt vom Turm?

*Ulrike Schubart*

**Abstract:** Der Blaue Turm hat im Laufe seiner 800-jährigen Geschichte viele Schicksale erfahren. Er wurde immer wieder verändert, repariert, instandgesetzt und dadurch in seinem stauferzeitlichen Bestand reduziert. Aber trotz seiner immer wieder kehrenden Schäden prägt er in seltener Vollkommenheit seit Jahrhunderten das Stadtbild von Wimpfen.

Im Rahmen der derzeit laufenden Sicherungs- und Instandsetzungsmaßnahmen sehen es Denkmalpflege und das beteiligte Expertenteam als eine große Herausforderung und Aufgabe, den Turm in seinem wertvollen Baubestand möglichst dauerhaft zu erhalten.

**Keywords:** Blauer Turm, Kaiserpfalz Wimpfen, Bau- und Veränderungsgeschichte, Denkmalwert, Denkmalschichten, Schadensbild, Substanzerhalt, Untersuchen und Dokumentieren, Denkmalverträglichkeit, Erhaltungskonzept

### 1 Der Turm – die Kontinuität der Veränderung

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen prägt mit seiner Höhe von annähernd 58 m unverkennbar die Stadtsilhouette über dem Neckartal. Er ist Wahrzeichen der Stadt und hat den Status eines Kulturdenkmals von besonderer Bedeutung und nationalem Rang. Um 1220 errichtet, zählt er zum bedeutenden Bestand der ehemaligen staufischen Kaiserpfalz Wimpfen. Seine erhabene Position und seine schlanke Form verdankt der Turm seiner ursprünglichen Funktion als Wehr- und Wachturm. Von ihm aus ließ sich die Umgebung nach allen Himmelsrichtungen weit überblicken. Die seit dem Mittelalter im Turm wohnhaften Türmer hatten auch die Aufgabe der Brandwache und mussten die Stunden anschlagen. In einem überwölbten Raum war das Gefängnis untergebracht.

Sein charakteristisches und Identität stiftendes Erscheinungsbild mit dem von vier Ecktürmchen gekennzeichneten Turmhelm hat der Blaue Turm allerdings erst vor etwa 150 Jahren erhalten.

Alte Beschreibungen und bildnerische Darstellungen aus unterschiedlichen Jahrhunderten veranschaulichen die vielen Veränderungen, die der Turm im Laufe seiner 800jährigen Geschichte erfahren hat. Sie verdeutlichen aber auch die Beständigkeit des Turms in seiner Geschichte, genauso wie seine Dominanz und seine Bedeutung für die Stadtgeschichte und das historische Stadtbild.



Bild 1 Stadtsilhouette Bad Wimpfen von Norden mit eingerüstetem Blauen Turm [Schubart 2018]

Die älteste Darstellung des Blauen Turms und der Stadtansicht von Wimpfen findet sich auf einer Wandmalerei um 1485 in der Kreuzkapelle von Duttenberg unweit von Bad Wimpfen. Der Blaue

Turm ist darauf noch mit einem mittelalterlichen Spitzhelm dargestellt.



Bild 2 Kreuzkapelle in Duttenberg, Ausschnitt aus einem Wandgemälde mit der Stadtansicht von Wimpfen, um 1485 [Fotoarchiv LAD 1959]

Bis 1674 besaß der Blaue Turm aber wohl einen gotischen Turmaufbau – hier dargestellt in einer Radierung von 1544.



Bild 3 Ansicht der Kaiserpfalz Wimpfen als Hintergrundkulisse in einer Radierung von 1544 [Die Gefangennahme des Hieronymus Baumgartner; Fotoarchiv LAD, Quelle unbekannt]

Nach einem Brand im Jahr 1674 erhielt der Turm seine kennzeichnende barocke Turmhaube, die in einigen alten Stadtansichten zu sehen ist.

Die für das Erscheinungsbild des Blauen Turms nachhaltigste und für den historischen Baubestand wohl folgenschwerste Veränderung war 1851/52 der brandbedingte Verlust des barocken Turmhelms und der historische Wiederaufbau mit den vier auskragenden Ecktürmchen. Dieser charakteristische Turmhelm prägt das Erscheinungsbild bis heute.



Bild 4 Stadtansicht von Bad Wimpfen, Kupferstich von J.J. Tanner (wohl 1843) [nach Max Schefold, Alte Ansichten aus Württemberg, Stuttgart 1956]



Bild 5 Ansicht der Stadt Wimpfen von Süden; Ausschnitt aus einem Kupferstich von J.C. Leopold nach 1715 [nach Arens 1967]



Bild 6 Ansicht der Kaiserpfalz von Norden [Aufn. Wilhelm Kratt um 1900, Fotoarchiv LAD]

Folgenschwer war dieser Umbau von 1851/52 insofern, als er erheblichen Einfluss auf die Statik des Turms hatte. Schon bald nach dem Umbau entstanden Schäden und Risse im Mauerwerk.

Bereits vor 1870 wurden deshalb auf halber Höhe des Turms zwei horizontale Zuganker eingebaut, deren Ankerkopfplatten auf der Ost- und Westseite des Turms sichtbar waren.



Bild 7 Ostansicht des Blauen Turms mit den vor 1870 über dem ehemaligen Turmzugang eingebauten Zugankern [Altinventar Hessen 1898]

Trotzdem schritt das Schadensbild weiter fort, so dass der Turm 1907 mit vier außen sichtbaren, eisernen Gurtankern gesichert werden musste.

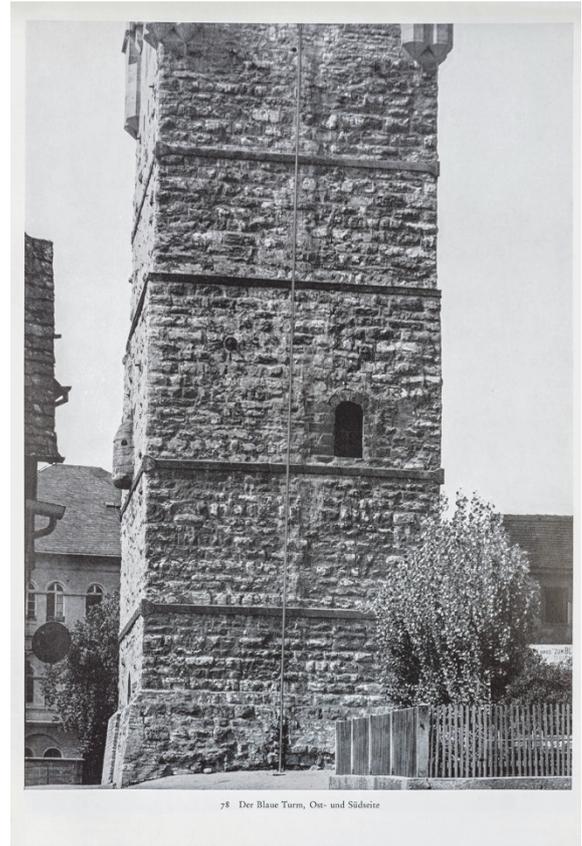


Bild 8 Sicherung des Blauen Turms mit vier eisernen Gurtankern [nach Arens 1967]

Bis Ende der 1960er Jahre hatten die Schäden ein besorgniserregendes Ausmaß angenommen; in den Außenmauern des Turms klafften bis zu 5 cm breite Risse.

Auch die Akten des Landesamts für Denkmalpflege spiegeln diese Situation wider. Hier heißt es in einer handschriftlichen Notiz des damaligen Konservators Graf Adelman vom 8.02.1971:

*Bauzaun sofort! In Wimpfen ist es mir unheimlich – akute Gefahr.*

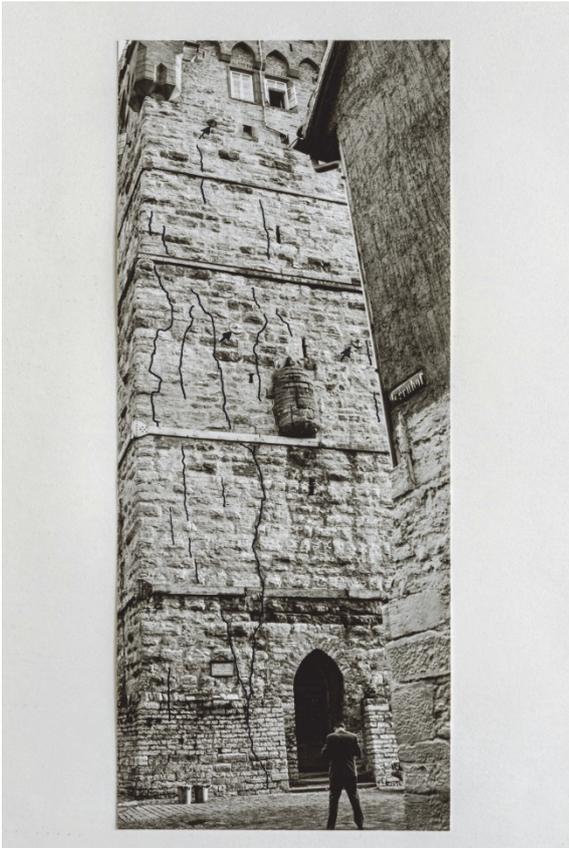
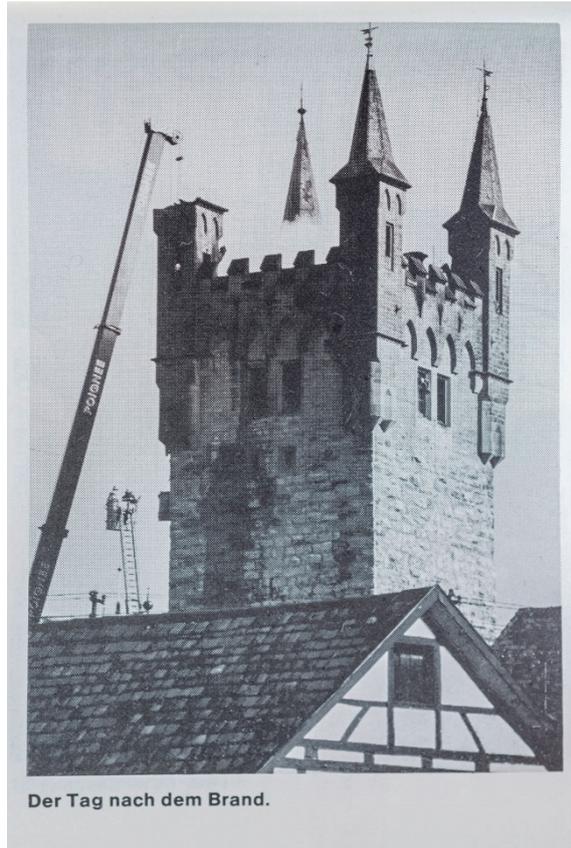


Bild 9 Südseite des Blauen Turms mit überzeichneten Rissen [Pieper, Fotoarchiv LAD]

Es folgte eine der großen Sanierungskampagnen in der Geschichte des Blauen Turms.

Unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Klaus Pieper aus Braunschweig wurden die Hohlräume und Risse im Mauerwerk mit über 300 Tonnen Zementsuspension verfüllt und der Turm zusätzlich durch den Einbau von Spann- und Nadelanker gesichert. Außen wurde der Turm neu verfugt, innen erhielt er eine Spritzbetonschale.

Im Mai 1984 zerstörte ein Blitzeinschlag und Brand den Turmhelm zum dritten Mal in der Geschichte. Unter weitgehendem Erhalt der vier Ecktürmchen wurde der Turm repariert und das Dach im Erscheinungsbild von 1851 wieder aufgebaut.



Der Tag nach dem Brand.

Bild 10 Verlust des Turmhelms beim Brand im Mai 1984 [Haberhauer, Regia Wimpina]

Aber auch nach dieser Maßnahme kam der Turm nicht zur Ruhe. Die 1971 verfüllten Risse gingen wieder auf, neue kamen hinzu. Bis 2010 war das Schadensbild genauso besorgniserregend wie vierzig Jahre zuvor.

Unter Beteiligung des Ingenieurbüros Barthel & Maus und der Materialprüfungsanstalt Stuttgart ging die Sanierungsgeschichte des Turms weiter bzw. begann von vorn.

## 2 Der Turm – die Kontinuität des Erhaltens und Bewahrens

Die vielen Veränderungen und Maßnahmen am Turm zeigen, dass es immer einen konkreten Anlass zum Bauen gab; Feuer, Blitzeinschlag oder eben Schäden am Mauerwerk. D. h. es musste immer wieder repariert und dadurch auch weitergebaut werden am Turm. Diese »Pflicht« erwuchs aber offensichtlich aus dem Selbstverständnis und dem Wunsch der Bürger, den Turm als »ihren Turm« zu erhalten und zu bewahren. Über die Jahrhunderte blieb der Turm immer in seiner Vollständigkeit und Vollkommenheit erhalten – wengleich mit stilis-

tisch wechselnden Turmaufbauten – aber er verfiel nicht zur Ruine. Dies ist umso bemerkenswerter, als die baulichen Reste der Kaiserpfalz im Laufe der Jahrhunderte zusehends verfielen und erst mit einem generell wachsenden Interesse an mittelalterlicher Baukunst zu Beginn des 19. Jahrhunderts in das Erhaltungsbewusstsein der Bürger rückten.

Bezeichnend ist aber auch, dass der Turm seit dem großen Umbau von 1851/52 – trotz der vielen nachfolgenden Reparatur – und Instandsetzungsmaßnahmen bis heute keine wesentlichen Veränderungen am Gesamterscheinungsbild mehr erfahren hat. Darin zeigt sich der Wandel von einer eher schöpferischen Denkmalpflege des 19. Jahrhunderts hin zu einer »modernen« Denkmalpflege des Erhaltens und Bewahrens.

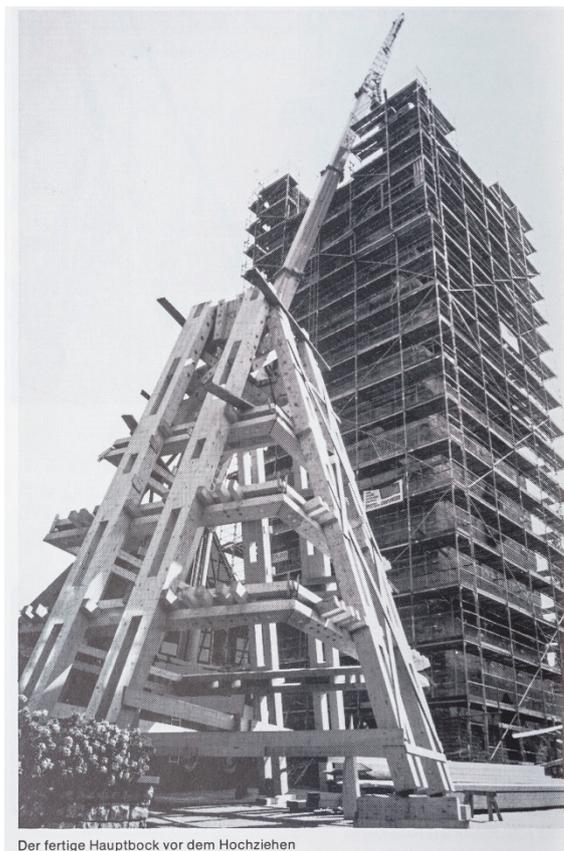
In der Betrachtung aller Baumaßnahmen über die Jahrhunderte kann also festgestellt werden: der Erhalt des Blauen Turms stand immer außer Frage. In den Altinventaren und Amtsbeschreibungen des 19. Jahrhunderts wird die Bedeutung des Blauen Turms und sein Wahrzeichencharakter bereits vielfach gewürdigt.

Die staatliche Denkmalpflege äußert sich v.a. nach den großen Instandsetzungsmaßnahmen von 1971 zum Denkmalwert und zur Erhaltungsfrage:

*Türme sind, was ihre Erhaltung und bauliche Unterhaltung angeht, eine liebe Not! ... (sie) verlangen für ihren Erhalt einen außergewöhnlich hohen technischen und finanziellen Einsatz .... (aber) der gewaltige Bau (...) verband sich nie mit der Frage, ob er, und sei's unter dem Einsatz erheblicher Geldmittel, erhalten werden solle oder nicht. Zu sehr bestimmt er als der primus inter pares mit einer ganzen Anzahl seinesgleichen das altvertraute Bild der aus der berühmten staufischen Kaiserpfalz Wimpfen hervorgegangenen Stadt über dem Steilufer des Neckars. Zu wertvoll ist er, der um 1210/20 als westlicher Bergfried dieser Kaiserpfalz und als Pendant zum etwas früheren Roten Turm entstand, auch nach historischem Gewicht, als daß die Notwendigkeit seiner Erhaltung je hätte in Zweifel geraten können.*

(Cichy S. 34)

Auch nach der Brandtragödie von 1984 war es für die Wimpfener Bürger eine Selbstverständlichkeit, den Turm engagiert innerhalb eines Jahres wieder auf zu bauen und instand zu setzen.



Der fertige Hauptbock vor dem Hochziehen

Bild 11 Wiederaufbau des Turmdachs 1985 [Haberhauer, Regia Wimpina]

Für die fachliche Denkmalpflege stand dabei fest, den Turmaufsatz im charakteristischen Erscheinungsbild des Vorzustands von 1851 wieder auf zu bauen:

*Der Turmaufsatz mit Laterne und den vier Ecktürmchen ist eine wichtige historische Schicht des Turms selbst, der Stadtgeschichte und ein Zeugnis der »Burgenromantik«. Seit mehreren Generationen ist der Blaue Turm samt Aufsatz ein dominierender und charakteristischer Bestandteil der Stadtbebauung und der Stadtsilhouette.*

*Da sich die vier Ecktürmchen im Wesentlichen erhalten haben, ist es naheliegend, die vorhandene Teilsubstanz zum bisherigen Ganzen zu ergänzen....*

*Der Gedanke, zu den vier Ecktürmchen eine passende, jedoch gestalterisch neu konzipierte Ergänzung zu suchen, ist nicht weiterverfolgt worden; Anlaß dazu war die Überlegung, daß neben den Ecktürmchen auch der aufgesetzte Umgang mit Zinnen von Anfang an so eindeutig als Teile eines großen Ganzen gedacht waren, daß nur die Ergänzung über die Rekonstruktion des verlo-*

*renen Turmhelms zu einem stimmenden Ergebnis führen können....*

(9. Juni 1984, Hans Koepf, Ortsakte LAD)

Da aus baurechtlichen und brandschutztechnischen Gründen jedoch der Einbau einer Stahlbetonmassivplatte über der Türmerwohnung gefordert wurde, bestand die Denkmalpflege nicht auf eine detailgenaue, handwerkliche und materialgerechte Rekonstruktion des Turmhelms, sondern forderte lediglich die Wiederherstellung der Kubatur und des äußeren Erscheinungsbilds.

### 3 Der Turm – Die Kontinuität des Denkmals und des denkmalpflegerischen Handelns

Seit Beginn und mit Fortschreiten der Risse und Schäden am Turmmauerwerk hat jede Generation die ihr zur Verfügung stehenden Mittel, Kenntnisse, Erkenntnisse und technischen Möglichkeiten eingesetzt, um den Turm – das Wahrzeichen – zu erhalten; um 1900 kamen moderne Eisenbaustoffe wie horizontale Zuganker (verdeckt) oder Ringanker (sichtbar) zum Einsatz. 1971 wurde der Turm nach Stand damaliger Technik mit Zement injiziert, vernadelt, verspannt.

Und aktuell wird auf Grundlage neuer Erkenntnisse und heutigem Fachwissen wiederum mit zeitgemäßen Materialien und Methoden am Turm repariert.

Der Blaue Turm zeigt sich in seiner langen und bewegten Geschichte und durch seine zahlreichen Veränderungen und Eingriffe zwar in seinem ursprünglichen Bestand reduziert und beeinträchtigt, ist also praktisch noch ein Fragment des staufischen Turms; aber in diesem Zustand nicht weniger bedeutend oder schützenswert.

Der Turm dokumentiert die Geschichte des Denkmals, die Geschichte der Veränderungen und den Umgang mit seinen Schäden und Rissen.

Aus seinen Zeitschichten werden Denkmalschichten. Jede Veränderung hat ihre Bedeutung, ihren Legitimations- und Erhaltungswert.

Aus Sicht der Denkmalpflege besitzt der Turm also trotz oder gerade wegen seiner Alters- und Geschichtsspuren einen hohen Aussage- und Originalitätswert, von dem auszugehen ist und den es zu bewahren gilt.

*Jedes Denkmal ist an die materielle Substanz gebunden, aus der es besteht und die seine Existenz erst ermöglicht. Sie lässt uns den Prozess*

*der Entstehung und Bearbeitung des Denkmals nachvollziehen, zeigt aber auch die Spuren der Zeit, die seit der Fertigstellung vergangen ist, berichtet von Umbauten, Veränderungen und Funktionswandlungen, vom Schicksal der Bewohner und Benutzer, von guten wie schlechten Phasen.*

(Hubel, S. 311)

Diese Auffassung basiert auf den Richtlinien einer zeitgemäßen Denkmalpflege, wie sie in der Charta von Venedig 1964 festgeschrieben wurde.

Es ist Aufgabe und Ziel der Denkmalpflege, das Denkmal mit seinen Veränderungen zu erkennen und zu verstehen, diese zu bewerten und geplante Maßnahmen zu steuern und anzupassen, so dass sie bestandsverträglich sind und das Denkmal in seinem überlieferten Erscheinungsbild nicht negativ verändern.

Dabei kann es notwendig sein, vergangene Maßnahmen, die sich als nicht bestands- oder denkmalverträglich herausgestellt oder die zu Folgeschäden geführt haben, zu korrigieren oder ggf. auch rückgängig zu machen. Die Denkmalpflege ist dabei auch aufgeschlossen gegenüber innovativen technischen oder ingenieurtechnischen Lösungen.

Grundsätzlich ist es aber Zielsetzung aller Maßnahmen am Denkmal, möglichst rücksichtsvoll und substanzschonend mit dem historischen und überlieferten Bestand umzugehen und frühere Veränderungen ebenso wie charakteristische Alterungsprozesse als Zeugnisse der Vergangenheit zu bewahren und ablesbar zu erhalten.

Um im Rahmen geplanter Maßnahmen die denkmalpflegerisch »richtige« Entscheidung treffen zu können, sind deshalb genaue Kenntnisse des Bauwerks erforderlich und ist der Denkmalwert zu definieren.

Das gründliche Erforschen, Untersuchen und Dokumentieren des Gebäudebestands unter Beteiligung entsprechender Fachleute ist deshalb wichtige Grundlage jeder Maßnahmenplanung.

Durch genaue Kenntnisse des Bauwerks und seines Schadensbilds kann der tatsächliche Maßnahmenumfang auf das Notwendige eingegrenzt und können Kosten genauer kalkuliert werden.

Waren im 19. und beginnenden 20. Jahrhundert Untersuchungsmethoden am Bauwerk und an den eingesetzten Materialien nur begrenzt möglich, erlauben es heute digital gesteuerte Techniken und Hilfsmittel, das Bauwerk in allen seinen sichtbaren und unsichtbaren Bereichen sowie in seinen einzelnen Bestandteilen präzise zu untersuchen. Baustoffe können auf Bestandsverträglichkeit und Dauerhaftigkeit genauestens getestet werden. Das Risiko

von Folgeschäden am Bauwerk lässt sich dadurch besser kalkulieren.

Das Schadensbild am Blauen Turm und der äußerst kritische Bauzustand machte deshalb die Beteiligung eines Expertenteams umso dringlicher. Nur durch den Sachverstand vieler Fachdisziplinen und einen intensiven Wissensaustausch konnte es gelingen, ein denkmalverträgliches und dauerhaftes Erhaltungs- und Reparaturkonzept zu entwickeln.

Zu Beginn der Voruntersuchungen 2012 gab es große Unsicherheiten, Fragen und Zweifel: Was waren die Ursachen der immer wiederkehrenden und fortschreitenden Schäden und Risse am Mauerwerk? Können sie gestoppt werden? Wie und womit? Gibt es überhaupt eine Therapiemöglichkeit, ein Reparaturkonzept für den Turm? Was würde es kosten? Wie ist es finanzierbar?

Das ganze Vorhaben scheint wie ein großes Experiment, ein Wagnis mit ungewissem Ausgang. Es ist für alle am Bau Beteiligten, Ingenieure, Architekten, Denkmalpfleger, Geologen, Steinmetze, Restauratoren und nicht zuletzt für die Stadt eine große Herausforderung.

Die Voruntersuchungen dienten in erster Linie der genauen Erfassung und Dokumentation des Gebäudebestands, der Erkundung des Mauerwerkgefüges und Kartierung aller Gesteinsschäden. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch eine digitale Rissüberwachung und -aufzeichnung.

Auf die erste Untersuchungskampagne folgte 2015 eine zweite, weil die Versuche mit Injektionsmörteln und Steinklebern zunächst wenig erfolgversprechend waren. Auch die Ergebnisse aus den statischen Untersuchungen waren entmutigend.

Fast schien es, als bliebe nur noch der Teilrückbau und Wiederaufbau des Turms als einziger Ausweg.

Die Erkenntnisse aus den Voruntersuchen und der kritische Bauzustand machten deutlich, dass reine substanzsichernde bzw. substanzhaltende Maßnahmen langfristig nicht zielführend waren. Auch ein Stützkorsett, wie es 2014 als Sofortmaßnahme zur Sicherung des Turms angebracht wurde, würde den Turm wegen seiner »Bewegungen« und kontinuierlichen Risszunahmen nicht dauerhaft sichern können. Und ein Rückbau und statisch veränderter Wiederaufbau des Turmhelms wäre ebenfalls nicht die Lösung, weil nicht nur die Statik, sondern auch und gerade das schlechte Turmmauerwerk als eine der Hauptursachen für die Rissbildung vermutet wurde. Davon abgesehen wäre dieser Eingriff und Verlust denkmalpflegerisch nicht vertretbar gewesen.

Im Ergebnis des intensiven fachlichen Austauschs bedeutete das für das Erhaltungskonzept:

Wenn der Turm als Der Blaue Turm, als authentisches Geschichtszeugnis in seinem Bestand und

seinem charakteristischen Erscheinungsbild erhalten werden soll, wird es für ein erneutes Verfüllen und Vernadeln – ähnlich wie 1971 – keine Alternative geben.

Aber die Methoden und verwendeten Materialien können nach heutigem und neuestem Stand der Technik und auf der Grundlage der detailliert vorliegenden Untersuchungsergebnisse und Bauwerkskenntnisse entwickelt und auf ihre Substanzverträglichkeit und Dauerhaftigkeit geprüft werden. Digitale Messverfahren ermöglichen ein gezieltes und kontrolliertes Einbringen des Injektionsmaterials. Durch die detaillierten Kenntnisse und Kartierungen der geschädigten Gesteinsoberflächen kann der Steinaustausch auf das Notwendigste reduziert werden. Regelmäßige Erfolgskontrollen und die Dokumentation aller Maßnahmen optimieren die Sanierungsergebnisse.

Sowohl im Ganzen als auch im Detail, insbesondere mit dem Erhalt der Holzterrasse im Innern, der Ausführung eines am historischen Bestand orientierten Fugenbilds oder der farblichen Retusche der Ankerkopfplatten können damit für das Denkmal angemessene und substanzverträgliche Lösungen gefunden werden.

In der Kontinuität der Denkmalgeschichte des Blauen Turms heißt es also: Weiterbauen am Denkmal, um das Wahrzeichen zu retten und seinen Wert zu erhalten.

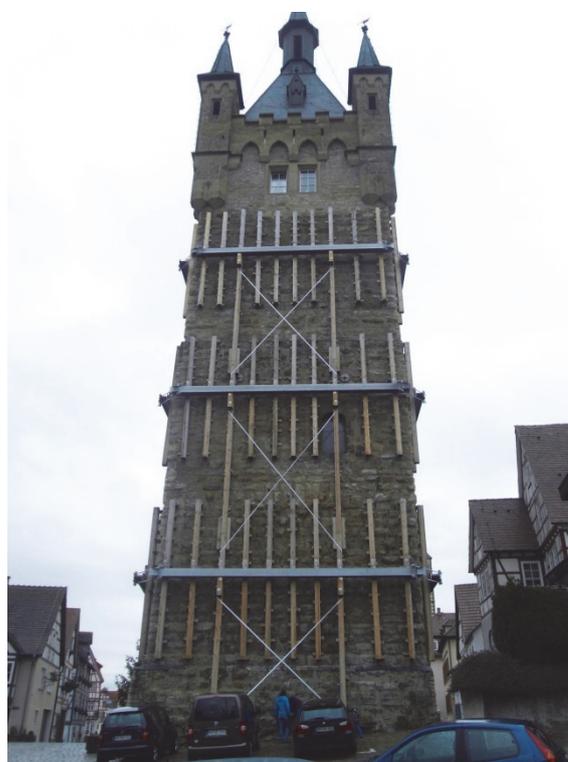


Bild 12 Notsicherung am Blauen Turm mit Stahlkorsett [Barthel & Maus 2014]

## Literatur

Arens, Fritz: Die Königspfalz Wimpfen, Berlin 1967.

Bad Wimpfen, Blauer Turm, Auswertung von Unterlagen über statisch-konstruktive Maßnahmen, aktuelles Schadensbild und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen, Text- und Anlagenteil, Barthel & Maus, Beratende Ingenieure GmbH, Dr.-Ing. Helmut Maus, Dipl.-Ing. Peter Kifinger, München 2012.

Bad Wimpfen, Blauer Turm, Zum Tragverhalten des Mauerwerks im Bestand und mögliche Tragmodelle als Grundlage einer Sicherung und Instandsetzung, Text- und Anlagenteil, Barthel & Maus, Beratende Ingenieure GmbH, München 2015.

Bad Wimpfen, Blauer Turm, Entwurf eines Sicherungs- und Instandsetzungskonzeptes mit Erstellung einer zugehörigen Kostenschätzung, Text- und Anlagenteil, Barthel & Maus, Beratende Ingenieure GmbH, Dr.-Ing. Helmut Maus, Dipl.-Ing. Arch. Felix Martin, München 2016.

Cichy, Bodo: Die bauliche Sanierung des Blauen Turms in Bad Wimpfen, in: Denkmalpflege in Baden Württemberg, 1. Jahrgang 1972, S. 34-37.

Hubel, Achim: Denkmalpflege – Aufgaben, Ziele und Probleme der gegenwärtigen Denkmalpflege, S. 311, Stuttgart 2006.

Kunstdenkmäler im Großherzogtum Hessen. Provinz Starkenburg. Ehemaliger Kreis Wimpfen. Bearbeitet von Dr. Georg Schaefer. Darmstadt 1898.

Ortsakten des Landesamts für Denkmalpflege. Bad Wimpfen. Blauer Turm. 1970ff.

Regia Wimpina. Beiträge zur Wimpfener Geschichte. Band 4. Sonderband zum Wiederaufbau des Blauen Turmes. Bad Wimpfen 1985.

Untersuchungsbericht Bad Wimpfen, Blauer Turm (Bericht Nr. 902 6808 000), 1. Untersuchungsabschnitt, Naturwissenschaftliche und gesteintechnische Voruntersuchungen, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart; Prof. Dr.-Ing. H. Garrecht, Dr. rer. nat. Friedrich Grüner, Dr.-Ing. Michel Stegmaier; Stuttgart 2016.

Untersuchungsbericht Bad Wimpfen, Blauer Turm (Bericht Nr. 903 0500 000), 2. Untersuchungsabschnitt, Mauerwerkstechnische Versuche und Mus-

terapplikationen zu Instandsetzungsvorschlag; Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart; Dr. Josipa Bosnjak, Prof. Dr.-Ing. H. Garrecht, Dr. rer. nat. Friedrich Grüner, Dipl.-Ing. Frank Lehmann, Dr.-Ing. Michel Stegmaier; Stuttgart 2017.

Wimpfen am Neckar. Geschichtlich und topographisch nach historischen Urkunden und archäologischen Studien, dargestellt von Dr. Adolf von Lorent. Stuttgart 1870.

## Autorin

Ulrike Schubart  
Landesamt für Denkmalpflege  
im Regierungspräsidium Stuttgart  
Referat 83.2 Praktische Bau- und Kunstdenkmalpflege  
Berliner Straße 12  
73728 Esslingen am Neckar  
Tel.: +40 711 904 45-175  
E-Mail: Ulrike.Schubart@rps.bwl.de

## Voruntersuchungen und Sanierungskonzept

*Helmut Maus*

**Abstract:** Der vorliegende Artikel stellt die am Mauerwerk des Blauen Turms vorgenommenen Untersuchungen, die dabei gewonnenen wesentlichen Erkenntnisse und das daraus hergeleitete Sanierungs- und Instandsetzungskonzept vor.

Ein erstes Untersuchungsprogramm mit Georadar-Messungen, Kernbohrungen und Bauteilöffnungen führte zu der Erkenntnis, dass ein Großteil der äußeren Schalensteine mehr oder weniger stark zerrissen sind und das Kernmauerwerk aufgrund von hohlraumreichem »opus-spicatum«-Mauerwerk weiterhin die Außenschalen auseinandergedrückt.

Zur Beantwortung der daraus hervorgehenden Fragen wurde ein zweites, noch umfangreicheres Untersuchungsprogramm genehmigt und durchgeführt. Die Ergebnisse lieferten eine ausreichende Sicherheit für die Annahme, dass mit einem Verfahren, welches zwar 1971 standardmäßig und nach Stand der Technik zum Einsatz kam, diesmal aber speziell auf die Gegebenheiten am Blauen Turm ausgerichtet wird, ein dauerhafter Erfolg zu erzielen ist.

**Keywords:** Voruntersuchungen, 3D-Scan, Kernbohrungen, Georadar, Injektionen, Sanierungskonzept

### 1 Veranlassung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 315 »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke« an der TH Karlsruhe unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Fritz Wenzel war der Blaue Turm bereits 1985 Mittelpunkt einer interdisziplinären Forschungstätigkeit. Die Stadt Bad Wimpfen hatte die Erlaubnis erteilt, das für den Wiederaufbau der 1984 abgebrannten Turmspitze erstellte Gerüst für Untersuchungen am Mauerwerk zu nutzen. Die damaligen Untersuchungen bestanden aus Risskartierungen, Bohrkernproben, Endoskopie und chemisch-mineralogischen Materialanalysen. Sie wurden vorgestellt im 1. Kolloquium des SFB 315 im Dezember 1985 und veröffentlicht in Heft 2 der Mitteilungen des SFB 315 (1986). Quintessenz damals war, dass für eine fundierte Aussage zur Ursache der seit der Sanierung 1971 wieder aufgetretenen Rissbildung weitere Untersuchungen erforderlich wären, welche aber im Rahmen des SFB damals nicht geleistet werden konnten.

Auch in den Jahrzehnten danach gab es Versuche, z.B. mittels Rissspionen, Hinweise darauf zu erhalten, wie sich das Mauerwerk weiter verhält.

Der gegen Ende des Jahres 2009 am Aborterker aufgetretene klaffende Riss war damals Anlass zu sofortigen Sicherungsmaßnahmen an diesem Bauteil. Eine Inaugenscheinnahme des gesamten Turmes hinterließ wiederholt den Eindruck, dass es zu weiteren Bewegungen im Mauerwerk kam.

Daraufhin gab das Regierungspräsidium Stuttgart, Referat 86 – Denkmalpflege, eine »Auswertung von Unterlagen über statisch-konstruktive Maßnahmen, aktuelles Schadensbild und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen« in Auftrag. Es sollten aus den bekannten bisherigen Bautätigkeiten die ingenieurtechnischen Problempunkte herausgearbeitet, eine erste vollständige Inaugenscheinnahme vorgenommen sowie die sich daraus zur endgültigen Beurteilung der statischen Situation erforderlichen Untersuchungen zusammengestellt werden. Der Bericht wurde im Dezember 2012 abgegeben (siehe dazu auch den Beitrag von Peter Kifinger).

## 2 Erstes Untersuchungsprogramm

### 2.1 3D-Scan des Turmstumpfes

Mit bloßem Auge sind Verformungen und Ausbeulungen (bis auf die der Westseite innen und außen) nicht zu erkennen. Um hierzu dennoch genauere Aussagen treffen zu können, wurde ein 3D-Scan des Turmstumpfes erstellt und ausgewertet.

Pro Seite gibt es aufgrund des horizontalen Versprungs zwei Wandflächen. In der Darstellung der Verformungen wurde der in den acht Flächen am tiefsten liegende Wandpunkt mit der Farbe »dunkelblau« belegt. Je weiter Punkte der Wandfläche nach außen treten, desto mehr gehen die Farben von »grün«, über »gelb« zu »rot« über. Die Zahlenwerte bewegen sich dabei von 1 cm bis zu 45 cm.

Da auch buckelquadrige Steine verbaut wurden, treten vereinzelt »Spitzen« hervor. Insgesamt lässt sich aber erkennen, dass die jeweiligen Wandflächen unterschiedlich verformt sind. Zur Verdeutlichung wurden in den Darstellungen die Verformungen mit dem Faktor 20 multipliziert.

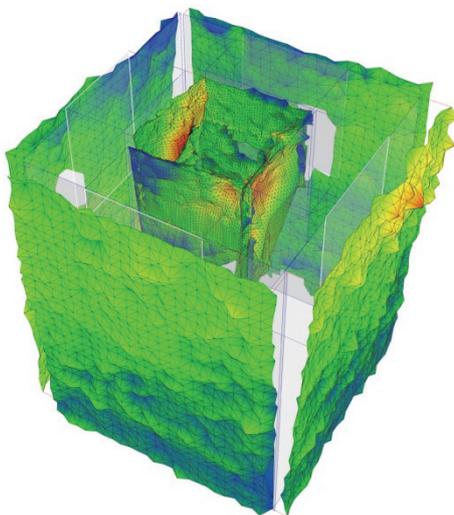


Bild 1 3D-Scanansicht des unteren Turmteils mit inneren und äußeren Verformungen (20-fach vergrößert). Betrachtet aus Nordwesten

Die wesentlichen Erkenntnisse daraus sind: Nord- und Westseite weiten sich vom Sockel ausgehend bis zum Versprung auf halber Höhe deutlich auf. Die größte Ausbeulung des Mauerwerks ist am Versprung der Westseite mit nicht ganz 40 cm zu messen.

Die Ostseite unten ist relativ gleichmäßig gemauert. Nur zum Versprung hin fällt der südliche Teil etwas zurück.

Die Südseite ist im Wesentlichen unauffällig.

Der obere Teil ist bis auf die Ostseite fast senkrecht errichtet und weniger verformt. Nur die Ostseite neigt sich in der südlichen Hälfte oben nach Westen.

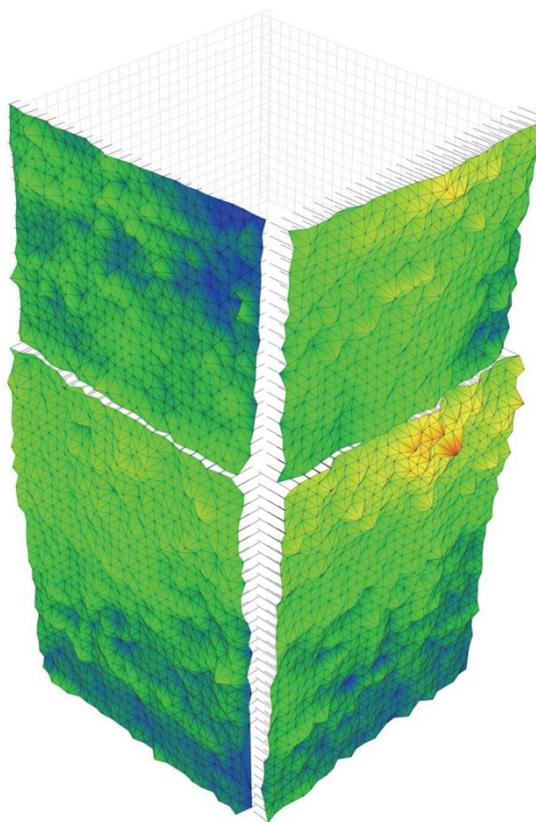


Bild 2 3D-Scan-Ansicht Nord-West mit zusammengefügteten unterem und oberem Turmteil (20-fach vergrößert)

Innen besteht ebenfalls auf Höhe des äußeren Versprungs im Westen und Osten eine deutlich erkennbare Ausbeulung.

Es drängt sich der Verdacht auf, dass aufgrund eines »Schadensfalles« auf halber Höhe die obere Hälfte des Turmes zeitversetzt und sicher nicht absichtlich mit Rücksprung zum unteren Turmteil errichtet wurde.

### 2.2 Georadar

Messungen mit dem Georadar hatten die Aufgabe, Ablösungen der äußeren Steinschale vom Verfüllbereich des mehrschaligen Mauerwerks sichtbar zu machen.

»Ablösungen« und Hohlräume wurden hinter der äußeren Steinschale auf allen vier Seiten und in unterschiedlicher Intensität und Größe gemessen. Zudem wurden die Pieper'schen Ankerplatten eindeutig lokalisiert.

Wichtigste Erkenntnis dieser Untersuchungen: Mehr oder weniger haben sich fast alle vier Eckbereiche vom Kernmauerwerk gelöst.

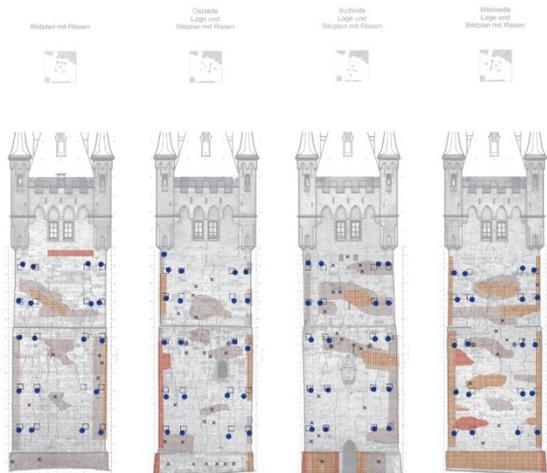


Bild 3 Georadarwertung

## 2.3 Kernbohrungen

Zur Erkundung des inneren Aufbaues im staufischen Mauerwerk der ersten etwa 25 Höhenmeter des Turms wurden in einem ersten Schritt Kernbohrungen - über die Mauerwerksflächen verteilt - durchgeführt. Zudem wurde mittels Endoskop und Taschenlampe auch der Maueraufbau im Innern der Bohrlöcher erkundet.

Wie bereits 1985 im Rahmen des Sonderforschungsbereichs festgestellt, wurden am Blauen Turm so gut wie keine zusammenhängenden Bohrkern- oder Bohrkerne mit nennenswerter Mörtelanhaftung zu Tage gefördert. Der angetroffene Zuschlag lag in der Bohrkernkiste meistens als Kies, aber nicht als Mörtel vor. Die vereinzelt angetroffenen, intakt geborgenen Mörtelstückchen besaßen keine große Festigkeit und konnten Großteils per Hand zerdrückt werden. Auch wenn die Bohrtätigkeit selbst als "Verursacher" für die Zerkleinerung der Bohrkern- und Mörtelstücke berücksichtigt wird, war das Ergebnis beim Blauen Turm gegenüber Bohrkernen von anderen Mauerwerksbauten beunruhigend.



Bild 4 Bohrkiste mit »Bohrkern«

Auffallend waren die – später im Labor qualitativ bestätigten – extrem hohen Druckfestigkeiten des 1971 eingebrachten Spritzfugmörtels.



Bild 5 Überbohrter Spritzfugmörtel aus 1971, ein Kieselstein als Setzhilfe und historischer Setzmörtel in guter Qualität

Endoskopische Untersuchungen der Bohrlöcher zeigten sehr häufig durch Spülwasser herausgelöste ehemalige Mörtelbereiche. Häufig lag nur noch Kies vor. Sehr oft gab es mehr oder weniger starken Nachfall. Auch dies deutete auf eine zumindest lokal nicht vorhandene oder nicht stabile Mörtelmatrix hin.

## 2.4 Mauerwerksöffnungen

Wegen der Rissbildung in allen vier Turmwänden wurden Öffnungen im Schalenmauerwerk als risikobehaftet eingestuft. Mit Errichtung des Untersuchungsgerüsts wurde deshalb eine Umgürtung des Turmmauerwerks vorgenommen.

Die Öffnungen wurden an vier Stellen von einem erfahrenen Steinmetz fachgerecht durchgeführt, jeweils zwei auf der West- und Ostseite, eine im unteren und eine im oberen Turmteil.

Erkenntnisse:

Die Abmessungen der Außenschalensteine an den vier Öffnungen bewegen sich zwischen 37–63cm in der Tiefe, 13–42cm in der Höhe und 50–112cm in der Breite. Generell ist festzustellen: Je höher die Steine, desto weniger tief sind sie. Je flacher, desto

tiefer binden sie ein. Die jeweiligen Maßkonstellationen dürften der Masse geschuldet sein, die zur Erbauungszeit mit den damaligen Mitteln gerade noch auf der Baustelle bewegt werden konnte. Viele Steine sind mehrfach vertikal gerissen. Die Risse verlaufen dabei sowohl senkrecht zur Außenfläche als auch parallel dazu.



Bild 6 Oberflächenparalleler Riss im äußeren Stein

Der bereits bei den Umbaumaßnahmen 1851/52 als wenig bindemittelhaltig beschriebene Kies-Sand-Mörtel des Verfüllbereichs ist stellenweise nach Abtrocknung der Mörtelfeuchte mit den bloßen Händen herauszuholen. Dabei weist der angetroffene historische Mörtel optisch einen hohen Bindemittelanteil auf, aber er besitzt keine nennenswerte Festigkeit. Ein »Abbinden« hat nicht oder nur in geringem Maße stattgefunden. Dies ist der Grund, weshalb die Fein- und Feinstbestandteile beim Kernbohren mit dem Spülwasser vollends gelöst und heraustransportiert wurden. Gleichzeitig aber auch ein Problem beim Injizieren: Ein solcher Mörtel "saugt" viel Anmachwasser ab und verhindert ein tieferes Eindringen der Suspension.

Hinter den Steinen der äußeren Schale sind schrägliegende kleinere Steine verbaut worden. Ähnlich einem »opus spicatum« liegen Bruchsteine im »Fischgrätmuster« sowohl senkrecht zur Außenfläche als auch parallel zur Außenfläche vor. Die Steine in den Öffnungen haben meistens etwas mehr als die halbe Steinhöhe der äußeren Steine und sind jeweils so eingebaut, dass zwei schräge Steinlagen die Höhe der äußeren Steine erreicht. Jede sichtbare äußere Lagerfuge zieht sich flächig über den gesamten Turm. Alle Lagerfugen wurden offensichtlich mit einem Mörtelverstrich glatt gezogen, bis eine neue Steinlage auf die Außenschale gesetzt und das Kernmauerwerk wieder mit unterschiedlich langen – und dadurch mit unterschiedlichen Neigungen versehenen – Bruchsteinen verfüllt wurde.

Dabei wurde oftmals der dabei entstehende Hohlraum zwischen zwei Steinen nicht mit Mörtel verfüllt. Auch hat das Pieper'sche Injektionsgut den Weg dorthin nicht immer gefunden.



Bild 7 Schrägliegende »opus-spicatum«-Steine im Kernmauerwerk



Bild 8 Pieper'sches Injektionsgut hat 1971 einen der »armdicken« Risse im Mauerwerk verfüllt. Unter der Meterstabspitze ist die seitdem weitergehende Aufweitung des Mauerwerks am Riss erkennbar (s. rote Pfeile)

Das freigelegte Pieper'sche Injektionsmaterial hat nach Augenschein primär die z. T. seit Baubeginn aufgetretenen Risse im Kernmauerwerk von innen heraus verfüllt. Da von "armdicken" Rissen in der

Literatur berichtet wird (siehe hierzu den Beitrag von Peter Kifinger), von denen durch Zufall auch einer in einer Öffnung angetroffen wurde, ist es im Nachhinein nicht erstaunlich, dass 1971 mehr Injektionsgut verbraucht wurde, als ursprünglich für ein »stauisches Mauerwerk« abgeschätzt. Auch das wohl regelmäßig durchgeführte »Ausflicken« konnte dokumentiert werden. Die Risse wurden u.a. mit Ziegelstücken bzw. sogar ganzen Ziegeln ausgestopft und dann mit verschiedenen Mörteln wieder geschlossen. Der Stopfmörtel hebt sich optisch vom historischen oder 1971er Injektionsgut deutlich ab. Neue Klaffungen zwischen Pieper-Injektionszement und historischen Füllsteinen belegen, dass seit 1971 weiterhin Bewegungen auch im Mauerwerk zu verzeichnen sind.

## 2.5 Fragen aus den Erkenntnissen der ersten Voruntersuchungen

Nachdem die oben beschriebenen Untersuchungsergebnisse belegten, dass die Steine des äußeren Schalenmauerwerks mehr oder weniger stark zerissen sind und das Kernmauerwerk weiterhin die Außenschalen auseinanderdrückt, haben sich im Hinblick auf ein Instandsetzungskonzept, bei dem das Augenmerk auf einer Vergleichmäßigung der Spannungsverteilung im Querschnitt und auf einer Verbesserung des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Mauerwerksschalen liegt, weitere Fragen ergeben:

### 2.5.1 Kernmauerwerk

Lässt sich das Kernmauerwerk besser als bisher verfüllen und durch Einbettung in eine neue Mörtelmatrix stabilisieren?

Mit welchem Injektionsmaterial? Und wie ist die Vorgehensweise?

### 2.5.2 Schalen-Steine

Wo befinden sich gerissene Steine und wie viele Steine sind es?

Können die Steine geklebt werden?

Mit welchem Kleber? Und wie ist der Kleber einzubringen?

Wie ist die Tragfähigkeit eines aus gerissenen Steinen bestehenden Mauerwerks zu bewerten?

Wie ist der Zustand hinter der Spritzbetonschale innen?

### 2.5.3 Baugrund

Auf was genau steht der Blaue Turm?

Kann der Baugrund noch weitere Belastung aufnehmen?

### 2.5.4 Überwachung und Erfolgsprüfung

Wie verhält sich das Turmmauerwerk vor/während/nach der Umsetzung einer Instandsetzungsmaßnahme?

Wie kann der Erfolg oder Misserfolg von Instandsetzungsmaßnahmen festgestellt werden?

## 3 Zweites Untersuchungsprogramm

Diese Fragen führten dazu, dass mit dem Landesamt für Denkmalpflege, der MPA Stuttgart, Mörtelherstellern, Fachfirmen und Fachbüros ein zweites Untersuchungsprogramm entwickelt, diskutiert und kostenmäßig abgeschätzt wurde. Dank dem guten Willen und der finanziellen Bereitschaft von Land und Kommune, ein mögliches Sicherungs- und Instandsetzungskonzept für den Blauen Turm erfolgsorientiert vorab zu erkunden, wurde ein zweites Untersuchungsprogramm mit ca. € 700.000,- Gesamtvolumen genehmigt. Darin enthalten waren auch Versuche zu restauratorischen Fragen bezüglich Oberflächenbearbeitung und Konservierung.

### 3.1 Injektionsversuche

Mit handelsüblichen Materialien hergestellte Injektionssuspensionen lassen sich größere Hohlräume - sofern sie angebohrt wurden und/oder bei Durchgängigkeit im Mörtelgefüge - erfolgreich verfüllen. Beim Eindringen in kleinporeige Strukturen oder schmalen Rissen ist aber schnell »ein Ende« erreicht. Die Ursachen liegen einerseits in der Mahlfineinheit der Bindemittel, aber auch im sich durch Absaugen von Anmachwasser verändernden Fließverhalten der Suspension.

Deshalb wurden die Injektionsversuche am Blauen Turm zweistufig vorgenommen:

1. Vorverfüllen der Hohlräume mit einem handelsüblichen Injektionsmörtel HSTV-p der Firma Tubag
2. »Nachverdichten« mit einer speziellen Feinstzement-Suspension der Firma Dyckerhoff

An der Westseite und Ostseite wurden je drei Versuchsfelder über die Turmhöhe festgelegt:

- Im Sockelbereich, in den laut Auswertung der Injektionsmengen von 1971 ein wesentlicher Anteil der Gesamtmenge injiziert wurde und dadurch nur noch »wenig« Aufnahmevermögen vorliegen sollte,

- im mittleren, aufgeweiteten Bereich, wobei einmal der untere Turmteil
- und einmal der beginnende obere Turmteil gewählt wurde.

Es waren zwei Fachfirmen beteiligt, die sich die Injektionsfelder aufteilten und mit unterschiedlichem Equipment arbeiteten.

Der Trass-Verpressmörtel-HS, Körnung »0«, der Firma Tubag, wurde nach Vorgabe gemischt und standardmäßig injiziert.

Die Spezial-Suspension mit Feinstzement musste nach einer Rezeptur in Stufen gemischt und die fertige Suspension mittels Marshtrichter und Dichte-Waage auf die vorgegebenen Werte überprüft werden.

Über verschiedene Abstände der Injektionslöcher über- und nebeneinander sollte das Eindring- und Fließverhalten der Suspensionen ermittelt werden. Fließmengenähler maßen Injektionsvolumen und Druckverlauf. Der Maximaldruck an den Packern wurde auf 10 bar begrenzt.

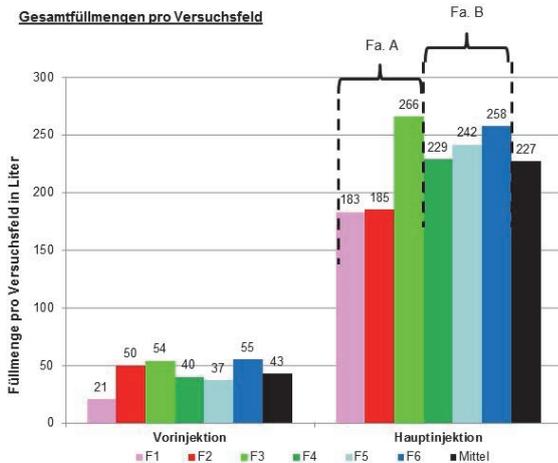


Bild 9 Füllmengen der Vor- und der Hauptinjektion

An Ergebnissen konnte festgehalten werden: Die Füllmengen beim Feinstzement lagen etwa beim 5-fachen Wert der Vorinjektion. Die Versuchsfelder der oberen Ebenen nahmen etwa 35 % mehr Suspension auf als die im Sockelbereich. Das Versuchsfeld im westlichen mittleren unteren Turmteil nahm mit 266 Liter Suspension die größte Einzelmenge auf.



Bild 10 Bohrkern aus dem Versuchsfeld F4 mit historischem Mörtel und Feinstzementsuspension

Anhand der gezogenen Bohrkern im Rahmen der Nachuntersuchung konnte ein Erfolg bei der Fließ- und Eindringfähigkeit festgestellt werden. Die Feinstzementsuspension drang in die feinsten Risse und Hohlräume, es konnten zusammenhängende Bohrkern gewonnen werden.

Die Bohrlochwandungen waren gleichmäßiger, es gab weniger Nachfall als vor dem Injizieren.

Die Bohrlöcher wurden von der MPA Stuttgart endoskopiert und das Eindringverhalten der Suspensionen bewertet, Teile der Bohrkern wurden auf Druckfestigkeit geprüft.

Weitere Erkenntnisse aus den Injektionsversuchen: Kleinere Hohlräume und feine Risse in diesem Mauerwerk lassen sich nur mit spezieller Feinstzement-Suspension erreichen.

Bis etwa 1 m Tiefe lässt sich ein Eindringen der getesteten Materialien noch feststellen.

In der oberen Turmhälfte ist sowohl ein Vorverfüllen als auch eine Feinstzementinjektion erforderlich.

Ein zielführendes Bohrraster hat Abstände von 30–35 cm.

Der noch vorhandene Hohlraumanteil wird mit 10–15 % bewertet.

### 3.2 Weitere statisch relevanten Erkenntnisse

Aus anderen Versuchen und statischen Betrachtungen wurden zusätzliche Erkenntnisse gewonnen:

Die Lagerbedingungen der großen Schalensteine muss durch Entfernen der Spritzputzverfugung deutlich verbessert werden.

Die Steine der Außenschale müssen durch Lastübertragung in einen »verstärkten« Füllmauerkern entlastet werden.

Eine relativ hohe Anzahl der Schalensteine ist oberflächenparallel gerissen.

Eine »Verklebung« der Steine ist nicht möglich, daher statisch nicht ansetzbar.

Eine Brandschädigung der Steine innen ist im Wesentlichen im Osten unten anzutreffen.

Das »opus spicatum« ist durchgängig vorhanden.

Hohlräume im Kernmauerwerk sind mehr oder weniger überall vorhanden.

## 4 Sanierungskonzept

Die Maßnahmen am Mauerwerk des Turmstumpfes wurden mit dem Ziel konzipiert, das Füllmauerwerk tragfähig zu ertüchtigen und die derzeit wegen des Turmhelms hoch beanspruchte Außenschale mittels Zusammenspannen aller Schalen zu entlasten sowie gleichzeitig dem derzeit weniger belasteten Füllmauerwerk mehr Last zuzuführen.

### 4.1 Erhöhung der Tragfähigkeit des Füllmauerwerks

Je mehr opus-spicatum-Steine in eine stabile Mörtelmatrix gebettet werden, desto mehr werden Lastumleitungen und Bewegungen verhindert, zumindest erschwert. Zusammen mit einer systematischen Bewehrung wird eine Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht.

#### 4.1.1 Injizieren

Dazu wird das Turm-Mauerwerk in den Lagerfugen innen und außen in einem engen Raster angebohrt, die Löcher mit Packern besetzt und in der unteren Hälfte mit Feinstzementsuspension injiziert. In der oberen Hälfte wird eine Verfüllung mit handelsüblichem Material vorgeschaltet.

Die Bearbeitung beginnt unten und wird in 4 Abschnitten (jeweils 3 Gerüstlagen) sukzessive nach oben fortgesetzt. Vor Beginn des nächsten Abschnitts muss das Injektionsmaterial eine ausreichende Festigkeit erreicht haben.

Aufgrund der festgestellten maximalen Eindringtiefe des Injektionsgutes von ca. einem Meter muss der etwa drei Meter starke Turmquerschnitt in drei Etappen verfüllt werden. Das äußere Drittel durch Bohrungen von außen, das Turminnere-Drittel durch Bohrungen von innen und das querschnittsmittlere Drittel wieder durch Bohrungen von außen. Für den Fugenverschluss werden die Risse außen mit einer Tonschlämme vorab verschlossen. Im Innern des Turmes bleibt die Spritzbetonschicht zur Abdichtung vorerst erhalten. Die Tonschlämme wird nach den statisch-konstruktiven Maßnahmen im Zuge der Oberflächenbearbeitung wieder mechanisch und/oder mit Hochdruckwasserstrahl entfernt. Die Spritzbetonschicht innen kann nach dem Injizieren entfernt werden.

Das Mauerwerk des Turmes wird mit hoher Wahrscheinlichkeit wegen der Injektionsmaßnahmen im Gefüge weiteren Bewegungen unterliegen. Deshalb soll zur Reduzierung weiterer Rissbildung das Mauerwerk auch verspannt werden.

#### 4.1.2 Vorspannbare Anker

Die Nadelankerkanäle werden durch die Steine gebohrt. Aufgrund der Erkenntnis, dass offensichtlich alle Steinlagen beim Erstellen rundum horizontal abgeglichen wurden, bevor weitergebaut wurde, müssen folgerichtig die Bohrungen außen im Stein auch innen im Stein ankommen (sofern nicht eine Stellfuge getroffen wird). Damit lassen sich die Steine gegenseitig zusammenspannen. Die Anspannung erfolgt jeweils von außen mittels gewindebesetztem Nadelankerende. Innen wird die Ankerplatte mit dem Anker verschweißt und in den Stein eingelassen.

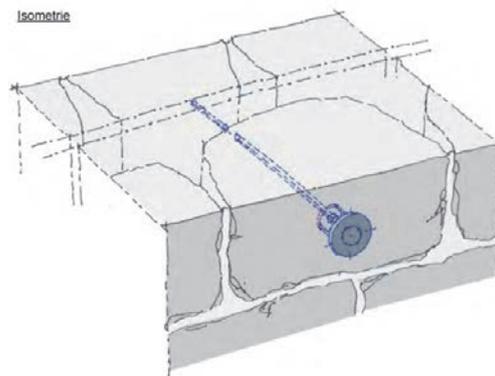


Bild 11 Entwurfsskizze für einen vorspannbaren Nadelankerkopf

Für die Eckbereiche müssen einseitig auf Haftverankerung dimensionierte Nadelanker »über Kreuz« verwendet werden. Diese können selbstverständlich nur von außen angespannt werden.

Im Entwurf wurden für die Ankerköpfe mehrere Varianten vorgestellt. Gewählt wurde ein topfförmiges Drehteil aus Edelstahl, welches in eine Sackbohrung versenkt wird und die Zugkraft des angespannten Ankers über den überstehenden Topfrand als Druck auf den Stein abgibt. Mittels aufgeschraubter Deckel sind die Ankermutter zugänglich und die Spannkraft kann bei Bedarf nachjustiert werden.

Wegen der festgestellten oberflächenparallelen Risse in den Steinen der Außenschale ist eine Versenkung der Ankerplatte mit anschließendem Verschluss mittels Vierung aufgrund der notwendigen Tiefe nicht möglich.

Um trotz der senkrecht zur Wandfläche gerissenen Schalensteine eine in sich stabile Außenschale zu

erhalten, werden die gerissenen Schalen zu zusätzlich horizontal zusammengedrückt. Außen sichtbare Stangen schieben wegen der Temperaturanfälligkeit und auch wegen des Erscheinungsbildes aus. Innen eingebaute Betonrahmen mit diagonal in den Ecken durchgeführten Zugankern mit außen aufgesetzten Eckwinkeln beeinträchtigten erheblich den Turminnenraum. Und direkt durch die gerissenen Schalensteine die Ankerkanäle zu bohren erschien im derzeitigen Zustand zu riskant.

Gewählt wurde ein einfeldriger Ankerbarren, der nur an den Enden auf dem Mauerwerk aufliegt und mittels mittig angeordneten Spannankern auf das Mauerwerk gepresst wird. Auf diese Art konnte die Bohrachse deutlich hinter die äußeren Schalensteine gelegt werden. Bei einem Höhenversatz von ca. 10 cm könnten sogar zwei Spannankerlagen am selben Eckstein angebracht werden.

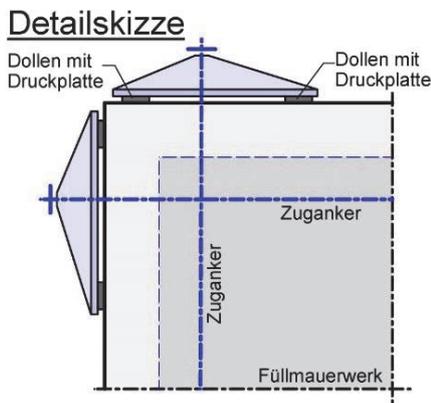


Bild 12 Entwurfsskizze Eckverankerung mit Ankerbarren

Alle Nadel- und Spannanker werden trotz Ausfüllung des Bohrkanals mit Mörtel in ihrer Achse beweglich eingebaut. Damit ist eine Nachspannbarkeit – sollte sie erforderlich werden – gegeben. Ausgewählte Nadel- als auch Spannanker werden vorab in der MPA Stuttgart mit Dehnmessstreifen besetzt, kalibriert und ihr Verhalten nach dem Einbau regelmäßig im Rahmen des Controlling-Systems mindestens 10 Jahre lang überwacht.

## 4.2 Erhöhung der Tragfähigkeit des Schalenmauerwerks

Bei den Vorversuchen zur Steinklebung wurde ersichtlich, dass eine »planmäßige Verklebung« der gerissenen Schalensteine nicht möglich ist. Die haarfeinen Risse wurden beim Bohren eines Injektionskanals bereits mit Bohrmehl verstopft, und auch ein Absaugen des Bohrmehls und eine »Reinigung« konnten keine nennenswerte Abhilfe schaffen.

Statisch kann diese Maßnahme also nicht angesetzt werden.

Alle oberflächenparallel gerissenen Schalensteine werden deshalb bis zu einer Risttiefe von 40 cm steinmetzmäßig vernadelt.

Am Turm wurden hauptsächlich zwei Gesteinsarten verbaut: Der beim Spalten bläulich schimmernde Muschelkalkstein (»Blaustein«) und ein grünlich-brauner Dolomit-Kalkstein. Beide Steinarten zeigen über den Turm unterschiedlich verteilt würfelartige Auflösung, z. T. kombiniert mit blättereigiger Schalenbildung.

Eine Kartierung durch die MPA Stuttgart belegt, dass diese Art der Steinschäden hauptsächlich im oberen Turmteil anzutreffen ist.



Bild 13 Zerrissener Muschelkalkstein

Zur Verbesserung des Kraftflusses in den Außenschalen wird deshalb bei diesen Steinen ein Steinaustausch vorgenommen. Der vorgesehene Austausch muss aber vor Umsetzung der Maßnahme nochmals auf Notwendigkeit überprüft werden, denn Ziel aus statischer Sicht ist, den vorhandenen Kraftfluss durch Störungen (wie z. B. Steinaustausch) auf ein Minimum zu reduzieren. Wo möglich, soll der »Steinkern« erhalten bleiben und nur die Oberfläche durch eine etwa 20 cm tiefe Vierung ersetzt werden. Mittels injizierter Suspension wird der neue Stein zwecks Kraftschluss mit Mörtel satt umpült.

## 4.3 Restauratorische Maßnahmen

Die Spritzverfugung von 1971 wird aufwändig wieder herausgenommen und durch einen deutlich weicheren Kalkmörtel – im Spritzverfahren eingebracht – ersetzt.

Gereinigt werden die gesamten Oberflächen mit einem schonenden Strahlverfahren und das finale Aufbringen einer Schutzschlämme soll die Steinoberflächen schützen.

## 5 Zusammenfassung

Grundlage für das derzeit ausgeführte Sanierungs- und Instandsetzungskonzept waren die Ergebnisse von bisher selten in diesem Umfang und Tiefgang genehmigten Voruntersuchungen vor Ort am Blauen Turm als auch in den Werkshallen und Labors der MPA Stuttgart.

Die Ergebnisse aus einem ersten Untersuchungsprogramm mit Georadar-Messungen, Kernbohrungen und Bauteilöffnungen führten zu der Erkenntnis, dass ein Großteil der äußeren Schalensteine mehr oder weniger stark zerrissen sind und das Verfüllmauerwerk im Kern aufgrund von hohlraumreichem »opus-spicatum«-Mauerwerk weiterhin die Außenschalen auseinandergedrückt.

Zur Abklärung, welche Instandsetzungsverfahren sich zur Sicherung und Instandsetzung des Mauerwerks eignen, wurde ein darauf aufbauendes zweites Untersuchungsprogramm am Blauen Turm – u.a. mit Testfelder für Injektionsmaterialien – durchgeführt. Die Ergebnisse lieferten eine ausreichende Sicherheit, dass mit einem Verfahren, welches zwar 1971 standardmäßig und nach Stand der Technik zum Einsatz kam, diesmal aber speziell auf die Gegebenheiten am Blauen Turm ausgerichtet wird, ein dauerhafterer Erfolg zu erzielen ist.

Die statisch-konstruktiven Maßnahmen wurden für folgende Ziele konzipiert:

- Deutliche Stabilisierung des Füllmauerwerks zwischen den beiden Steinschalen und damit Erhöhung der Tragfähigkeit
- Verspannung des mehrschaligen Turm-Mauerwerks zur Reduzierung weiterer Bewegungen und zum Spannungsausgleich
- Verbesserung des Kraftflusses in den Außenschalensteinen bei würfelförmiger Auflösung

Diese Ziele werden erreicht durch intensives Injizieren des Füllmauerwerks mit speziell dafür entwickelten Suspensionen, Einbau von vorzuspannenden Ankern und dem zurückhaltenden lokalen Austausch von stark zerrissenen Steinen in der Außenschale.

## Autor

Dr. Helmut Maus  
Barthel & Maus  
Beratende Ingenieure GmbH  
Infanteriestraße 11a  
80797 München  
Tel.: +49 89 286860-0  
E-Mail: H.Maus@barthelundmaus.de



# Ermittlung eines gebäudespezifischen Bemessungswertes für die Mauerwerksdruckfestigkeit am Beispiel des Blauen Turmes in Bad Wimpfen

Michael Stegmaier

## Abstract:

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen wies trotz einer umfangreichen Sanierung in den Jahren 1970/1971 eine weiter fortschreitende Rissbildung in der Außenschale des Mauerwerks auf. Im Rahmen einer Zustandserfassung und Erarbeitung eines Sanierungskonzeptes wurden umfangreiche Materialuntersuchungen durchgeführt. Mit dem auf dieser Grundlage aus tabellierten Werten in der DIN EN 1996-1-1/NA ermittelten, charakteristischen Wert der Mauerwerksdruckfestigkeit konnte kein Standsicherheitsnachweis für den Turm erbracht werden. Zur Ermittlung eines gebäudespezifischen Bemessungswertes unter Berücksichtigung der vorhandenen Schädigungen wurden umfangreiche Versuche an kleinen Prüfwänden durchgeführt. Aus diesen Versuchen konnte ein spezifischer, für den Blauen Turm gültiger Bemessungswert ermittelt werden, der trotz der vorhandenen Schädigung des Mauerwerks deutlich über den normativ festgelegten Bemessungswerten nach DIN EN 1996-1-1/NA liegt.

**Keywords:** Natursteinmauerwerk, Druckfestigkeit, Vorschädigung

## 1 Anlass

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen ist Teil einer Kaiserpfalz aus der staufischen Zeit. Eine genaue Datierung der Pfalz ist schwierig, aber der Blaue Turm wurde um 1200 n. Chr. errichtet. Im Laufe der Geschichte änderte sich die Gestalt des Turmes mehrfach. Ursache für diese Veränderungen waren in der Regel Brandereignisse.

Die erste dokumentierte Sanierung erfolgte im Jahre 1851/1852. Danach traten erste statische Probleme auf. Zur Sicherung des Turmes wurden 1900 Eisenanker eingebaut, die aber eine weitere Rissbildung im Turm nicht verhindern konnten.

Im den Jahren 1971/1972 wurde dann eine umfassende Sanierung des Turmes durchgeführt. Nach einem weiteren Brandereignis 1984 wurden beim Wiederaufbau Rissbildungen, Mörtelschäden und Salzausblühungen festgestellt.

2012 wurde dann das Ingenieurbüro Barthel & Maus Beratende Ingenieure GmbH mit einer Schadensaufnahme, der Ermittlung der Ursache für die weiter fortschreitende Rissbildung (siehe Bild 1) sowie der Erstellung eines Sanierungskonzeptes

beauftragt. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen wurde 2013 die MPA Universität Stuttgart für die Ermittlung der notwendigen materialtechnischen Untersuchungen eingeschaltet.

Mit Hilfe der in der DIN EN 1996-1-1/NA [1] tabellierten Werte für die charakteristische Druckfestigkeit von Natursteinmauerwerk war der Standsicherheitsnachweis für den Turm nicht möglich.

Da diese tabellierten Werte in der Regel sehr konservativ sind, wurde beschlossen, einen für dieses Gebäude spezifischen Wert für die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit zu ermitteln, der auch die vorhandene Schädigung des Mauerwerks berücksichtigt.

## 2 Voruntersuchungen

Zunächst wurde der Zustand des Mauerwerks der Außenschale visuell von außen begutachtet. Dabei wurde eine große Anzahl an Rissen mit zum Teil sehr großen Rissbreiten festgestellt (siehe Bild 2). Anhand der vorhandenen Risskartierung wurde deutlich, dass die Rissbildung weiter deutlich zugenommen hat

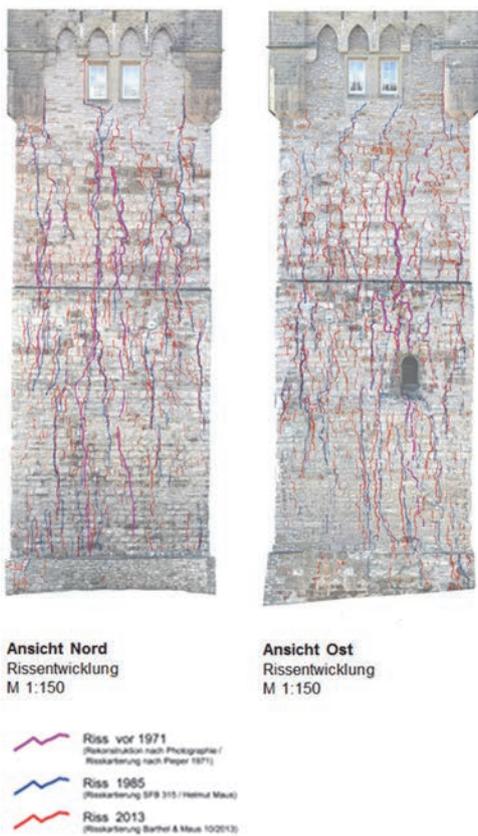


Bild 1 Rissentwicklung am Blauen Turm bis 2013 (Quelle: Barthel & Maus Beratende Ingenieure GmbH)

Außenschale ausgewählt und dann versucht, diesen Stein durch trockenes Ausräumen der Stoß- und Lagerfugen aus dem Verband herauszulösen (siehe Bild 3).



Bild 2 vorhandene Risse am Blauen Turm

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit des Mauerwerks der Außen- und Innenschale des Turmes ist die Kenntnis der Druckfestigkeit des Natursteins sowie des Mauermörtels notwendig. Zur Gewinnung von Probenmaterial für diese Untersuchungen wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von rd. 100 mm bis zu einer Tiefe von rd. 150 cm (Mitte des Kernmauerwerks) an der Außen- und Innenschale des Turmes entnommen.

Bei diesen Bohrungen konnten keine zusammenhängenden Bohrkern entnommen werden. Der vorhandene historische Mauermörtel wurde durch das Nassbohren herausgespült und die in den Jahren 1970/1971 durchgeführten Injektionsmaßnahmen haben zu keiner nennenswerten Verfestigung des Verfüllmauerwerks zwischen der Außen- und Innenschale geführt.

Eine abschließende Beurteilung der Qualität und des Zustandes des Mauerwerks war auf Grundlage der Bohrkern sowie einer endoskopischen Befahrung der Bohrlöcher nicht zufriedenstellend möglich.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, an insgesamt 4 Stellen (je 2 an der Ostseite und Westseite) das Mauerwerk zu öffnen. An jeder geplanten Öffnungsstelle wurde ein großformatiger Stein der



Bild 3 Öffnungsstelle Westseite #1

Die Öffnungsstellen waren dann entsprechend so tief, wie der äußere Stein in das Hinterfüllmauerwerk eingebunden hat.

An zwei der bestehenden Öffnungsstellen (Westseite) wurde dann die Öffnung noch bis zu einer Tiefe von rd. 100 cm erweitert, um zu prüfen, ob sich die Mauerwerksqualität über die Tiefe des Mauerwerks verändert.

Anhand der Öffnungsstellen war nun die Beurteilung der Qualität des Mauerwerks der Außenschale

als auch des Verfüllmauerwerks möglich und es konnte auf diese Weise auch ausreichend Probenmaterial des historischen Mauermörtels für weitere Prüfungen gewonnen werden.

Das Mauerwerk der Außenschale ist grundsätzlich in einer guten handwerklichen Qualität ausgeführt worden. Eine Einstufung des ungeschädigten ursprünglichen Mauerwerks der Außenschale in die Güteklasse N2 bis N3 (DIN EN 1996-1-1/NA [1]) ist möglich. Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass auch die Innenschale des Turmes in dieser Qualität gemauert wurde.

Auffallend war jedoch, dass in den Öffnungsstellen eine Vielzahl an Steinen der Außenschale oberflächenparallele Risse aufwies. Diese oberflächenparallelen Risse stellten eine weitere Schwierigkeit bei der Beurteilung der Tragfähigkeit des Mauerwerks dar.

### 3 Materialprüfungen

Zur Festlegung des Bemessungswertes der Druckfestigkeit nach DIN EN 1996-1-1/NA [1] ist die Kenntnis der Druckfestigkeit des Natursteins und des Mauermörtels sowie die Qualität des Mauerwerks (Verbandsart, Steinform, Steinbearbeitung und Fugenverlauf) notwendig.

#### 3.1 Druckfestigkeit und Rohdichte des Natursteins

Aus den größeren Natursteinstücken der Bohrkern wurden rechtwinklig zur Bohrkernachse (Belastungsrichtung im Turm) Zylinder mit einem Durchmesser von rd. 50 mm bzw. 35 mm zur Ermittlung der Druckfestigkeit in Anlehnung an die DIN EN 1926 [2] nass herausgebohrt. Die Zylinder wurden anschließend auf eine Höhe von rd. 50 mm bzw. 35 mm gesägt und die Lasteinleitungsflächen der Zylinder geschliffen. Die Lasteinleitungsflächen erfüllten die Anforderungen der DIN EN 1926 [2].

Bei den Natursteinen handelt es sich in der Mehrzahl um Muschelkalk sowie um Dolomitkalk (dolomitische Varietät von Muschelkalkstein).

Im Mittel wurde eine Druckfestigkeit von 179 MPa ermittelt (Werte von 57 – 258 MPa). Die mittlere Rohdichte betrug  $2633 \text{ kg/m}^3$  (Werte von  $2366 - 2720 \text{ kg/m}^3$ ).

Die geringeren Druckfestigkeiten weisen die Dolomitkalkproben auf (57 MPa – 154 MPa). Der Muschelkalk liegt in der Druckfestigkeit deutlich höher (159 MPa – 258 MPa). Bei diesen ist in der Regel auch die Rohdichte höher als bei den Dolomitkalkproben.

Die vorgefundenen Natursteine weisen augenscheinlich sehr viele Risse und Lager auf. Die Prüfungen zur Druckfestigkeit erfolgten an weitgehend ungestörten Proben und stellen somit die Obergrenze der zu erwartenden Druckfestigkeit für diese Gesteine dar.

Insgesamt ist die Streuung der Einzelwerte bei den Natursteinprüfungen hoch. Die statistische Auswertung der Daten ergab eine 5%-Quantile (bei einem Vertrauensniveau von 95%) für die Druckfestigkeit von 58 MPa.

Die statistische Auswertung erfolgte gemäß DIN EN 1926 unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung und eines k-Faktors von 2,453 zur Quantilenberechnung für eine Stichprobe von 18 Proben (Vertrauensniveau 95 %) gemäß DIN EN ISO 16269-6 [3].

#### 3.2 Druckfestigkeit des Mauermörtels

Aus den Bestandteilen der Bohrkern wurden Stücke des historischen Verfüll- bzw. Lagerfugenmörtels herausgesucht, an denen noch eine Ermittlung der Druckfestigkeit möglich war. Die Mörtelstücke wurden mit Gips abgeglichen und die Fugendruckfestigkeit in Anlehnung an DIN 18555-9, Verfahren III [4], ermittelt.

Bei einem Bohrkern (Bohrkern West Nr. 7) war ein großes zusammenhängendes Stück Mörtel mit einem mittleren Durchmesser von rd. 80 mm und einer Länge von rd. 88 mm vorhanden, das ebenfalls mit Gips abgeglichen und an dem direkt die Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [5] ermittelt wurde.

Im Mittel wurde eine Druckfestigkeit des historischen Mörtels von  $5,5 \text{ N/mm}^2$  ermittelt (Werte von  $2,3 - 14,1 \text{ N/mm}^2$ ). Die Streuungen der Ergebnisse waren sehr hoch.

Die Auswertung der Daten ergab eine 5%-Quantile (bei einem Vertrauensniveau von 95%) für die Mörteldruckfestigkeit von  $1,5 \text{ N/mm}^2$ .

Analog zu den Proben des historischen Mauermörtels aus den Bohrkernen, wurde auch an den prüffähigen Mörtelproben der Öffnungsstellen die Fugendruckfestigkeit in Anlehnung an DIN 18555-9, Verfahren III [4], ermittelt. Die Mörtelstücke wurden dazu ebenfalls vor der Prüfung mit Gips abgeglichen.

Die mittlere Druckfestigkeit des historischen Mauermörtels aus den Öffnungsstellen betrug  $2,6 \text{ N/mm}^2$  (Werte von  $0,9 - 9,0 \text{ N/mm}^2$ ), wobei auch hier die Streuungen sehr hoch waren.

Die Auswertung der Daten ergab eine 5%-Quantile (bei einem Vertrauensniveau von 95%) für die Mörteldruckfestigkeit von  $0,46 \text{ N/mm}^2$ .

Da einige Einzelwerte der Druckfestigkeit für einen historischen Kalkmörtel aus den Öffnungsstellen ungewöhnlich hoch liegen und hier vermutlich die hohen Werte auf das Prüfverfahren zurückzuführen sind (große Gesteinskörnungen in der Probe), wurden die Ergebnisse hinsichtlich der Plausibilität überprüft und beschlossen, für eine erneute statistische Auswertung alle Ergebnisse mit einer Druckfestigkeit über  $4 \text{ N/mm}^2$  zu verwerfen.

Dadurch sinkt der Mittelwert der Mörteldruckfestigkeit für die verbleibenden Proben auf  $1,6 \text{ N/mm}^2$ , allerdings steigt die 5%-Quantile (bei einem Vertrauensniveau von 95%) für die Mörteldruckfestigkeit auf  $0,75 \text{ N/mm}^2$  infolge der deutlich geringeren Streuung der Ergebnisse.

### 3.3 Festlegung des Bemessungswertes der Druckfestigkeit auf Grundlage der Ergebnisse der Materialprüfungen

Die Ergebnisse der Ermittlung der Druckfestigkeit am Naturstein erlaubt die Einstufung der am Turm verwendeten Steine in die Steinfestigkeitsklasse  $f_{bk} \geq 50$  nach DIN EN 1996-1-1/NA [1]. Der historische Mauermörtel kann gemäß DIN V 18580 [6] in die Mörtelgruppe NM I bis NM II eingestuft werden.

Für die Außen- bzw. Innenschale des Turms (Güteklasse N2, Steinfestigkeit  $f_{bk} \geq 50$ ) kann bei Annahme einer Mörtelfestigkeitsklasse NM I von einer charakteristischen Druckfestigkeit des Mauerwerks  $f_k$  von  $1,7 \text{ N/mm}^2$  und bei Annahme einer Mörtelfestigkeitsklasse NM II von einer charakteristischen Druckfestigkeit des Mauerwerks  $f_k = 3,0 \text{ N/mm}^2$  nach [1] ausgegangen werden:

Diese Werte für die charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerks berücksichtigen nicht, dass ein hoher Anteil der Natursteine der Außenschale (und vermutlich auch der Innenschale) sowohl senkrecht als auch parallel zur Oberfläche der Schale gerissen sind. Diese Risse wirken sich sicherlich tragfähigkeitsmindernd auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks aus. Aus diesem Grund wurde auf Grundlage dieser Versuche empfohlen, lediglich von einer Güteklasse des Mauerwerks N1 auszugehen. Unter Berücksichtigung einer Mörtelfestigkeitsklasse NM II ergibt sich dadurch eine anzunehmende charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerks  $f_k$  von  $1,5 \text{ N/mm}^2$ .

Auf Grundlage des Tabellenwertes nach DIN EN 1996-1-1/NA [1] und unter Berücksichtigung eines Sicherheitsabschlages auf Grundlage der Risse (Einstufung in Güteklasse N1) für den  $f_k$ -Wert konnte

der Standsicherheitsnachweis für den Turm nicht erbracht werden.

Aus diesem Grund wurde beschlossen, einen für den Turm spezifisch gültigen Bemessungswert der Mauerwerksdruckfestigkeit unter Berücksichtigung der vorhandenen Risse experimentell zu ermitteln.

## 4 Versuche zur Ermittlung des gebäudespezifischen Bemessungswertes

### 4.1 Prüfkörpergeometrie und Probenmaterial

Mit den Versuchen sollte realistisch die Tragfähigkeit des Mauerwerks unter Berücksichtigung der Risse ermittelt werden. Dazu sollten das Überbindemaß der Steine, die Fugendicken am Turm und die Steingrößen weitgehend genau den Gegebenheiten am Turm entsprechen. Da Prüfungen an geschosshohen Wänden aus praktischen Gründen an diesem Mauerwerk nicht möglich waren, wurde beschlossen, die Versuche an kleinformatischen Prüfkörpern im Maßstab 1:2 durchzuführen.

Die Fugendicke in den hergestellten Prüfwänden weist herstellungsbedingt (Maßhaltigkeit der Steine) eine mittlere Dicke von 30 mm bei einer Streuung im Bereich von 10 - 50 mm auf und entspricht weitgehend den tatsächlichen Verhältnissen im Blauen Turm, wie sie in den Öffnungsstellen vorgefunden wurden.

In Bild 4 ist ein kleinformatischer Prüfkörper zur Ermittlung der Druckfestigkeit des Mauerwerks abgebildet. Die Maße der Prüfkörper betragen rd.  $65 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 130 \text{ cm}$  (L x B x H).

Die verwendeten Steine haben eine Dicke von rd. 20 cm und eine Höhe von rd. 20 cm bzw. 10 cm. Die Steinlängen betragen rd. 10 cm, 20 cm, 30 cm und 40 cm.

Für die Mauersteine wurde ein württembergischer Muschelkalk aus dem Strohgäu (Felswerke Zimmermann in Vaihingen/Enz) verwendet. Dieser Muschelkalk ist dem im Blauen Turm verwendeten Muschelkalkstein in seiner Struktur und den mechanischen Eigenschaften sehr ähnlich bzw. vergleichbar.

Als Mauermörtel wurde Trass-Werksteinmörtel des Herstellers tubag verwendet. Der Mauermörtel hat ein Größtkorn von 4 mm und wird als ein Mörtel der Mörtelgruppe M5 mit moderater Festigkeitsentwicklung angeboten.



Bild 4 Kleinformatiger Mauerwerksprüfkörper im Maßstab 1:2 zur Ermittlung der Druckfestigkeit der Außen- bzw. Innenschale des Turmes

## 4.2 Versuchsreihen

Mit den Untersuchungen sollte ein gebäudespezifischer Bemessungswert für die Mauerwerksdruckfestigkeit und der Einfluss der vorhandenen Risse auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks ermittelt werden. Dazu wurden insgesamt 5 Prüfserien mit je 3 Prüfkörpern durchgeführt. Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen.

Mit Hilfe der Prüfserien 1 und 2 sollte die theoretisch mögliche Druckfestigkeit des intakten Mauerwerks sowie der Einfluss der Mörtelfestigkeit auf die Mauerwerksdruckfestigkeit ermittelt werden. Zusätzlich sollte der Vergleich der beiden Prüfserien die Möglichkeit schaffen, Über- bzw. Unterfestigkeiten des Mauermörtels bei den übrigen Prüfserien hinsichtlich des Einflusses auf das Prüfergebnis zu quantifizieren.

Bei Prüfserie 3 wurde der Einfluss der oberflächenparallelen Risse auf die Tragfähigkeit des Mauerwerks untersucht werden. Dazu wurden 80 % der Steine in den Pfeilern mit vorhandenen oberflächenparallelen Rissen verbaut. Die Risse sollten ursprünglich durch Spalten der Steine angelegt werden. Dabei sind jedoch viele Steine anders als gewünscht gebrochen, so dass die Risse letztlich

durch Sägen der Steine hergestellt wurden (ungünstigerer Fall für das Tragverhalten). Die Risse wurden in einer Tiefe von rd. 5 cm bzw. 8 cm angelegt, dies entspricht rd. 10 cm bzw. 16 cm in der Realität. Die gerissenen Steine wurden bei allen Prüfkörpern der Prüfserie an der gleichen Stelle eingebaut. Die Anzahl von 80 % gerissener Steine im Mauerwerksprüfkörper wurde auf Grundlage der Ergebnisse des ersten Untersuchungsabschnittes (Befunde der Öffnungsstellen und der Kernbohrungen) als ungünstigster Fall ausgewählt.

Tabelle 1 Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen

Prüfserie Nr.	Steine	Mörtel
1	ungerissene Steine	hohe Mörtelfestigkeit
2	ungerissene Steine	niedrige Mörtelfestigkeit
3	oberflächenparallele Risse (80% der Steine gerissen)	niedrige Mörtelfestigkeit
4	Risse senkrecht zur Oberfläche (Aufhebung des Überbindemaßes)	niedrige Mörtelfestigkeit
5	Rissarten aus 3 + 4 kombiniert	niedrige Mörtelfestigkeit

Die Prüfserie 4 sollte den Einfluss der Risse senkrecht zur Oberfläche quantifizieren. Dazu wurden die Risse in den Steinen ebenfalls durch Sägen angelegt. Das Ziel war, den Verband des ursprünglichen Mauerwerks so aufzuheben, dass in der Probe drei kleine Pfeiler nebeneinander vorhanden sind.

In der Prüfserie 5 wurden als worst-case-Szenario die beiden Rissarten aus Prüfserie 3 und 4 kombiniert, so dass bei dieser Prüfserie sowohl oberflächenparallele, als auch die Risse senkrecht zur Oberfläche vorhanden waren. Ein Prüfkörper dieser Serie ist in Bild 5 abgebildet.

## 4.3 Versuchsdurchführung

Die Mauerwände wurden an den Auflagerflächen mit einer Ausgleichsschicht aus hochfestem Mörtel (Druckfestigkeit rd. 45 N/mm<sup>2</sup>) versehen, um ein vollständiges bzw. vollflächiges Aufliegen der

Druckplatten in der Prüfmaschine zu gewährleisten. Die Druckprüfung erfolgte in einer Druckprüfmaschine mit max. Drucklast von 10 MN.

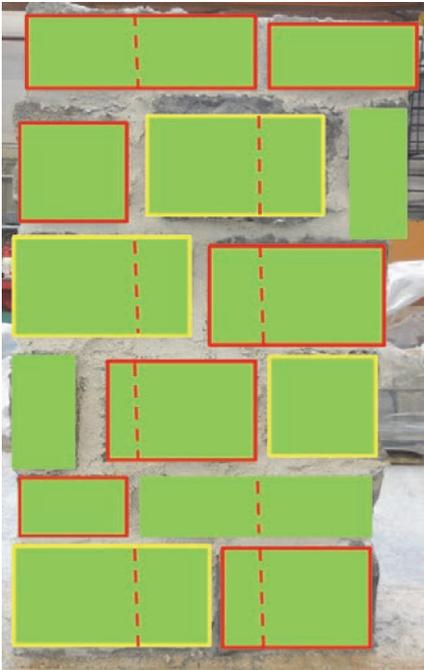


Bild 5 Kleinformatiger Mauerwerksprüfkörper im Maßstab 1:2 der Prüfserie 5 mit Lage der oberflächenparallel gerissenen Steine (grün = ungerissene Steine, rot = Riss in 5 cm Tiefe, gelb = Riss in 8 cm Tiefe) und der Risse senkrecht zur Oberfläche (gestrichelte Linien)

Vor der Prüfung wurden Wegaufnehmer zu Erfassung der Verformungen an den Prüfwänden angebracht. Die vertikalen Verformungen wurden mit insgesamt vier Seilzugaufnehmern gemessen (jeweils zwei Aufnehmer pro Wandseite). Die Messlänge betrug rd. 900 mm.

Die horizontalen Verformungen wurden mittels zwei Seilzugaufnehmern über eine Messlänge von rd. 600 mm erfasst. Die Seilzugaufnehmer wurden mittels Betonschrauben über Stahlplatten an den Steinen befestigt.

Die Verformungen in den vertikalen und horizontalen Fugen, bzw. die Rissöffnungen bei den Prüfserien mit gerissenen Steinen wurden mit kleinen induktiven Wegaufnehmern ermittelt. Die Messlänge betrug zwischen 30 und 70 mm. Die induktiven Wegaufnehmer wurden über Aluplatten mittels Heißkleber am Mauerwerk befestigt.

Die Anordnung der Wegaufnehmer ist in Bild 6 exemplarisch dargestellt.



Bild 6 Anordnung der Wegaufnehmer auf den Prüfwänden

Die Druckprüfungen erfolgten weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,3 - 0,4 mm/min.

Unmittelbar nach dem Erreichen der Höchstlast wurden die Wegaufnehmer entfernt, um deren Schädigung durch die abfallenden Mörtel- und Steinstücke zu vermeiden. Während dem Entfernen der Wegaufnehmer wurde die Last bzw. die Verformung konstant gehalten. Anschließend wurde die Belastung weiter weggesteuert erhöht. Der Versuch wurde spätestens bei einer maximalen vertikalen Verformung (Kolbenweg der Prüfmaschine) von rd. 15 mm abgebrochen.

Während der Prüfung wurden Maschinenweg (Kolbenweg), Kraft und die Verformungen aller Wegaufnehmer kontinuierlich mit einer Messfrequenz von 5 Hz erfasst. Des Weiteren wurde die Rissbildung kontinuierlich beobachtet und das Auftreten der Risse (bezogen auf das Lastniveau) dokumentiert.

## 4.4 Versuchsergebnisse

In der folgenden Tabelle 2 sind die Druckfestigkeit und Erstrissspannung sowie die bei der Prüfung vorhandene Mörteldruckfestigkeit zusammengestellt.

Tabelle 2 Übersicht über die Ergebnisse der Untersuchungen an Mauerwerkswänden

		Prüfserie				
		1	2	3	4	5
Mörtel-druckfestig-keit	N/mm <sup>2</sup>	3,7	1,6	1,9	1,5	1,8
Mittlere Erstriss-spannung	N/mm <sup>2</sup>	5,7	7,9	4,7	7,3	6,8
Mittlere Druckfestig-keit	N/mm <sup>2</sup>	13,3	11,3	8,9	9,9	8,3
Standard-abweichung	N/mm <sup>2</sup>	0,84	0,26	0,62	0,40	1,45

Mit den Prüfserien 1 und 2 sollte der Einfluss der Mörtelfestigkeit auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks untersucht werden. Die Prüfserie 1 weist mit einer Mörteldruckfestigkeit von 3,7 N/mm<sup>2</sup> zum Zeitpunkt der Prüfung eine um den Faktor 2,3 höhere Druckfestigkeit auf als Prüfserie 2 mit einer Mörteldruckfestigkeit von 1,6 N/mm<sup>2</sup>.

Der Unterschied in der Druckfestigkeit des Mauerwerks fällt erwartungsgemäß nicht so deutlich aus und liegt bei Prüfserie 1 lediglich rd. 18 % höher als bei Prüfserie 2.

Der Einfluss der Mörteldruckfestigkeit auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks ist somit gering. Dennoch wurden die ermittelten Druckfestigkeiten der Prüfserien 3-5 mit Hilfe der Gleichung (3.1) aus der DIN EN 1996-1-1 [8] in Verbindung mit Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7] (siehe Abschnitt 5) auf die Druckfestigkeit des Mörtels der Prüfserie 2 (1,6 N/mm<sup>2</sup>) umgerechnet (siehe Tabelle 3).

Den größten Einfluss auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks ergab sich erwartungsgemäß bei der Prüfserie 5, bei der beide Rissarten (senkrecht zur Oberfläche und oberflächenparallel) angelegt waren. Hier war eine Minderung der Druckfestigkeit von 26% vorhanden.

Tabelle 3 Übersicht über die Ergebnisse der Untersuchungen an Mauerwerkswänden der Prüfserie 2-5 nach Berücksichtigung der unterschiedlichen Mörtelfestigkeiten

		Prüfserie			
		2	3	4	5
Mörteldruckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	1,6			
Mittlere bereinigte Druckfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	11,3	8,4	9,9	8,3

Eine vergleichbar hohe Reduktion von 25% war bei der Prüfserie 3 mit nur oberflächenparallelen Rissen festgestellt worden.

Bei der Prüfserie 4 mit den Rissen senkrecht zur Oberfläche war die ermittelte Festigkeitsminderung um 12% nur rd. halb so groß wie bei den beiden übrigen Prüfserien mit Rissen. Die Risse im Mauerwerk führen zu einem teilweise veränderten Verformungsverhalten unter Belastung.

Im folgenden Bild 7 sind exemplarisch die mittleren Spannungs-Dehnungslinien der Versuchsreihen 2 (ohne Risse) und 5 (beide Rissarten kombiniert) abgebildet.

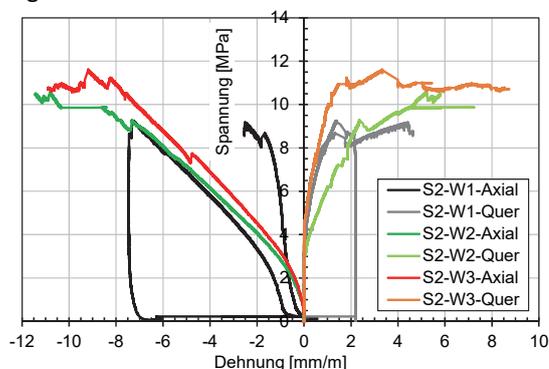


Bild 7 mittlere Spannungs-Dehnungslinien der Versuchsreihe 2

Bei den vertikalen Verformungen sind nur geringe Unterschiede zwischen dem gerissenen und dem ungerissenen Mauerwerk vorhanden.

Die Querdehnungen des Mauerwerks werden jedoch durch die vorhandenen Risse senkrecht zur Oberfläche größer als bei der Serie mit ungerissenen Steinen (Prüfserie 2) bzw. der Prüfserie 3 mit nur oberflächenparallelen Rissen.

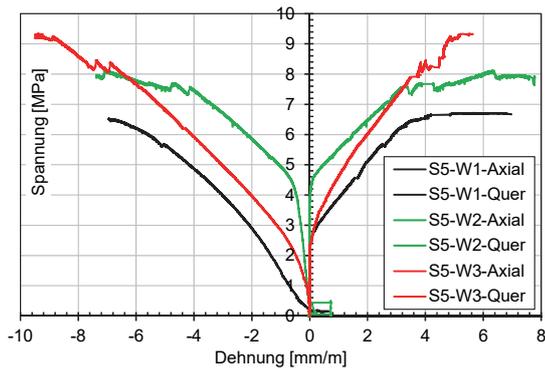


Bild 8 mittlere Spannungs-Dehnungslinien der Versuchsreihe 5

Die ermittelten Verformungen und die daraus abgeleiteten Verformungskennwerte des Mauerwerks wurden für die Kalibrierung eines Finite-Elemente-Modells des Mauerwerks für weitere Parameterstudien herangezogen.

## 5 Ableitung des Bemessungswertes aus den Versuchen

Für die Bewertung des vorhandenen Mauerwerks sowie der Herleitung eines für den Blauen Turm spezifischen Bemessungswertes für das Mauerwerk wurden die Prüfserien 2-5 herangezogen.

Aus den Ergebnissen der Prüfserie 1 im Vergleich zur Prüfserie 2 sollte lediglich der Einfluss der Mörteldruckfestigkeit auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks abgeschätzt werden.

Es zeigte sich aus den Prüfserien 1 und 2, dass die Druckfestigkeit des ungerissenen Mauerwerks gut über die Gleichung (3.1) aus der DIN EN 1996-1-1 [8] in Verbindung mit Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7] abgebildet werden kann (siehe Gl. 1).

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

- $f_k$  charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in  $\text{N/mm}^2$ ;
- $K$  0,95 nach Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7],
- $\alpha$  0,585 nach Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7],
- $\beta$  0,162 nach Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7];
- $f_b$  normierte Mauersteindruckfestigkeit in Lastrichtung in  $\text{N/mm}^2$ ;
- $f_m$  Druckfestigkeit des Mauermörtels in  $\text{N/mm}^2$

Mit dieser Gleichung (siehe Gl. 1) wurden auch die Mörtelüber- bzw. -unterfestigkeiten der einzelnen Prüfserien im Vergleich zur Mörteldruckfestigkeit der Prüfserie 2 (Mörteldruckfestigkeit  $1,6 \text{ N/mm}^2$ ) berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Bemessungswertes aus den Messergebnissen wurde wie folgt vorgegangen:

Grundlage für die Auswertung sind die kleinsten Einzelmessergebnisse der Prüfserien 2 - 5, wobei die Ergebnisse mit Hilfe der Gleichung (3.1) aus der DIN EN 1996-1-1 [8] in Verbindung mit Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7] (siehe Gl. 1) auf eine einheitliche Mörtelfestigkeit von  $1,6 \text{ N/mm}^2$  korrigiert wurden.

Die so ermittelten Werte wurden ebenfalls mit Gleichung (3.1) aus der DIN EN 1996-1-1 [8] in Verbindung mit Tabelle NA.6 aus der DIN EN 1996-1-1/NA/A1 [7] (siehe Gl. 1) auf eine angenommene Mörteldruckfestigkeit im Turm von  $0,5 \text{ N/mm}^2$  umgerechnet.

Aus diesen Werten wurde durch Division mit 3 (globaler Sicherheitsbeiwert) eine zulässige Mauerwerksdruckspannung im Sinne der DIN 1053-1 [9] berechnet. Diese zulässige Mauerwerksdruckspannung wurde durch Multiplikation mit dem Faktor 2,77 (üblicher Umrechnungsfaktor in Zulassungen des DIBt von zulässigen Mauerwerksdruckspannungen nach DIN 1053-1 [9] in charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeiten gemäß DIN EN 1996-1-1 [8]) in den Wert der charakteristischen Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_k$  nach DIN EN 1996-1-1 [8] umgerechnet.

Zusätzlich wurden die so ermittelten  $f_k$ -Werte mit einem Dauerstandsfaktor 0,8 zur Berücksichtigung von Langzeitbelastungseffekten abgemindert.

Der auf diese Weise aus allen berücksichtigten Prüfserien (kleinster Einzelmesswert jeder Serie, nicht Mittelwerte der Serie) ermittelte kleinste  $f_k$ -Wert kann somit für den statischen Nachweis aller Bereiche der Außen- und Innenschale des Mauerwerks des Blauen Turmes herangezogen werden.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich dieser  $f_k$ -Wert aus der Prüfserie 5 (beide Rissarten kombiniert) auf Bruchlastniveau zu  $4,2 \text{ N/mm}^2$ , der für alle Bereiche der Innen- und Außenschale anwendbar ist.

Dieser gebäudespezifische Bemessungswert von  $4,2 \text{ N/mm}^2$  liegt trotz der konservativen Annahmen bei der Ableitung dieses Wertes aus den Untersuchungen deutlich höher als der Wert von  $1,5 \text{ N/mm}^2$ , der auf Grundlage der Untersuchungen

des Natursteins und des Mauermörtels aus der DIN EN 1996-1-1/NA [1] abgeleitet werden konnte. Mit dieser Vorgehensweise der Ermittlung eines gebäudespezifischen Bemessungswertes konnte auch der Standsicherheitsnachweis erfolgreich erbracht werden.

## 6 Zusammenfassung

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen wies trotz einer umfangreichen Sanierung in den Jahren 1970/1971 eine weiter zunehmende Rissbildung in der Außenschale des Mauerwerks, Mörtelschäden sowie Salzausblühungen auf.

Im Rahmen der Erstellung eines Sanierungskonzeptes musste auch der Nachweis der Standsicherheit des Turmes erbracht werden. Der auf Grundlage von Untersuchungen am Naturstein sowie am Mauermörtel aus der DIN EN 1996-1-1/NA [1] abgeleitete Wert für die charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerks der Außen- und Innenschale führte zu keinem positiven Standsicherheitsnachweis.

Aus diesem Grund wurde ein experimentelles Untersuchungsprogramm unter Berücksichtigung der vorhandenen Schäden zur Ermittlung eines gebäudespezifischen Bemessungswertes für die Druckfestigkeit des Mauerwerks der Außen- und Innenschale des Turmes erarbeitet.

Der auf Grundlage dieser Versuche ermittelte Wert für die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit ist trotz der vorhandenen Risse im Mauerwerk um den Faktor 2,8 höher als der Wert, der sich aus der DIN EN 1996-1-1/NA [1] auf Grundlage von Materialuntersuchungen am Naturstein und Mauermörtel ableiten lässt.

Der Standsicherheitsnachweis konnte somit erbracht werden. Zusätzlich konnte auf Grundlage dieses experimentellen Versuchsprogrammes ein numerisches Modell entwickelt werden, mit dem weitere Parameterstudien zur Tragfähigkeit des Mauerwerks durchgeführt werden konnten.

## 7 Literatur

- [1] DIN EN 1996-1-1/NA – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Euro-code 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Ausgabe 2012-01
- [2] DIN EN 1926 - Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit, Ausgabe 2007-03
- [3] DIN ISO 16269-6 - Statistische Auswertung von Daten - Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen, Ausgabe 2009-10
- [4] DIN 18555-9 - Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Festmörtel; Bestimmung der Fugendruckfestigkeit, Ausgabe 1999-09
- [5] DIN EN 12390- 3 - Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Ausgabe 2009-07
- [6] DIN V 18580 - Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften, Ausgabe 2007-03
- [7] DIN EN 1996-1-1/NA/A1 – Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Änderung A1 Ausgabe 2014-03
- [8] DIN EN 1996-1-1 – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Ausgabe 2013-02
- [9] DIN 1053-1 – Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung, Ausgabe 1996-11

## Autor

Dr. Michael Stegmaier  
 Materialprüfungsanstalt  
 Universität Stuttgart  
 Pfaffenwaldring 32  
 70569 Stuttgart  
 Tel.: +49 711 685-62256  
 E-Mail: Michael.Stegmaier@mpa.uni-stuttgart.de



# Numerische Modellierung des Mauerwerks im Blauen Turm auf Grundlage von kleinformatischen Mauerwerksprüfkörpern

Josipa Bošnjak

## Abstract:

Für die Erarbeitung eines Sanierungskonzeptes für den Blauen Turm in Bad Wimpfen wurden zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen vorgenommen. Um die Bandbreite der untersuchten Parameter zu erweitern und weitere Einflussparameter zu berücksichtigen, wurde anschließend eine numerische Parameterstudie vorgenommen. Die Finite-Elemente-Simulationen wurden mit der institutseigenen 3D FE Software MASA durchgeführt. Das Programm basiert auf der verschmierten Rissmodellierung, wobei als konstitutives Gesetz für die quasi-spröden Materialien das Microplane-Modell mit »relaxed kinematic constraint« angewendet wird. Der numerische Ansatz wurde zunächst anhand der experimentellen Ergebnisse validiert, um dessen Eignung für die Simulation des historischen Mauerwerks nachzuweisen. Nach der erfolgreichen Validierung wurden die Einflussparameter untersucht, die aus versuchstechnischen Gründen experimentell nicht variiert werden konnten. Anhand der numerischen Ergebnisse wurde ein Modell zur Berücksichtigung der Fugendicke vorgeschlagen.

**Keywords:** Historisches Mauerwerk, numerische Simulation, Microplane-Modell

## 1 Einführung

Die fortschreitende Schädigung des Mauerwerks im Blauen Turm in Bad Wimpfen erforderte eine umfangreiche Sanierung. Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Entwicklung des Sanierungskonzeptes war die Bestimmung der Wandtragfähigkeit unter Berücksichtigung der bestehenden Schädigung. Da die bestehenden Regelwerke relativ konservative Ansätze vorschlagen, konnte ein rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit nicht erbracht werden. Um einen realitätsnahen Bemessungswert zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen an kleinformatischen Mauerwerkskörpern vorgenommen. Die gewonnenen Ergebnisse bilden die Basis für die Bestimmung des Bemessungswertes der Wandtragfähigkeit im Blauen Turm. Aus versuchstechnischen Gründen konnten allerdings nicht alle wesentlichen Einflussparameter berücksichtigt werden. Um diese Parameter zu erfassen, wurden mehrere numerische Untersuchungen vorgenommen.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst die numerischen Simulationen zur Nachrechnung der

durchgeführten Versuche dargestellt und diskutiert. Es wurden insgesamt sechs Berechnungsfälle durchgeführt, die den sechs experimentell untersuchten Prüferien entsprechen.

Des Weiteren werden die numerischen Ergebnisse zum Einfluss der Fugendicke auf die Wandtragfähigkeit vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse zum Einfluss der oberflächenparallelen Risse auf die Wandtragfähigkeit dargestellt und diskutiert.

### 1.1 Microplane-Modell

Die numerischen Untersuchungen wurden mit Hilfe der institutseigenen 3D FE Software MASA [1] durchgeführt. Das Programm basiert auf der verschmierten Rissmodellierung, wobei als konstitutives Gesetz für die quasi-spröden Materialien das Microplane-Modell mit »relaxed kinematic constraint« angewendet wird. Das Modell wurde von Ožbolt et al. [1] vorgeschlagen. Im Microplane-Modell wird das Material durch die Beziehung zwischen den Spannungs- und Dehnungskomponenten auf Ebenen unterschiedlicher Ausrichtung beschrieben. Diese Ebenen können als Mikrorissebenen interpretiert werden. Die Einfachheit des Modells

liegt darin, dass für jede Komponente auf der Mikroebene nur einachsige Spannungs-Dehnungs-Beziehungen erforderlich sind, um eine realistische Antwort auf der Makroebene zu erhalten. Das verwendete Modell wurde bereits mehrmals für diverse quasi-spröde Materialien verifiziert [2,3]. Eine ausführliche Beschreibung des verwendeten Modells kann [1] entnommen werden.

## 1.2 Finite-Elemente-Modell

Um die Eignung des numerischen Ansatzes für die Simulation von Mauerwerk zu überprüfen, wurden die durchgeführten Versuche an Mauerwerkswänden nachgerechnet. Dabei wurden die Steine und Mörtelfugen diskret modelliert. Alle Materialien wurden mit Hexaeder-Elementen (8-Knoten-Elemente) modelliert. Das Finite-Elemente-Netz für die fünf untersuchten Geometrien ist in Bild 1 dargestellt. Die Wandbreite betrug 620 mm, die Dicke 200 mm und die Höhe 1150 mm.

In den ersten zwei Berechnungsvarianten ist die Geometrie der Wände gleich gehalten, da lediglich die Mörtelfestigkeit verändert wurde. In der dritten Berechnungsvariante wurden die oberflächenparallelen Risse mit Hilfe einer dünnen Spaltfuge in der Stirnseite der einzelnen Steine simuliert, wobei die Festigkeit des Materials in dieser Spaltfuge nahezu Null betrug. In der vierten Berechnungsvariante wurde der Einfluss der Risse senkrecht zur Oberfläche untersucht, dies wurde im Modell ebenfalls mit Hilfe einer dünnen Spaltfuge erreicht. In der fünften Berechnungsvariante wurde die Kombination der beiden Rissarten simuliert. In der sechsten Berechnungsvariante wurde ein Teilbereich der Lagerfugen aus historischem Mauermörtel (ca. 6 – 7 cm) durch hochfesten Torkret-Mörtel ersetzt. Bei allen Berechnungen wurden die Abmessungen der Steine, Mörtelfugen und Risse als Mittelwerte aus den Versuchen übernommen. Bei den experimentell untersuchten Wänden variierte die Fugendicke zwischen 20 mm und 40 mm, da aufgrund der geometrischen Ausbildung der Steine keine konstante Fugendicke zu realisieren war. Um den Zeitaufwand zu reduzieren, wurden die numerischen Untersuchungen für eine Fugendicke von 30 mm durchgeführt.

## 1.3 Randbedingungen und Materialeigenschaften

Die untere Wandfläche wurde für die numerischen Berechnungen in allen drei Richtungen fixiert. Die Belastung wurde verschiebungsgesteuert auf der oberen Belastungsplatte aufgebracht, wobei die

Platte in zwei horizontalen Richtungen fixiert war. Eine Ausnahme hierzu ist die sechste Berechnungsvariante mit dem Torkret-Mörtel. Hier wurde die Belastung lastgesteuert aufgetragen, um die Versuchsbedingungen realistisch zu simulieren.

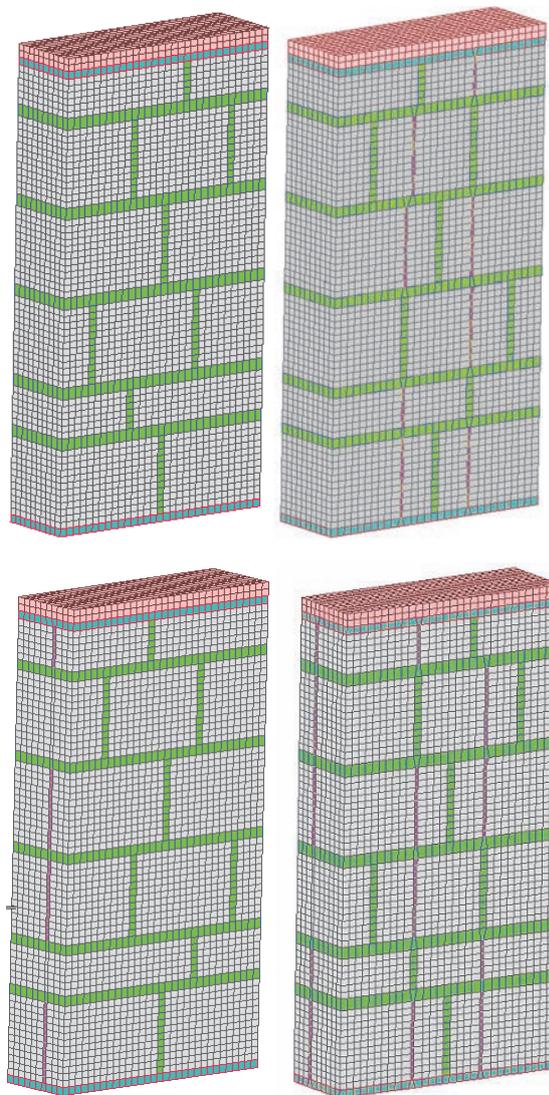


Bild 1 Finite-Elemente Modelle: Referenzmodell ohne Schädigung (oben links), Risse senkrecht zur Oberfläche (oben rechts), oberflächenparallele Risse (unten links) und beide Rissarten (unten rechts)

In den Versuchen wurde die Belastung weggesteuert über eine gelenkig gelagerte Belastungsplatte (mit Kalotte) aufgebracht. Da der historische Mörtel deutlich weicher ist als der Torkret-Mörtel, hat sich die Belastungsplatte dementsprechend verdreht. Die verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Diese entsprachen grundsätzlich den experimentell ermittelten Materialkennwerten. Eine Ausnahme ist der Elastizitätsmodul des Mörtels. Es ist aus der Literatur [4,5]

bekannt, dass Mörtel ein sehr spezifisches Verhalten unter triaxialem Spannungszustand aufweist. Dabei kann, je nach Belastungsgrad, die Steifigkeit im Vergleich zum einachsigen Spannungszustand wesentlich abfallen. Es wurde bereits durch Versuche gezeigt, dass verhältnismäßig dünne Fugenproben im Vergleich zu Standardprüfkörpern (Prismen) deutlich geringere Werte für den E-Modul liefern. Um das Mörtelverhalten realistisch abbilden zu können, wurden im Rahmen dieses Projekts zusätzliche experimentelle Untersuchungen an den Fugen durchgeführt. Diese Prüfungen ergaben einen mittleren E-Modul der Fuge von ca. 500 MPa bei einer Würfeldruckfestigkeit des Mörtels von 1,6 MPa. Die Messungen der Fugenverformungen (Versuchsreihen 2 – 6) bestätigen diese Annahme. Die Fugenverformungen weisen zwar eine sehr hohe Streuung auf, die auf die Prüfkörpergeometrie, Fugenausführung und ungünstige Befestigungsmöglichkeiten für die Wegaufnehmer an den unregelmäßigen Steinoberflächen zurückzuführen ist. Allerdings ist der allgemeine Verlauf der Fugenverformungen bei höheren Laststufen nahezu parallel für alle durchgeführten Versuche innerhalb einer Prüfserie und die ermittelte Steifigkeit der Mörtelfugen deutlich geringer als diejenigen, die an den Mörtelprismen ermittelt wurden.

Für den Torkret-Mörtel wurden keine Messungen des E-Moduls an den Fugen durchgeführt. Hier wurden die Fugenverformungen aus der Versuchsreihe 6 ausgewertet.

Die Zugfestigkeit des Mörtels wurde aus den Biegezugversuchen (Dreipunktbiegung) an Mörtelprismen (40 mm x 40 mm x 160 mm) berechnet ( $f_t = 0,5 \cdot f_{t,fl}$ , wobei  $f_t$  - direkte Zugfestigkeit,  $f_{t,fl}$  - Biegezugfestigkeit).

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Materialeigenschaften für die numerischen Untersuchungen

Material	E-Modul	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit
[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Mörtel Serie 1	600	0,6	3,7
Mörtel Serie 2-6	500	0,4	1,6
Torkret-Mörtel	10500	3,9	40,0

## 2 Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

### 2.1 Nachrechnung der durchgeführten Versuche

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sind jeweils als Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt, wobei die Versuchsergebnisse zum besseren Vergleich mit aufgetragen sind (grau). Die rechte Seite in den Diagrammen bezieht sich auf die axialen Dehnungen und die linke auf die Querdehnungen. Des Weiteren sind die Rissbilder im Sinne der Hauptzugdehnungen für die jeweilige Berechnung dargestellt. Die rot markierten Bereiche in den Abbildungen stellen Risse dar.

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die erste Berechnungsvariante sind in Bild 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die numerischen Ergebnisse relativ gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen. Die Höchstlast weicht nur unwesentlich vom Mittelwert aus den Versuchen (Versuchsreihe 1, Versuche 1 – 3) ab. Es kann weiter festgestellt werden, dass beide axialen Dehnungen als auch die Querdehnungen sehr realistisch abgebildet werden. Somit wird bestätigt, dass das angenommene Mörtelverhalten realistisch ist. Die Versagensart ist in Bild 2 abgebildet. Ähnlich wie im Versuch kommt es zuerst zur Schädigung in den Mörtelfugen. In den Mörtelfugen stellt sich ein triaxialer Spannungszustand ein, der zu einer starken Zunahme der Tragfähigkeit führt. Kurz vor dem Erreichen der Höchstlast treten Spaltrisse in der zweiten Steinreihe auf. Anschließend weiten sich die Stoßfugen verstärkt auf und es kommt zu mehreren Spaltrissen in den einzelnen Steinen über die gesamte Wandhöhe. Teilweise treten auch Risse in der Wandstirnseite auf.

Anhand der Ergebnisse für die zweite Berechnungsvariante kann der Einfluss der Mörtel Eigenschaften abgeschätzt werden. Die reduzierte Mörteldruckfestigkeit verursacht eine Abnahme der maximalen Druckspannung von ca. 20 %. Der Abfall der max. Druckspannung ist somit leicht höher als in den Versuchen ermittelt (17 %). Die Versagensart ist im Wesentlichen vergleichbar mit der aus der ersten Berechnungsvariante, wobei in diesem Fall keine Risse in der Wandstirnseite entstehen.

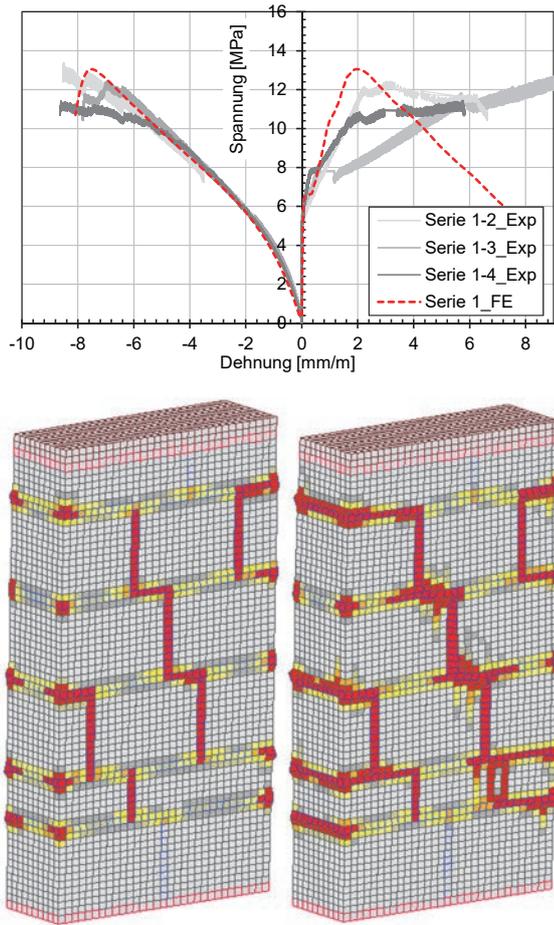


Bild 2 FE-Ergebnisse für den Mauerwerkspfeiler ohne Schädigung: Spannungs-Dehnungskurven (oben), Versagensbilder (unten)

In der dritten Berechnungsvariante wurde der Einfluss der oberflächenparallelen Risse untersucht. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den Versuchen und Simulationen sind in Bild 3 dargestellt. Die Versuchsergebnisse weisen eine beträchtliche Streuung auf. Die numerische Berechnung ergibt eine Reduktion der maximalen Druckspannungen von ca. 20 % im Vergleich zum ungerissenen Zustand aus Berechnungsvariante zwei. In den Versuchen betrug die mittlere Abnahme ca. 26 % für alle sechs Prüfkörper, bzw. 22 % falls der Versuch 3 für die Auswertung nicht herangezogen wird. Diese Ergebnisse bestätigen, dass der dritte Versuch in der dritten Versuchsreihe offenbar ein Ausreißer war. Wie auch in den Versuchen festgestellt, verursacht das Vorhandensein der oberflächenparallelen Risse zwar eine Abnahme der maximalen Druckspannungen, aber das Wandverhalten ändert sich hierdurch nicht wesentlich. Wenn die Steine durch oberflächenparallele Risse »getrennt« werden, reduziert sich der Bereich, in dem festigkeitssteigende triaxiale Spannungszustände herrschen.

Im Bereich der Steinränder kann der Mörtel seitlich ausweichen. Da es bei diesen Wänden »mehr« Steinrandbereiche gibt, kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Tragfähigkeit unter Druckbelastung.

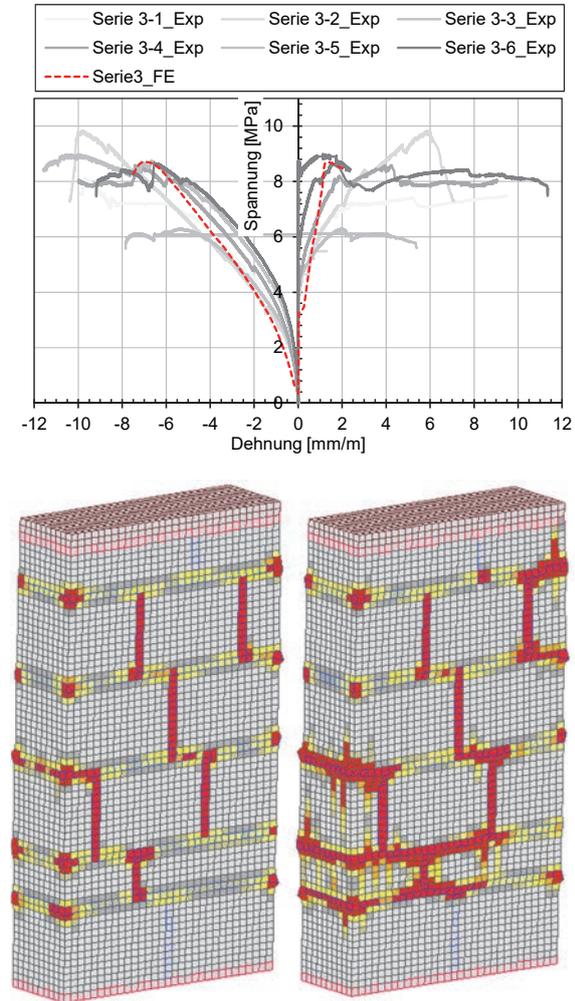


Bild 3 FE-Ergebnisse für den Mauerwerkspfeiler mit oberflächenparallelen Rissen: Spannungs-Dehnungskurven (oben), Versagensbilder (unten)

Die Ergebnisse der vierten Berechnungsvariante (Risse senkrecht zur Oberfläche) sind zusammen mit den Versuchsergebnissen in Bild 4 dargestellt. Die Entwicklung der Schädigung ist ebenfalls in Bild 4 abgebildet. Die vertikalen Risse, zusammen mit den relativ weichen Stoßfugen, »trennen« die Wand in einzelne Säulen. Dies wird numerisch sehr gut erfasst. Infolgedessen treten etwas weniger Spaltrisse in den Steinen auf als in den ersten zwei Prüferien. Die Abnahme der maximalen Druckspannung von ca. 6 % in der Berechnung im Vergleich zur ungerissenen Variante liegt etwas niedriger als der aus den Versuchen ermittelte Abfall von rd. 13 %. Die Ursa-

che für die Abnahme ist in der Tatsache begründet, dass die Mörtelfugen nicht in der vollen Länge »aktiviert« werden können. An den Rissstellen gibt es keinen Verbund zwischen Stein und Mörtel, wodurch der dreidimensionale Spannungszustand gestört wird. Dieses Verhalten kommt bei den dickeren Mörtelfugen vielmehr zur Geltung als bei herkömmlichen (dünnen) Mörtellagerfugen.

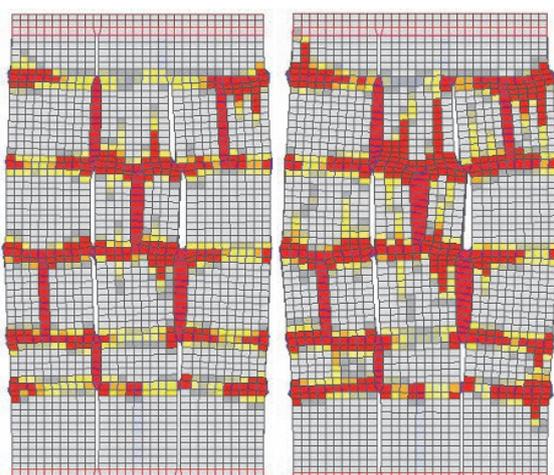
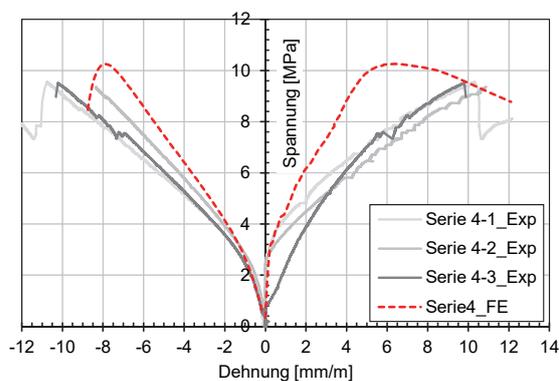


Bild 4 FE-Ergebnisse für den Mauerwerkspfeiler mit Rissen senkrecht zur Oberfläche: Spannungs-Dehnungskurven (oben), Versagensbilder (unten)

In der fünften Berechnungsvariante wurden die beiden Rissarten (parallel und senkrecht zur Oberfläche) kombiniert. Die Spannungs-Dehnungskurven und Entwicklung der Schädigung (Rissbildung) sind in Bild 5 dargestellt. Die numerischen Ergebnisse decken sich gut mit den Versuchen ab. Diese Berechnungen zeigen, dass die Abnahme der maximalen Druckspannung vor allem durch die oberflächenparallelen Risse hervorgerufen wird. Eine Kombination der beiden Rissarten führt zu einer minimalen Abnahme der maximalen Druckspannung im Vergleich zur Berechnungsvariante 3 (Prüfserie 3).

In der sechsten Berechnungsvariante wurde der Einfluss des Torkret-Mörtels untersucht. Dabei

wurden die Fugen bis zu einer Tiefe von 6 – 8 cm mit dem Torkret-Mörtel und die restlichen Bereiche mit dem Tubag-Mörtel (entspricht dem historischen Mörtel) ausgeführt. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sind in Bild 6 dargestellt. Da die Berechnung lastgesteuert erfolgte, ist die Ermittlung der maximalen Druckspannung nicht so genau wie bei den weggesteuerten Simulationen. Es ist auffällig, dass die Berechnung etwas höhere Druckspannungen liefert. Das kann auf die Lasteinleitung zurückgeführt werden, da diese nicht sehr genau numerisch nachgebildet werden kann. Trotzdem ist die Abweichung vom Messergebnis nicht sehr hoch.

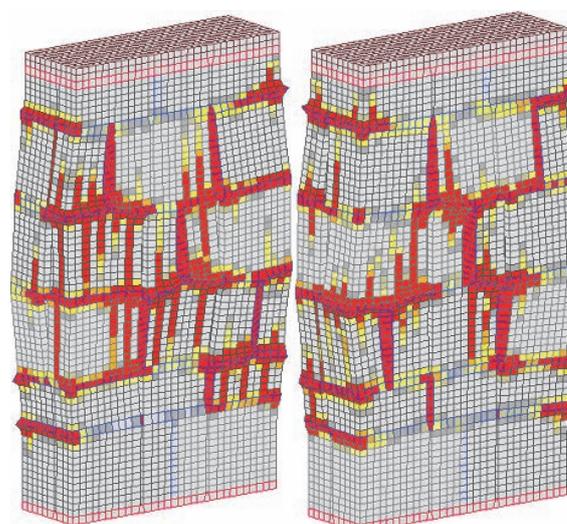
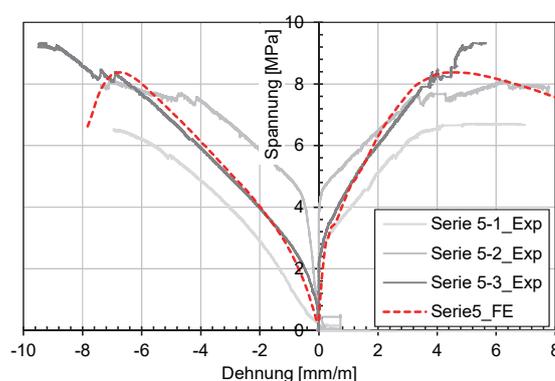


Bild 5 FE-Ergebnisse für den Mauerwerkspfeiler mit Rissen senkrecht und parallel zur Oberfläche: Spannungs-Dehnungskurven (oben), Versagensbilder (unten)

Des Weiteren können die Wandverformungen an den zwei unterschiedlich steifen Seiten relativ gut abgebildet werden. In den Versuchen fallen die axialen Verformungen an der Tubag-Seite etwas höher aus als in der Berechnung, was auch auf einen Unterschied in der Lasteinleitung zurückzuführen ist. Die Rissbildung aus den Versuchen kann

numerisch sehr gut erfasst werden. Infolge der unterschiedlichen Steifigkeiten der zwei Wandseiten treten bei der Belastung Biegespannungen in der Ebene senkrecht zur Wand auf. An der weiche- ren Wandseite kommt es zur Rissbildung in den Fugen (vor allem in den Stoßfugen), wobei die Stei- ne jedoch nicht reißen. An der steiferen Wandseite kommt es zu einer stärkeren Schädigung, sowohl in den Mörtelfugen als auch in den Steinen. In der Kontaktebene der zwei Mörtelarten treten vertikale Spaltrisse in den Wandstirnseiten auf; zuerst in der zweiten Steinreihe von unten, anschließend über die gesamte Wandhöhe.

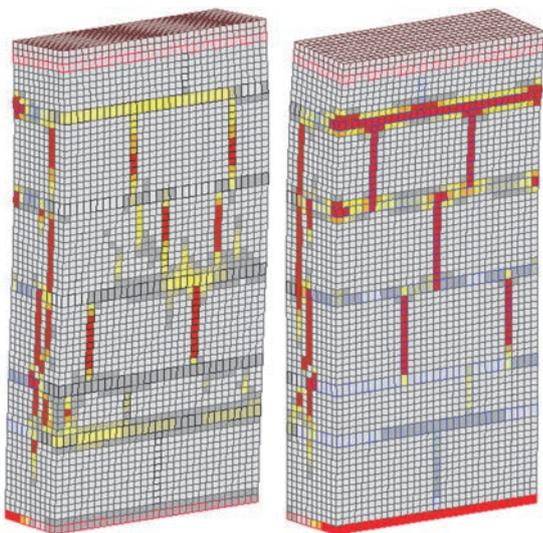
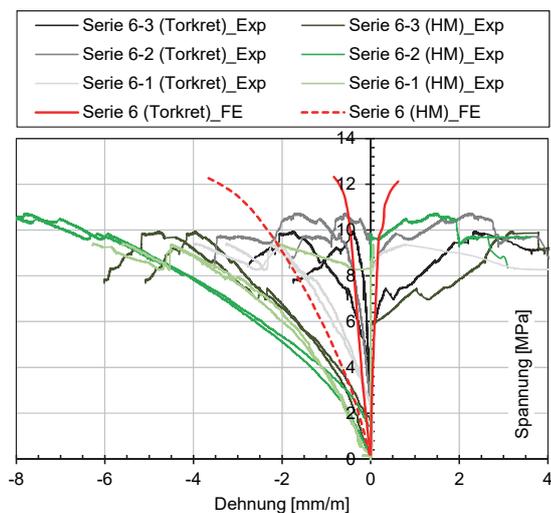


Bild 6 FE-Ergebnisse für den Mauerwerkspfeiler mit historischem Mörtel und Torkret-Mörtel: Spannungs-Dehnungskurven (oben), Versagensbilder (unten)

## 2.2 Untersuchungen zum Einfluss der Fugendicke auf historisches Mauerwerk

Einer der wesentlichen Einflussparameter auf das Druckverhalten des Mauerwerks ist die Fugendicke, wobei dickere Fugen in der Regel zur geringeren Tragfähigkeiten unter Druckbelastung führen [6,7]. Mit abnehmender Fugendicke verringern sich die Querkzugspannungen im Stein und dadurch steigt die Tragfähigkeit des Mauerwerks unter Druckbe- lastung.

Wie bereits erwähnt, wurde im Versuchsprogramm eine etwas höhere Fugendicke ausgewählt, als tat- sächlich im größten Teil des Blauen Turmes vorhan- den ist. Der Grund dafür waren die herstellungsbe- dingten Abweichungen der Steingeometrie (Maßsto- leranz  $\pm 30$  mm).

Um den Einfluss einer geringeren bzw. größeren Fugendicke zu untersuchen, wurden zusätzlich zu dem oben dargestellten Modell mehrere Berechnungen mit unterschiedlichen Mörteldicken durch- geführt. Die numerischen Untersuchungen erfolgten an einem Modell, das in allen drei Richtungen zweimal größere Abmessungen als die Versuchs- körper aufweist. Dabei wurden die Netzgröße, Randbedingungen und Materialeigenschaften gleich der Berechnungsvariante zwei gehalten. Hier ist anzumerken, dass der tatsächliche Elastizitätsmodul des Mörtels für die angenommenen Fugendicken gleich wie bei der Fugendicke von 30 mm ange- nommen wurde, da keine experimentelle Bestim- mung erfolgte. Die Ergebnisse der Berechnungen bestätigten den positiven Einfluss der verminderten Fugendicke auf die Drucktragfähigkeit des Mauer- werks. Anhand dieser Ergebnisse wird ein Berechnungsansatz zur Berücksichtigung der Fugendicke bzw. Steinhöhe vorgeschlagen:

$$f_k = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.18 * f_{k,Versuchsreihe} * \left( \frac{H_{Fuge}}{H_{Stein}} \right)^{-0.75} \\ 1.25 f_{k,Versuchsreihe} \end{array} \right.$$

Wobei:

$f_{k,Versuchsreihe}$  – aus den Versuchen ermittelter Bemessungswert.

$H_{Fuge}$  – Fugendicke (maximaler Wert im Wandab- schnitt ist maßgebend, minimaler Wert für die Fu- gendicke beträgt 15 mm),

$H_{Stein}$  – Steinhöhe (minimaler Wert im Wandab- schnitt ist maßgebend, maximaler Wert für die Steinhöhe beträgt 400 mm).

Bei der Festlegung wurde davon ausgegangen, dass die ausgewählte Fugendicke über den gesamten

Wandquerschnitt (Wanddicke) nicht überschritten wird. Dies ist bei der Ermittlung des lokal anwendbaren Bemessungswertes unbedingt zu beachten.

### 2.3 Untersuchungen zum Einfluss der oberflächenparallelen Risse

Bei der Versuchsfestlegung wurde von einer Schädigung (oberflächenparallele Risse) von ca. 80 % der Steine ausgegangen. Anhand der Georadaruntersuchungen wurde allerdings gezeigt, dass der Blaue Turm nur teilweise solche starke Schädigungen aufweist. Viele Bereiche des Turmes sind wesentlich weniger stark oberflächenparallel gerissen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden einige zusätzliche numerische Simulationen durchgeführt. Dabei wurde der Anteil der gerissenen Steine auf 40 % reduziert. Es zeigte sich dabei eine Erhöhung der Tragfähigkeit um 13 % im Vergleich zum Berechnungsfall mit 80 % gerissener Steine. Die Tragfähigkeit der Mauerwerkspfeiler nimmt also nahezu linear mit zunehmendem Anteil der oberflächenparallelen Risse ab.

## 3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur Ermittlung der tatsächlichen Mauerwerkstragfähigkeit für das Mauerwerk im Blauen Turm in Bad Wimpfen wurden experimentelle und numerische Untersuchungen vorgenommen. Die numerischen Simulationen erfolgten mit der institutseigenen 3D FE Software MASA, wobei als konstitutives Gesetz für die quasi-spröden Materialien das Microplane-Modell [1] zur Anwendung kam.

Die Validierung des Modells anhand der bestehenden Versuchsergebnisse an kleinen Mauerwerksprüfkörpern zeigt, dass der ausgewählte numerische Ansatz für die Untersuchungen des Mauerwerks sehr gut geeignet ist. Mithilfe der numerischen Simulationen wurde der Einfluss der Fugendicke untersucht. Anhand dieser Ergebnisse konnte ein Modell zur Berücksichtigung der Fugendicke erarbeitet werden. Des Weiteren wurde der Einfluss der oberflächenparallelen Risse untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Tragfähigkeit der Mauerwerkspfeiler nahezu linear mit zunehmendem Anteil der oberflächenparallelen Risse abnimmt.

## 4 Literatur

- [1] Ožbolt, Joško et al.: Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. *International Journal of Solids and Structures*, 38 (2000), S. 2683–2711
- [2] Ožbolt, Joško et al.: Numerical study of mixed mode fracture in concrete. *International Journal of Fracture*, 118 (2002), S. 145–161
- [3] Ožbolt, Joško et al.: Dynamic fracture of concrete compact tension specimen: Experimental and numerical study. *International Journal of Solids and Structures* 50, (2013), S. 4270–4278
- [4] Bierwirth, Henric: Dreiachsige Druckversuche an Mörtelproben aus Lagerfugen von Mauerwerk. Technische Universität München, Dissertation, 1995
- [5] Hayen, Roald et al.: Mechanical behaviour of mortars in triaxial compression. *Proceedings of the 6th International Conference on Materials Science and Restoration*, Karlsruhe (2003), S. 295–302
- [6] Hilsdorf, Hubert: Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit, Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München, Bericht Nr. 40, 1960
- [7] Huster, Ulrich: Tragverhalten von einschaligem Natursteinmauerwerk unter zentrischer Druckbeanspruchung. *Gesamthochschule Kassel*, Dissertation, 2000

## Autorin

Dr. Josipa Bošnjak  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685-63377  
E-Mail: Josipa.Bosnjak@mpa.uni-stuttgart.de



# Bauwerksüberwachung am Blauen Turm

## Konzeptionierung, Instrumentierung und Betrieb eines Monitoringsystems zur Überwachung der strukturellen Integrität des Blauen Turms in Bad Wimpfen

*Frank Lehmann, Friedrich Grüner, Michael Schreiner, Jennifer Hof*

**Abstract:** Mit der instrumentierten Dauerüberwachung von Bauwerken steht Baulastträgern und Ingenieuren ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem kontinuierlich vorab festgelegte Messgrößen an einem Objekt erfasst werden können. Um aus diesen Daten weiterführende Aussagen zum Zustand oder zu Veränderungen an einem Bauwerk ableiten zu können, sind eine sorgfältige Planung der Überwachungsmaßnahme, geeignete Sensorik in ausreichendem Umfang und praktikable Interpretationsansätze notwendig.

Am Blauen Turm in Bad Wimpfen wurde im Zuge von Sanierungsmaßnahmen ein Monitoringsystem zur Überwachung von Verformungen des Bauwerks und von Kräften in der Notsicherung installiert. Die Messdaten von drei Jahren Messdauer wurden exemplarisch analysiert. Es hat sich gezeigt, dass sich bleibende Verformungen bisher nur in geringem Umfang eingestellt haben.

**Keywords:** Bauwerküberwachung, Monitoring, Laserdistanzmessung, Neigungsmessung, Kraftmessung, Multiple Regressionsanalyse

## 1 Einleitung

Ein Großteil der heutigen Ingenieurbauwerke in Deutschland wurde während des Baubooms ab den 1960er-Jahren errichtet. Dazu gehörten nicht nur Straßenbrücken (Arndt, Grabow und Eberlein, 2013; Bast, 2018) sondern weitgespannte Tragwerke im Allgemeinen, Türme, Tunnel und anderer Untergrundbauwerke, und viele mehr (HOAI, 2013). Mit einem Bauwerksalter von inzwischen bis zu 60 Jahren haben viele dieser Strukturen einen Erhaltungszustand erreicht, der von den jeweiligen Baulastträgern und, sofern zutreffend, auch nach den Vorgaben der Normen als mangelhaft angesehen werden (BMVBS, 2013; BMVI, 2016). Sofern mit einer Sanierung kein zufriedenstellender Zustand mehr erzielt werden kann und das Bauwerk an sich nicht obsolet ist, wird in der Regel ein Ersatzneubau erstellt.

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen ist in seiner Grundstruktur etwa 800 Jahre und damit deutlich mehr als 10-mal so alt. Seiner dauerhaften Konstruktion

ist es zu verdanken, dass der Turm über die Jahrhunderte trotz Bränden, Umbauten und grundsätzlich den Belastungen aus der Witterung erhalten geblieben ist. Aber ebenso wie an den Ingenieurbauwerken hat auch an diesem Meisterwerk alter Baukunst die Zeit sichtbare Spuren hinterlassen, heute in einem Maß, welches eine Sanierung unumgänglich gemacht hat. Als Zeugnis der Bauzeit und der Geschichte bis zum heutigen Tag sowie als Wahrzeichen der Stadt Bad Wimpfen ist der Turm, analog zu den genannten Ingenieurbauwerken, sicher nicht obsolet. Auch ist ein Ersatzneubau undenkbar, da ein solcher nur eine Kopie des Originals sein könnte. Für den zukunftssicheren Erhalt müssen somit andere, teils aufwändigere Schritte unternommen werden.

Jegliche Erhaltungsmaßnahme an einem historischen Objekt und dem Blauen Turm im Speziellen unterliegt bauwerksspezifischen Besonderheiten. Oftmals, so auch hier, ist zuerst eine genaue Untersuchung des Bauwerks notwendig, damit die Auswirkungen der geplanten Arbeiten hinreichend gut

abgeschätzt, bzw. geeignete Maßnahmen überhaupt erst planbar werden können. Mit Ingenieurwissen und einem Verständnis der jeweils vorliegenden Bauweisen, Baumaterialien und der Bauwerksgeschichte können aus den Daten effektive Schritte für den Erhalt der Bauwerke abgeleitet werden.

Dennoch verbleibt immer eine Restunsicherheit bezüglich der Auswirkungen auf die Struktur. Eine hundertprozentige rechnerische Abbildung der betrachteten Bauwerke bleibt auch nach umfangreichen Untersuchungen, gegebenenfalls mit bedeutenden Eingriffen in die Substanz, unmöglich, da jegliche Prüfung immer nur einen räumlich begrenzten Ausschnitt betrachtet und daraus in zulässiger Weise mit Sicherheitsbeigaben auf die Allgemeinheit geschlossen werden muss. Als Bestandteil einer solchen Maßnahme kann daher, als Hilfsmittel zur fortlaufenden Überwachung und zur Erhöhung der Sicherheit (nicht jedoch zur Garantie der Sicherheit!), eine kontinuierliche Bauwerküberwachung eingesetzt werden.

## 2 Bauwerksüberwachung

Unter einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung, auch Dauerüberwachung oder Monitoring, wird die Instrumentierung eines Bauwerks mit ständiger Erfassung relevanter Messdaten in zeitlich kurzen Abständen definiert. Damit grenzt sich die Bauwerksüberwachung ab gegenüber wiederholten, gegebenenfalls regelmäßigen Messungen, die zwar teilweise in der Literatur auch als »Monitoring« bezeichnet werden, jedoch nicht kontinuierlich und in der Regel autonom arbeiten. Der wichtigste zusätzliche Erkenntnisgewinn einer Dauerüberwachung liegt dabei in der Erfassung der Einflüsse aus den klimatischen Parametern, insbesondere Temperatur und Feuchte, im Tages- und Jahresgang, welche sich in den meisten Fällen als maßgebend für die beobachteten Änderungen in den Messwerten zeigen. Bei zeitlich diskreten Einzelmessungen besteht immer die Gefahr, Messwertänderungen in fälschlicher Weise auf tendenziell fortschreitende Änderungen oder gar einer Schädigung des Bauwerks zurückzuführen, obgleich sie in Wahrheit nur reversible Schwankungen aus Temperatur und Feuchte abbilden. (Lehmann, Schreiner und Reinhardt, 2017)

Messsysteme zur Dauerüberwachung können einerseits als Datenlogger ausgeführt sein, die ein regelmäßiges Auslesen der Daten erfordern. Hierbei ist eine Auswertung der Daten erst im Anschluss an die

Messungen möglich. Andererseits besteht die Möglichkeit die Messsysteme mit einer geeigneten Datenfernübertragung auszustatten, was die Anwesenheit von Personal und einen Zugang zu den Messgeräten nur zu Wartungszwecken erforderlich macht. Voraussetzung ist hierfür ein Messsystem, welches die Daten kontinuierlich, selbstständig auswertet und bewertet. Der wichtigste Vorteil dabei ist die Möglichkeit einer Alarmierung verantwortlicher Personen bei einer Überschreitung festgelegter Grenzwerte oder dem Zusammenkommen verschiedener Einzelereignisse, die auf wesentliche Änderungen am Bauwerk hinweisen.

Eine durchdachte Konzeption ist Voraussetzung für ein Monitoring, mit dem die festgelegten Ziele erreicht werden können. In der Regel ist dafür ein fachkundiger Ingenieur für Bauwerksüberwachung hinzuzuziehen. Zu berücksichtigen sind bei der Planung unter anderem folgende Punkte:

**Sensorik:** Zentral ist die Frage nach den zu erfassenden Messwerten, d.h. aus welchen Daten die gewünschten Informationen zum Bauwerkszustand abgeleitet werden können. Häufig werden als Parameter geometrische Veränderungen festgelegt (Rissöffnung, Gebäudeneigungen, die Verschiebung von Bauteilen, etc.), in Verbindung mit den vorherrschenden Lasten (Wind, Temperatur, Verkehrslasten, usw.). Aber auch spezielle Messwerte, wie Feuchtetransport, Salzkonzentration, Bewehrungskorrosion oder CO<sub>2</sub>-Konzentration können, abgestimmt auf die Fragestellung, überwacht werden.

Darauf aufbauend sind die Anzahl der notwendigen Einzelsensoren bzw. der Messstellen festzulegen und es müssen geeignete Sensortypen ausgewählt werden, die die zu überwachenden Messwerte dauerhaft, zuverlässig und mit ausreichender Genauigkeit erfassen können. Besonders die Langzeitstabilität der Messwerte und die Zuverlässigkeit der Sensoren auch bei direkter Bewitterung und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt sollten dabei beachtet werden. Am Markt stehen für die Sensorik die Produkte aus den Sparten der elektrischen und optischen Messwertaufnehmer zur Verfügung, die sich in ihrer physikalischen Funktionsweise unterscheiden und jeweils bestimmte Vor- und Nachteile aufweisen.

**Datenübertragung:** Sofern es sich um ein Projekt mit mehreren, räumlich verteilten Sensoren handelt, müssen, ausgehend von den Sensoren die Messwerte an eine zentrale Sammelstelle am Bauwerk übertragen werden. Dies kann drahtlos oder kabelgebunden erfolgen. Während eine drahtlose Datenübertragung schnelle Installationszeiten und

ein weitgehend unbeeinträchtigttes Erscheinungsbild des überwachten Objekts auch bei vielen Messstellen und großen räumlichen Entfernungen ermöglicht, kann eine kabelgebundene Lösung Vorteile bringen hinsichtlich Datenübertragungssicherheit, Spannungsversorgung und Datenerfassungsrate.

Die gemessenen Werte müssen von der Sammelstelle, beispielsweise einem zentralen Schaltkasten und nur, sofern eine laufende Datenauswertung erfolgen soll, auf einen Datenserver übertragen werden, von wo aus sie für den betreuenden Ingenieur und ggf. weitere zugriffsberechtigte Projektbeteiligte einsehbar sind. Idealerweise kann dafür ein fest verkabelter Internetanschluss eingerichtet werden, da damit erfahrungsgemäß die höchste Anschlussverfügbarkeit erreicht werden kann. Alternativ können die Daten per Mobilfunk übertragen werden. An der Sammelstelle ist derzeit nahezu immer eine feste Spannungsversorgung notwendig.

**Alarmierung:** Wenn die Instrumentierung abgeschlossen ist, müssen im Rahmen von Referenzmessungen auf Grundlage der vorab durchgeführten Berechnungen die zulässigen Grenzwerte für die Messdaten ermittelt werden. Ein Testlauf mit Probelastung kann dabei hilfreich sein. Darauf aufbauend können Schwellwerte und ein Personenkreis für eine Alarmierung beim Überschreiten dieser Grenzen festgelegt werden.

Speziell an historischen Bauwerken ist es häufig nicht möglich vorherzusagen, wie sie bei Veränderungen an der Struktur oder im Fall des Versagens von Bauteilen reagieren, da sich diese Bauwerke einer klassischen Analyse nach Norm entziehen. Auch moderne computergestützte Simulations- und Analysemethoden können hier an Grenzen stoßen, da die Bauwerke außerhalb der üblichen Konstruktionsweisen liegen und die Materialparameter und exakten Aufbauten nur annähernd wiedergegeben werden können. Demzufolge muss ein Monitoringssystem an historischen Bauwerken versuchen hauptsächlich globale Parameter abzubilden, insbesondere Verformungen des Gesamtsystems, im Gegensatz zu beispielsweise lokalen Materialdehnungen oder Rissöffnungen. Diese können ergänzend durchaus Sinn machen, reagieren aber unter Umständen nicht oder nicht ausreichend auf unerwartete Ereignisse.

## 3 Das Monitoringsystem am Blauen Turm

### 3.1 Ziele

Trotz vorangegangener Instandsetzungs- und Stabilisierungsversuche konnte der Schadensfortschritt am Blauen Turm nicht verhindert werden. Insbesondere die seit dem Umbau von 1851 auftretenden vertikalen Risse konnten in ihrer Entstehung und fortwährenden Rissbreitenzunahme nicht begrenzt werden (Hof, 2018). Ab 2013 wurden daher umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, um die Schadensursachen zu erkunden und wirksame Gegenmaßnahmen einzuleiten. Auf Grundlage des fortgeschrittenen Schädigungszustands wurde im Zuge der Untersuchungen eine Notsicherung am Turm errichtet, um dem Unbehagen gegenüber der strukturellen Integrität des Bauwerks bis zum Vorliegen belastbarer Daten zu dessen Zustand Rechnung zu tragen. Die Notsicherung wurde zu einem späteren Zeitpunkt um zusätzliche Elemente erweitert.

Mit der Installation und dem Betrieb eines Monitoringsystems mit kontinuierlicher Datenerfassung sollten auffällige Bereiche identifiziert und Verformungen des Turms außerhalb der üblichen Schwingungsbreiten durch klimatische Belastungen sowie auftretende Kraftumlagerungen in die Notsicherung fortlaufend erfasst und ggf. gemeldet werden. Damit sollte zusätzliche Sicherheit gewonnen und eine potenzielle weitere Schadensentwicklung frühzeitig erkannt werden.

Mit dem Fortschreiten der Untersuchungen sowie dem Beginn der Instandsetzungsarbeiten sollte die Dauerüberwachung zusätzlich eingesetzt werden, um die Auswirkungen der Sanierung auf den Turm zu erfassen, um Grenzwertüberschreitungen in Bezug auf die Verarbeitungstemperaturen der Mörtelinjektionen anzukündigen und um die Notsicherung entsprechend den Vorgaben an die Vorspannkraft genau Nachspannen zu können.

### 3.2 Konzeptionierung

Für die derzeitige Notsicherung wurden Vollholzbalken vertikal mit Hilfe von umlaufenden Stahlträgerreihen in sechs Höhenlagen an den Turm angelegt. Das Holz bedeckt etwa ein Viertel der Turmoberfläche zwischen Ebene 0 (Geländeniveau vor 1848) und Ebene 3,5 (Türmerwohnung, unterhalb der Ecktürmchen). Die Stahlträgerreihen werden an den

Bauwerksecken mit jeweils zwei vorgespannten Gewindestangen M36 zusammengehalten. Im Versagensfall würde erwartet werden, dass der Turm durch das Sicherungskorsett gehalten wird.

Für ein Monitoring mit Aussagefähigkeit hinsichtlich Kraftumlagerungen in die Notsicherung wurde festgelegt, die Kräfte in allen Gewindestangen der Stahlträgerreihe auf etwa der Hälfte der Turmhöhe (Ebene 2, in ca. 14 m Höhe ab dem heutigen Geländeniveau) zu überwachen.

Ein Ausweichen des Turms in die Notsicherung würde zu einer lateralen Verformung des Mauerwerks sowohl global über die Turmbreite, als auch über die Wandstärke als Ausbauchung führen. Das Monitoring sollte daher die Parameter Turmbreite, umlaufend in einer Höhenlage, und die Wandstärke auf verschiedenen Ebenen umfassen. Es wurde festgelegt, die Turmbreite für eine mögliche Korrelation in etwa 15 m Höhe, parallel zur überwachten Notsicherungslage zu erfassen. Die Wandstärken sollten auf der Nordseite des Turms auf drei Höhen (8 m, 11 m und 20 m) überwacht werden.

Um die Ankündigung eines globalen Versagens abzubilden, sollte die Turmneigung in den Hauptachsen in ca. 20 m Höhe erfasst werden.

Aus Theorie und Praxis ist bekannt, dass die Umgebungstemperatur und deren zeitliche Änderungen wesentliche Parameter für die Verformungen von Bauwerken sind. Als Grundlage für die Dateninterpretation sollten daher die Lufttemperaturen (ergänzt durch die Luftfeuchten) auf allen vier Turmseiten und im Turminneren überwacht werden sowie die verschiedenen Wandtemperaturen in 8 cm Tiefe (von außen) und an einer Stelle verteilt über die Gesamtwandstärke im Querschnitt.

Zuletzt sollten in zwei verschiedenen Höhen die Rissbreiten zweier markanter Vertikalrisse überwacht werden, um festzustellen, ob sich diese messbar vergrößern.

Als Anforderung an das Monitoringsystem wurde eine Messdauer von mindestens 10 Jahren nach der Fertigstellung der Baumaßnahme vorgegeben. Die Datenübertragung sollte durch einen Ethernetanschluss ermöglicht werden. Eine Alarmierung bei Überschreitung von Grenzwerten sollte erfolgen und die Messwerte für die Projektbeteiligten einsehbar sein.

### 3.3 Instrumentierung

Die notwendige Vorspannkraft in den Gewindestangen der Notsicherung wurde mit 30 kN berechnet. Für die exakte Erfassung der tatsächlichen Kräfte wurden die zu überwachenden 8 Stangen mit jeweils vier Dehnungsmessstreifen (DMS) mit 6 mm Messgitter in Vollbrückenschaltung ausgestattet, wovon je zwei die Längsdehnung erfassen und zwei zur Temperaturkompensation senkrecht zur Stangenachse aufgeklebt wurden. In dieser Anordnung ist die Erfassung von Änderungen der Längsdehnung besonders empfindlich, jedoch in Bezug auf den absoluten (tatsächlichen) Wert der Dehnung aufgrund der implizit beinhalteten Querdehnung ungenau. Alle mit DMS instrumentierten Stäbe wurden daher einzeln im Labor kalibriert, um einen exakten Zusammenhang zwischen dem eigentlichen Messwert, der Brückenverstimmung (mV/V), und dem zu überwachenden Parameter, der Vorspannkraft (kN), zu erhalten. Damit wurde der Vorteil der genannten Anordnung der DMS zur exakten Erfassung von Längsdehnungen mit der Erfassung der tatsächlichen Kräfte in den Gewindestangen kombiniert.

Die DMS wurden mit einem gekapselten Sensor zur Messung der Gewindestangentemperatur je Bauwerksecke ergänzt und in geeigneter Weise vor Witterungseinflüssen und mechanischer Beschädigung geschützt. Die Messwerte werden von einem batteriebetriebenen Messverstärker erfasst und per Funk an eine zentrale Basisstation übertragen.

Für die Überwachung der Wandbreiten und der Wandstärken wurde ein laserbasiertes Messverfahren gewählt. Entscheidende Vorteile gegenüber anderen Möglichkeiten, beispielsweise Seilsensoren, liegen in der deutlich geringeren Beeinflussung durch die Witterung (insbesondere Niederschlag, Luftfeuchte und Wind), der höheren Robustheit und Dauerhaftigkeit, der Messwertauflösung und der Zugänglichkeit der Messstrecke für vorübergehende andere Arbeiten.

Die gewählten Laser sind ausgelegt auf einen Messbereich von 0,05 bis 500 m bei einer absoluten Genauigkeit von  $\pm 1$  mm und einer Auflösung von 0,1 mm. Zur Sicherstellung einer hohen Wiederholgenauigkeit wurden Edelstahlreflektoren mit Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung verwendet. Die einzelnen Laser mit zugehörigen Reflektoren für die Turmbreitenüberwachung befinden sich jeweils nahe der Ecken auf jeder Turmseite in horizontaler Linie auf den Turmaußenwänden.

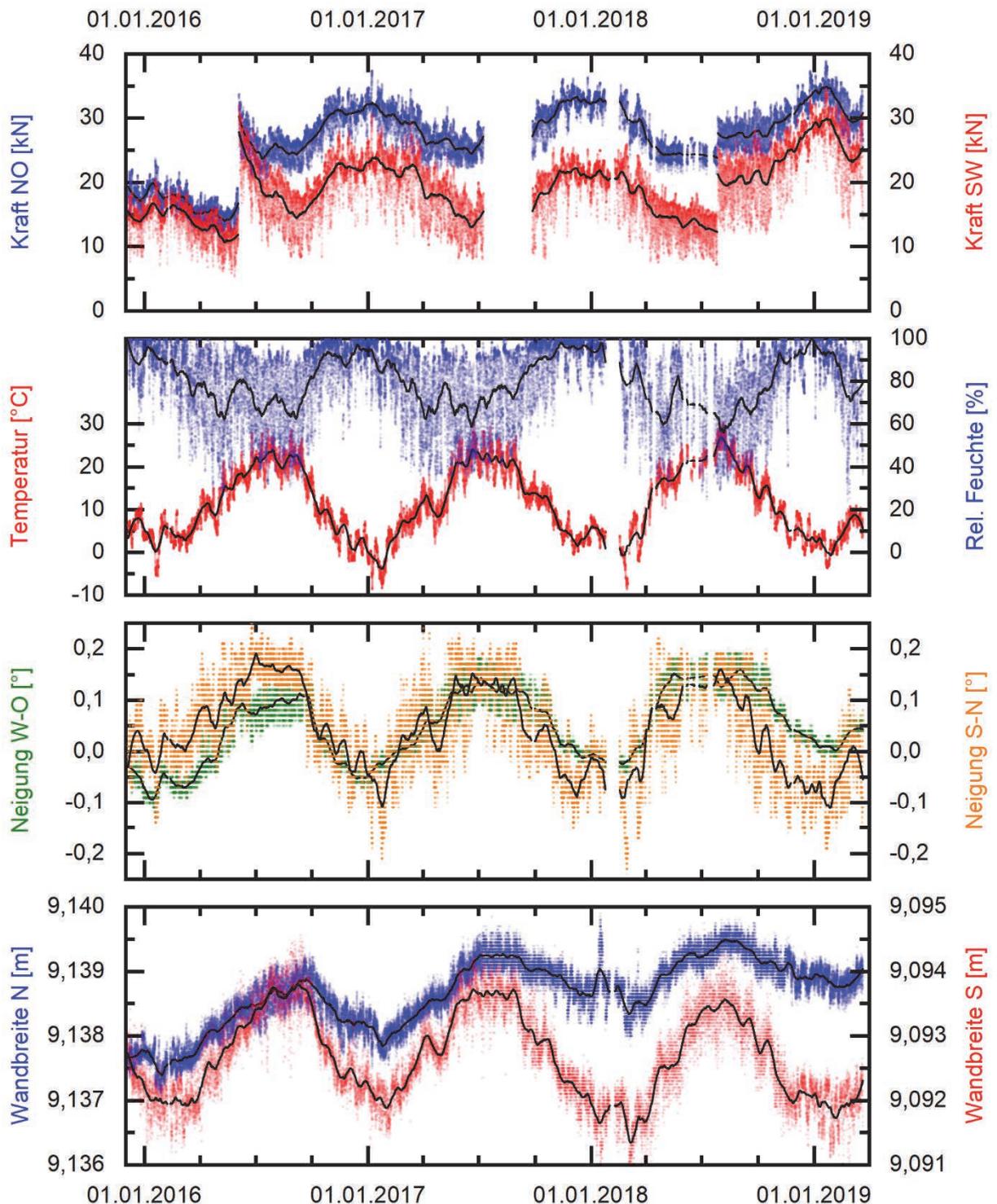


Bild 1 Messdaten (exemplarisch) der Bauwerksüberwachung am Blauen Turm, jeweils als Rohdaten und geglättet über einen Monat (Savitzky-Golay-Filter 2. Ordnung). Von oben nach unten: Vorspannkraft in den Gewindestangen an der nordöstlichen (blau) und südwestlichen (rot) Turmecke, jeweils obere Stange. Am 02.06.2016 und 27.07.2018 wurden die Stangen nachgespannt. Zwischen dem 08.07.2017 und 26.09.2017 wurden durch den Bauablauf keine Daten übertragen. Lufttemperatur (rot) und relative Luftfeuchte (blau) auf der Nordseite. Turmneigung in Richtung West - Ost (grün) und Süd - Nord (orange), d.h. ein positiver Wert entspricht einer Neigung nach Osten bzw. Norden. Breite der Turmwände auf der Nordseite (blau) und der Südseite (rot).

Für die drei Laser der Wandstärkenüberwachung wurden Bohrlöcher auf der Nordseite des Turms über die gesamte Wandstärke angefertigt und diese mit HT-Rohren ausgekleidet, um eine ungestörte Messlinie auch nach der Verfüllung des Mauerwerks mit Injektionsmörtel sicherzustellen. Die Laser wurden an der Turmaußenseite befestigt, die Reflektoren an der Turminnenseite.

Die Laserdistanzmessgeräte können nicht batteriegestützt betrieben werden und sind daher per Kabel mit der zentralen Basisstation verbunden. Die Datenübertragung erfolgt daher ebenso per Kabel.

Die Turmneigung wird auf etwa zwei Dritteln der Turmhöhe mit einem Digitalsensor (MEMS) erfasst. Für die Überwachung der Luft- und Wandtemperaturen sowie der Luftfeuchte werden kapazitive Digitalensoren verwendet. Die Rissbreiten werden mit vollständig gekapselten, resistiven Wegaufnehmern gemessen. Die Daten der Temperatur- und Rissbreitenmessungen werden analog zur Gewindestangenüberwachung drahtlos übertragen. Die Spannungsversorgung erfolgt per Batterie.

### 3.4 Messdaten

In Bild 1 ist eine exemplarische Auswahl von Messdaten der Bauwerksüberwachung am Blauen Turm dargestellt. In jedem Teilschaubild sind die Rohdaten (Punktendiagramme) mit einem monatsweise geglätteten Verlauf (Liniendiagramme) überlagert, für den ein phasentreuer Savitzky-Golay-Filter 2. Ordnung verwendet wurde.

Die obere Grafik zeigt die Vorspannkraft in den Gewindestangen an der nordöstlichen (blau) und der südwestlichen (rot) Turmecke, im jeweils oberen der beiden Verbindungselemente. Gut zu erkennen ist das Nachspannen der Gewindestangen am 02.06.2016 und am 26.07.2018 durch den sprunghaften Anstieg der Vorspannkraft. Als Sollwert wurde jeweils eine Kraft von 30 kN festgelegt, die durch einen fortwährenden Abgleich mit den Messdaten während des Nachspannens sichergestellt wurde. Im Zeitraum vom 08.07.2017 bis zum 26.09.2017 wurden durch den Bauablauf keine Daten übertragen.

In der zweiten Grafik von oben sind Lufttemperatur und relative Luftfeuchte auf der Nordseite des Turms in unmittelbarer Nähe zur Turmwand dargestellt. Diese klimatischen Parameter gelten, neben dem Eigengewicht, als wesentliche Belastungen des Bauwerks. Die mittlere Jahrestemperatur im Messzeitraum (Medianwert) beträgt 10,1 °C, wobei 75 %

der Messwerte zwischen 1,6 °C und 21,6 °C liegen. Die mittlere relative Luftfeuchte liegt bei 84,8 %.

Die dritte Grafik gibt die Neigungsänderungen des Turms wieder. Als Anfangswert (0 °) wurde die Messung am 05.12.2015 um Mitternacht festgelegt. Positive Werte entsprechen einer Neigung nach Osten bzw. Norden.

Zuletzt zeigt die unterste Grafik die überwachten Wandbreiten auf der Nord- und Südseite des Turms.

### 3.5 Ergebnisse

Die Daten der Gewindestangenkräfte zeigen augenscheinlich eine starke Korrelation mit der Temperatur. Es ist jedoch anzunehmen, dass es auch andere Einflüsse auf die vorherrschenden Kräfte gibt. Insbesondere sind Auswirkungen aus der Zeit seit dem letzten Nachspannen (Spannkraftverluste) und aus der Luftfeuchte (Schwinden und Quellen des Bauholzes der Notsicherung) zu vermuten. Um diese Annahmen zu prüfen, kann eine multiple Regressionsanalyse der Spannkraft unter Berücksichtigung der genannten drei Parameter durchgeführt werden. Als Betrachtungszeitraum kann im gegebenen Fall nur der Abschnitt zwischen dem ersten und dem zweiten Nachspannen gewählt werden, da nur hier der Jahresgang in den Messdaten ausreichend abgebildet ist. Die multiple Regressionsanalyse nimmt im einfachsten Fall einen linearen Einfluss der Parameter nach Gleichung (1) an. Daher wurden die ersten 6 Monate nach dem Nachspannen von der Analyse ausgenommen, da sich ein starker nichtlinearer Abfall der Kräfte direkt im Anschluss an die mechanische Belastung zeigt.

$$\hat{F} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 \quad (1)$$

mit

$$\begin{aligned} X_1 &= \hat{X}_{\text{Temperatur}} \\ X_2 &= \hat{X}_{\text{rel. Feuchte}} \\ X_3 &= \hat{X}_{\text{Zeit}} \end{aligned}$$

Der berechnete Wert  $\hat{F}$  gibt die aus der Regression geschätzte Spannung der jeweiligen Gewindestange an. Die Parameter  $\beta_1$  bis  $\beta_3$  sind die geschätzten Koeffizienten der unabhängigen Variablen. Sie geben an, um welchen Wert sich die Gewindestangenkraft ändert, wenn sich die jeweilige Variable um 1 verändert. Das Absolutglied  $\beta_0$  beschreibt die theoretisch vorhandene Kraft, wenn alle anderen Variablen Null werden.

Die Ergebnisse der multiplen Regression sind in Tabelle 1 angegeben. Grundsätzlich wird ein hohes Bestimmtheitsmaß erreicht, was bedeutet, dass die wesentlichen Einflüsse auf die Spannkraft mit den

vermuteten Parametern erfasst werden. Eine Ausnahme bilden dabei die beiden Gewindestangen an der südöstlichen Turmecke sowie in geringerem Maß die obere Stange an der nordöstlichen. Es fällt auf, dass diese Stangen beim Nachspannen im Juli 2018 auch die geringsten Kraftänderungen aufweisen ( $\Delta F_{\text{gemessen}}$  in Tabelle 1) sowie ein von den anderen Stangen abweichendes Verhalten bei Temperaturänderungen (deutlich geringere Werte für  $\beta_1$ , im Fall von SO oben sogar positiv) und über die Zeit zeigen (positive Werte für  $\beta_3$ , d.h. eine Spannkraftzunahme anstelle von Spannkraftverlusten). Die genaue Ursache für das abweichende Verhalten lässt sich allein anhand der vorhandenen Messdaten nicht erkennen. Die Bauwerksüberwachung liefert aber, gemäß der Zielsetzung, einen Hinweis auf einen potenziell auffälligen Bauwerksbereich und zudem eine Datenbasis für die weitere Analyse.

Die Parameter  $\beta_1$  und  $\beta_2$  für Temperatur und relative Luftfeuchte zeigen sich erwartungsgemäß. Eine Zunahme der Temperatur führt zu einer Abnahme der Gewindestangenspannung. Die Stahlbauteile der Notsicherung haben eine deutlich geringere Wärmespeicherkapazität als das massive Mauerwerk des Turms und sind allseitig einer Temperaturänderung zugänglich. Sie erwärmen sich deutlich schneller und dehnen sich somit gleichermaßen schneller aus, was zu einer Reduktion der Spannkraft führt. Eine Zunahme der relativen Luftfeuchte bewirkt ein Quellen des Holzes der Notsicherung und in geringem Maße auch des Turmmauerwerks, wodurch die Zugkräfte in der Stahlgurtung zunehmen.

Der Parameter  $\beta_3$  zeigt einen zeitabhängigen Verlust der Spannkraft für die Gewindestangen an der westlichen Turmseite von etwa 4 Newton pro Tag (SW und NW). Auf der Ostseite ist die bereits erwähnte Kraftzunahme zu beobachten, mit Ausnahme der unteren Gewindestange an der nordöstlichen Turmecke. Die ungleiche Lastverteilung muss mit besonderem Augenmerk weiter beobachtet werden. Die zeitabhängigen Spannungsverluste können durch das Kriechen der Werkstoffe, dem Schwinden des Holzes der Notsicherung nach dem Einbau und einer Lockerung der Schrauben erklärt werden.

Die theoretisch notwendige Kraftänderung beim Nachspannen am 26.07.2018 kann auf Grundlage der Regression und der Messwerte von Temperatur und Feuchte zu diesem Zeitpunkt berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 als  $\Delta \hat{F}_{\text{berechnet}}$  angegeben. Die tatsächlich gemessenen Kraftänderungen  $\Delta F_{\text{gemessen}}$ , als Differenz der Gewindestangenkräfte 16 Stunden nach dem Nachspannen und 8 Stunden davor bei ähnlicher Umgebungstemperatur, sind zum Vergleich daneben vermerkt.

Mit Ausnahme von NW unten liegen alle tatsächlichen Kraftänderungen über dem theoretischen Sollwert. Zum Zeitpunkt des Nachspannens wurde am Bauwerk ein Anstieg der Lufttemperatur von 20 auf 28 °C beobachtet, an den einzelnen Gewindestangen um bis zu 4 K, was rechnerisch einer temperaturinduzierten Änderung der Kräfte von bis zu 1,5 kN entspricht.

Tabelle 1 Bestimmtheitsmaß R und geschätzte Parameter  $\beta_0$  bis  $\beta_3$  der multiplen Regressionsanalyse nach Gleichung (1) für alle Gewindestangen während des Betrachtungszeitraums vom 02.12.2016 bis 26.07.2018.  $\beta_0$  – Kraft;  $\beta_1$  – Temperatur;  $\beta_2$  – relative Luftfeuchte;  $\beta_3$  – Zeit;  $\Delta \hat{F}_{\text{berechnet}}$  – Berechnete notwendige Kraftänderung beim Nachspannen im Juli 2018;  $\Delta F_{\text{gemessen}}$  – Tatsächliche Kraftänderung.

	R	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\Delta \hat{F}_{\text{berechnet}}$	$\Delta F_{\text{gemessen}}$
		[ kN ]	[ N/K ]	[ N/% ]	[ N/d ]	[ kN ]	[ kN ]
SW oben	0,94	20,7	-332	+42,4	-4,22	6,0	10,9
SW unten	0,95	23,5	-477	+47,5	-3,98	6,7	7,1
SO oben	0,68	17,5	+104	+19,6	+8,21	-6,6	3,4
SO unten	0,75	22,8	-218	+51,5	+6,93	-3,1	3,9
NO oben	0,81	26,2	-244	+60,0	+0,21	2,4	4,7
NO unten	0,94	25,3	-558	+63,4	-1,41	5,7	5,9
NW oben	0,94	21,9	-362	+54,1	-4,85	7,0	10,8
NW unten	0,89	24,9	-435	+49,5	-3,50	6,3	6,1

Durch die grundsätzlich warmen Rahmenbedingungen waren die anfänglichen Kräfte in Bezug auf den Jahresgang vergleichsweise gering und hatten damit eine große Abweichung vom Sollwert. In der Folge wurden im Januar 2019 bei einer Umgebungstemperatur von  $-6\text{ °C}$  die bisher höchsten Kräfte in allen Gewindestangen mit bis zu 42 kN gemessen.

Die Turmneigung in Bild 1 ist deutlich von der Jahreszeit abhängig. Wenn sich der Turm auf den sonnenbeschienenen Seiten (Süd und West) im Sommer erwärmt, neigt er sich um etwa  $0,25\text{ °}$  nach Norden und Osten, bezogen auf eine angenommene "gerade" Ausgangsstellung im Winter. Insgesamt ist die Neigungsänderung jedoch gering und bisher im Jahresgang vollständig reversibel.

Die Breiten der südlichen und nördlichen Turmwand bewegen sich etwa 2,2 mm bzw. 1,7 mm um den jeweiligen Medianwert. Die aus der Temperatur erwarteten Längenänderungen liegen bei 2,2 mm und damit im Bereich der gemessenen Verformungen. Auffällig ist die stetige Zunahme der Wandbreite auf der Nordseite, wobei der visuelle Eindruck in der Grafik ausgeprägter ist als die tatsächliche Aufweitung um insgesamt rund 1 mm, d.h. um circa  $1\text{ }\mu\text{m}$  pro Tag seit Beginn der Messungen.

## 4 Diskussion

Die Bauwerksüberwachung am Blauen Turm ermöglicht jederzeit den Projektbeteiligten einen Blick auf den aktuellen Turmzustand, soweit er von der installierten Messtechnik wiedergegeben wird. Dabei ist es nicht möglich, ohne Berücksichtigung der historischen Daten der letzten Jahre auf langfristige Veränderungen am Turm zu schließen, solange die jahreszeitlichen und temperaturabhängigen täglichen Schwankungen im gleichen Variationsbereich liegen. Die Grenzwerte für eine Alarmierung mussten daher bis zum jetzigen Zeitpunkt großzügig gewählt werden. Mit fortschreitender Messung lassen sich die zulässigen Wertebereiche nach und nach enger ziehen, sodass Abweichungen früher erkannt werden können. Ergänzend werden zunehmend auch erweiterte Analysen möglich, wie z. B. die gezeigte multiple Regression, die das Einbeziehen mehrerer unabhängiger Parameter weitaus genauere Schlüsse ermöglichen und in ihrer Aussagekraft deutlich über reine Schwellwertbetrachtungen hinausgehen.

Im weiteren Verlauf der Maßnahmen am Blauen Turm wird die Bauwerksüberwachung um weitere

Elemente ergänzt, um die laufenden Arbeiten, die Wirksamkeit der Sanierung und dessen Auswirkungen auf das Bauwerk während der kommenden Jahre genauer beurteilen zu können. Damit wird nun, anders als bei Sicherungsarbeiten in der Vergangenheit, eine Möglichkeit geschaffen, eine überprüfbare, messbare Verbesserung der statischen Integrität des Turms herbeizuführen. Insbesondere sollen dazu die Kräfte in einer ausreichenden Anzahl der neuen Verbindungselemente der Außenwand überwacht werden, d.h. in den Spannankern und der Vernadelung, die durch das kraftschlüssige Verbinden des dreischaligen Mauerwerks ein Auseinandertreiben der Wände verhindern.

## 5 Zusammenfassung

Der Blaue Turm in Bad Wimpfen ist Wahrzeichen, Kulturerbe und Zeugnis großartiger Baukunst des 12. Jahrhunderts bis heute. Als Folge von Umbauten im 19. Jahrhundert und wiederholten Bränden zeigt der Turm eine fortschreitende Schädigung und ist nunmehr in seiner Struktur gefährdet. Seit 2013 wird der Turm daher wissenschaftlich untersucht und saniert.

Im Zuge der Arbeiten wurde Ende 2015 ein Bauwerksmonitoring installiert, mit dem der Turmzustand ständig überwacht wird. Unter anderem werden mit Laserdistanzmessern die Turmwandbreiten gemessen, exemplarisch die Kräfte in der Stahlgurtung der Notsicherung und die Neigung des Gesamtbauwerks. Nach etwa drei Jahren Messdauer ist es anhand der Daten möglich, erste Aussagen zur langfristigen Veränderung der Messwerte zu treffen. Hierzu wurde am Beispiel der Spannkkräfte in der Notsicherung eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt, die die Einflüsse aus Temperatur, relativer Luftfeuchte und der Zeit seit dem letzten Nachspannen berücksichtigt.

Insgesamt konnte mit der vorgestellten Analyse eine gute Übereinstimmung der Regressionsfunktion mit dem wirklichen Verhalten des Bauwerks erzielt werden. Auffällig ist die von den restlichen Messwerten abweichende Verformung an der südöstlichen Ecke des Turms. Ebenso deutet sich in den Daten eine bleibende Verformungszunahme der nördlichen Wand an, die jedoch aktuell mit rund 1 mm auf 10 m Turmbreite noch sehr gering ist.

## 6 Danksagung

Die Autorin und die Autoren bedanken sich bei der Stadt Bad Wimpfen für die Möglichkeit, die Sanierung des Turms begleiten zu dürfen. Großer Dank gilt dem Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, den Bewohnern und Förderern der Stadt Bad Wimpfen, und allen Mittelgebern für die finanzielle Unterstützung der Sanierung.

## 7 Literatur

- W.-H. Arndt, B. Grabow, M. Eberlein (2013): Ersatzneubau kommunale Straßenbrücken, Endbericht. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu), Berlin, 20.09.2013.
- Bast (2018): Brückenstatistik. Brücken an Bundesfernstraßen, Altersstruktur nach Brückenflächen der Teilbauwerke in Prozent, Stand 01.09.2018. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.
- BMVBS (2013): Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Bedeutung, Organisation, Kosten. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- BMVI (2016): Bericht »Stand der Ertüchtigung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen«. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.
- HOAI (2013): Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen. 17.07.2013.
- Hof, J. (2018): Konzeptionierung und Ausführung eines Messsystems zur Dauerüberwachung der strukturellen Integrität des Blauen Turms in Bad Wimpfen. Masterarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart.
- Lehmann, F; Schreiner, M.; Reinhardt, H.-W. (2018): Instrumentierte Bauwerksüberwachung im Kontext historischer Bauten. Bautechnik, 95 (1), S. 1-5. DOI 10.1002 / bate.201700049.

## Autoren

Dr. Frank Lehmann  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685-66788  
E-Mail: Frank.Lehmann@mpa.uni-stuttgart.de

Dr. Friedrich Grüner  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685-66750  
E-Mail: Friedrich.Gruener@mpa.uni-stuttgart.de

Michael Schreiner  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685-66783  
E-Mail: Michael.Schreiner@mpa.uni-stuttgart.de

Jennifer Hof  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
70569 Stuttgart  
E-Mail: jennifer.hof@online.de



# Statische Berechnungen zum staufischen Mauerwerk

Mark Böttges

**Abstract:** Der »Blaue Turm« in Wimpfen zeigt erhebliche Schäden am Mauerwerk. Die Ursachen der Risse und Verformungen liegen in der komplexen Bau- und Instandsetzungsgeschichte des Objektes. Aufbauend auf einer eingehenden Analyse der Substanz und ihrer Geschichte konnten wesentliche Ursachen für die Schäden ermittelt werden. Für die dauerhafte Sicherung des Turmes wurde ein denkmalverträgliches Instandsetzungskonzept entwickelt. Die qualitativen Analysen wurden durch statische Berechnungen zum Ist-Zustand wie auch zum Zustand nach erfolgter Umsetzung der geplanten Maßnahmen ergänzt und validiert.

**Keywords:** Historisches Mauerwerk, Schadensanalyse, Instandsetzung historischer Konstruktionen, praktische Denkmalpflege, Parameterstudie

## 1 Einleitung

Aus den bauhistorischen Untersuchungen wurden bereits wesentliche Erkenntnisse zur Bau- und Schadensgeschichte gewonnen (s. Beitrag von Peter Kifinger). Die Untersuchungen am Objekt selbst (s. Beitrag von Helmut Maus) gaben Aufschluss über den Aufbau und den Zustand des Mauergefüges. Aber erst die Entnahme von Probekörpern und die Prüfung im Labor ergaben belastbare Materialkennwerte, um statische Berechnungen durchzuführen. Beim Blauen Turm umfassten die Beprobungen nicht nur den Ist-Zustand. Vielmehr wurden Musterinjektionsflächen zum Vergüten des Kernmauerwerks erstellt und entsprechende Bohrkerne im Labor Belastungsprüfungen unterzogen. Belastungsversuche an im Labor hergestellten Prüfwänden ermöglichten darüber hinaus, bauwerksspezifische Parameter für das Schalenmauerwerk zu ermitteln (s. Beiträge von Michael Stegmaier und Josipa Bošniak). So konnten die Planer und Gutachter quasi einen Blick in die Zukunft werfen und Materialparameter für das zukünftige, bereits vergütete Mauerwerk erhalten.

Diese ungewöhnlich umfangreichen und detailreichen Untersuchungen sind eine wichtige Grundlage, die angetroffenen Schäden zu verstehen, zielgerichtete Instandsetzungskonzepte zu entwickeln und letztlich – darauf aufbauend – den Standsicherheitsnachweis des ertüchtigten Bauwerks zu führen.

## 2 Schadensursachen

Eine Erklärung für die Entstehung der Schäden ist in dem Füllmauerwerk zu suchen, bei dem die Füllsteine weitgehend »trocken« zwischen die Schalen eingelegt und dann mit einer Mörtelschicht glatt abgezogen wurden. Da die Steine nur lagenweise und nahezu ohne Mörtel lose aneinandergelegt worden sind, ist von einer gegenüber dem Quadermauerwerk der Außenschale geringen Steifigkeit des Füllmauerwerks auszugehen. Die daraus zwangsläufig resultierenden Umlagerungen vom Mauerkerne in die Mauerschalen erfolgt durch einen Druckbogen, der sich innerhalb des Kernmauerwerks einstellt, und Außen- und Innenschale auseinanderdrückt (Bild 1).

Verstärkt wird dieser Effekt durch die besondere Form des Füllmauerwerks. Die hochkant geneigt eingebauten Steine (Opus Spicatum) erzeugen bei Auflast durch ihre Schiefstellung eine horizontale Lastkomponente, die aufgrund des fehlenden Mörtels zwischen den Steinen nicht durch Schubübertragung im Mörtel abgebaut werden kann. Sie wird also – je nach Neigungsrichtung des Steins – parallel oder senkrecht zum Mauerquerschnitt auf die Außenschalen übertragen und führt zu einer Aufweitung des Querschnitts in alle Richtungen (Bild 2).

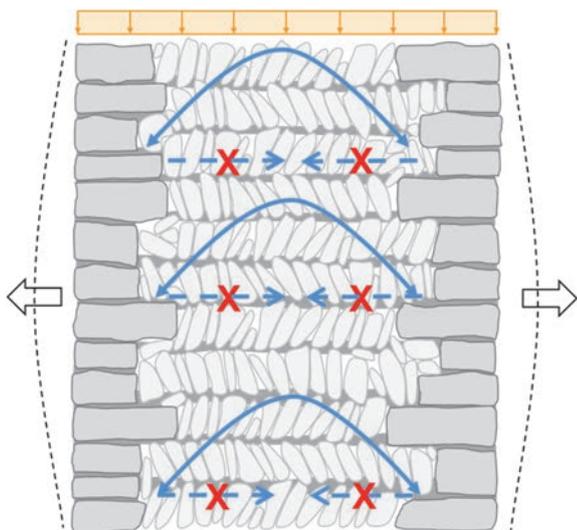


Bild 1 Das mörtelarme Füllmauerwerk lagert sich auf die deutlich steiferen Außenschalen um. Die schräg gerichteten Kräfte bewirken ein Aufweiten des Mauerquerschnitts, da im Innern kaum Zugkräfte aufgenommen werden können

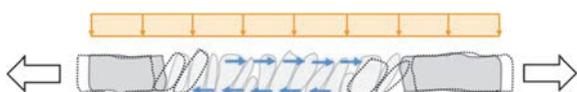


Bild 2 Die schräg stehenden Steine bilden bei Vertikallast zusätzlichen Horizontaldruck auf die Mauer-schalen aus

werden, können Schubspannungen zwischen den Steinen übertragen werden und die Druckfestigkeit des Mauerkerns wird erhöht. Dies gelang leider – wie die Bestandsuntersuchungen gezeigt haben – nur sehr bedingt.

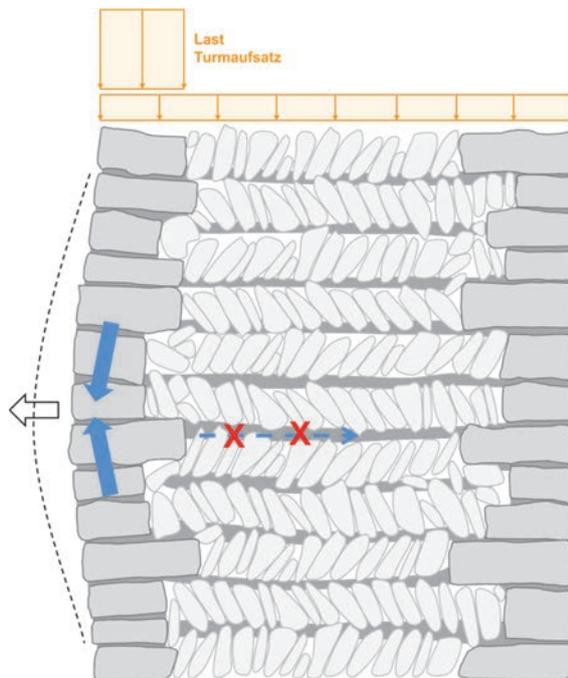


Bild 3 Die Last des Turmaufsatzes von 1851 auf der Außenschale führte zu einer Verstärkung der Verformungen der bereits ausgebeulten Außenschale

Demnach dürfte die Entscheidung richtig gewesen sein, den schweren Turmaufsatz im 19. Jahrhundert nicht auf das Füllmauerwerk zu stellen. Schließlich stellt die Außenschale das demgegenüber deutlich tragfähigere Bauteil dar. Wie die nun durchgeführten Materialversuche und die statischen Berechnungen zeigen, weist das Schalenmauerwerk mit einem intakten Kalkmörtel durchaus eine ausreichende Festigkeit auf, um den schweren Turmaufsatz zu tragen, allerdings nur, wenn ein Ausknicken des relativ dünnen Schalenmauerwerks sicher vermieden wird. Der mörtelarme Mauerkerne konnte hierfür allerdings keine ausreichende Anbindung schaffen, so dass die erhöhte Auflast die unregelmäßig vorverformte Außenschale weiter nach außen drückte (Bild 3).

Die Maßnahme von 1971 basiert demnach auf einem schlüssigen Konzept: Die Außenschale wurde durch Nadelanker mit dem Mauerkerne und der Innenschale verbunden. Zudem sollte die Tragfähigkeit des Füllmauerwerks durch Zementleiminjektion erhöht werden. Wenn die »Stoßfugen« zwischen den schräg stehenden Steinen mit Mörtel verfüllt

Die im Zuge dieser Maßnahme ausgeführte Neuverfugung der Außenschale hatte zum Ziel, die Druckfestigkeit der Außenschale zu erhöhen. Dass die Maßnahme mit Kalk-Zementmörtel im Trockenspritzverfahren – also mit, infolge der Aufschlagenergie, hoher Verdichtung - durchgeführt wurde, schaffte allerdings neue Probleme: Zum einen wurde der Feuchtehaushalt ungünstig beeinflusst, da eindringendes Wasser nun durch die weitgehend dichten Fugen nicht mehr austreten konnte. Zum anderen zieht die gegenüber dem historischen Kalkmörtel deutlich steifere Kalk-Zementverfugung gleichsam Lasten an und bedingt somit eine Lastkonzentration auf den äußeren 10 bis 15 cm der Außenschale. Die Lastkonzentration resultiert in hohen Spaltzugspannungen in den Mauersteinen, die im unteren Mauerbereich mit über  $3 \text{ N/mm}^2$  oberhalb der von der MPA Stuttgart im Rahmen der aktuellen Untersuchungen ermittelten Werten [1] liegen (Bild 5). Der 1985 erfolgte Einbau der 260 Tonnen schweren Trümmerdecke, die ebenfalls ausschließlich auf die Außenschale ablastet, hat diesen Effekt zusätzlich verstärkt.

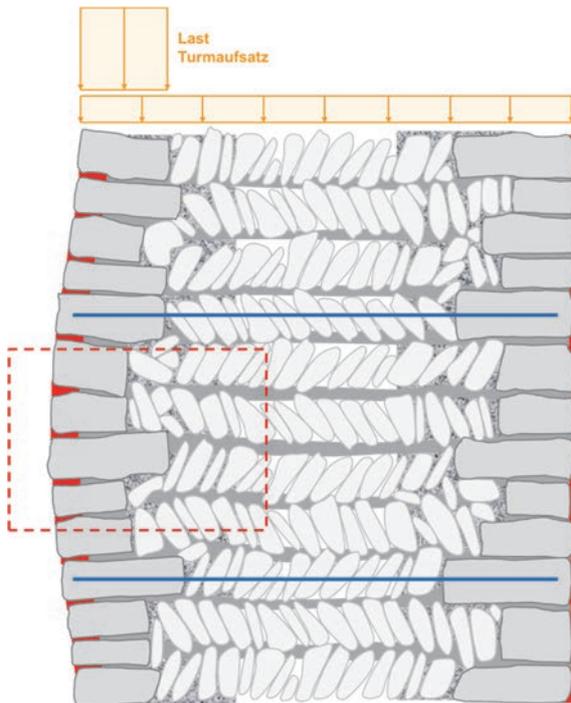


Bild 4 Zustand des Mauerwerks mit Nadelankern, Teilinjektion, Zementverfugung außen und Spritzbeton innen (rot) nach 1971. Gestrichelte Linie: Ausschnitt Bild 5

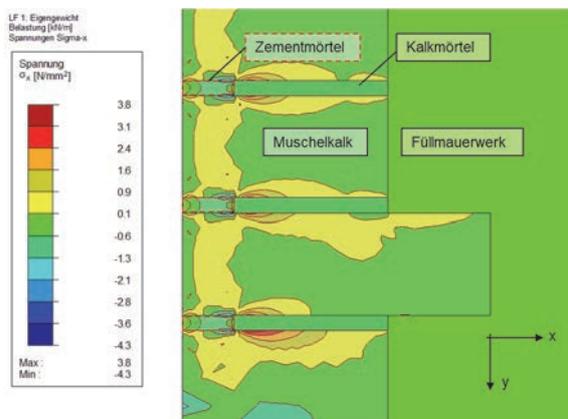


Bild 5 FE-Berechnung: Darstellung der Horizontalspannungen nach Neuverfugung mit Zementmörtel. E-Modul Zementmörtel: 10.500 N/mm<sup>2</sup>, E-Modul Kalkmörtel: 500 N/mm<sup>2</sup>, E-Modul Stein: 60.000 N/mm<sup>2</sup> (Alle Werte [1])

Eine weitere Schadensursache liegt möglicherweise in der ungewöhnlichen Größe der einzelnen Mauersteine. Bei einer Länge der Steine von teilweise über einem Meter reichen in Zusammenhang mit der hohen Belastung bereits kleine Unebenheiten in der Lagerfuge aus, um hohe Momente zu erzeugen. Die daraus resultierenden Biegezugspannungen können vom Stein nicht aufgenommen werden und bewirken vertikale Risse im Stein.

Zudem haben Brände und der Eintrag von Wasser zu Schädigungen des Gefüges und zu einer Entfestigung des Kalkmörtels geführt. Bei Bränden im Turminnenen treten Temperaturdehnungen auf, die hohe Zugspannungen in der kälteren Außenschale verursachen und dort zu vertikalen Rissen führen können.

### 3 Instandsetzung

#### 3.1 Instandsetzungskonzept

Das Instandsetzungskonzept leitet sich unmittelbar aus den festgestellten Schadensursachen ab: Der bisher wenig tragfähige Mauerkerne wird durch weitere Injektionen – die diesmal zusätzlich zum handelsüblichen Injektionsmörtel mit Feinstzement erfolgen – ertüchtigt. Die kalkulierte Mörtelmasse für diese Maßnahme liegt bei ca. 200–250 Tonnen. Hierdurch wird der Mauerkerne derart vergütet, dass eine einaxiale Druckfestigkeit des Mauerkerne nachgewiesen werden kann. Die Außenschalen werden folgerichtig weniger mit Horizontaldruck beaufschlagt. Zusätzlich dazu werden in einem engen Raster von ca. 1,0 × 1,0 m Nadelanker eingebaut, die – im Gegensatz zu den Pieperschen Anker – nicht nur in die Schalensteine eingeklebt, sondern mit einer eingelassenen Ankerplatte auf die Schalensteine aufgesetzt werden. Dies ermöglicht eine deutlich bessere Kraftübertragung vom Mauerwerk auf die Nadelanker, zudem können die Anker vorgespannt werden. So wird der Verbund zwischen Mauerkerne und Mauerschalen verbessert und eine bessere Lastumlagerung innerhalb des Mauerquerschnitts ermöglicht. Zudem verhindern die Nadelanker ein Ausknicken der Außenschale, da sie die Knicklänge auf den vertikalen Abstand der Nadelanker reduzieren.

Zusätzliche flächenparallele, in acht Höhenlagen eingebaute Spannanker sichern konstruktiv den Zusammenhalt der Außenschale und verbessern damit die Umlagerungsmöglichkeiten innerhalb der Mauerscheibe. Zudem nehmen die oberen Anker das Versatzmoment aus der exzentrischen Auflagerung des Turmaufsatzes auf und verhindern so zusätzlich ein weiteres Aufreißen der Wandflächen. Ergänzend werden der zementöse Fugmörtel der Außenschale sowie die innenseitige Spritzbetonschale entfernt, es folgt eine Neuverfugung mit bestandsverträglichem Kalkmörtel. Hierdurch werden schädigende Spannungskonzentrationen abgebaut. Verwitterte und entfestigte Dolomitsteine in der Außenschale werden durch tragfähige Muschelkalkblöcke ersetzt.

## 3.2 Eingangswerte für die Statische Berechnung

Im Zuge der Voruntersuchungen wurden an den vier Turmseiten insgesamt mehr als 50 Kernbohrungen und Bauteilöffnungen erstellt, die zur Ermittlung der Stärke der Außenschale ausgewertet wurden. Bild 6 zeigt die Auswertung exemplarisch für die Ostseite. Die Stärke der Außenschale schwankt hier zwischen 32 und 70 cm um einen Mittelwert aller Öffnungen von etwa 50 cm.

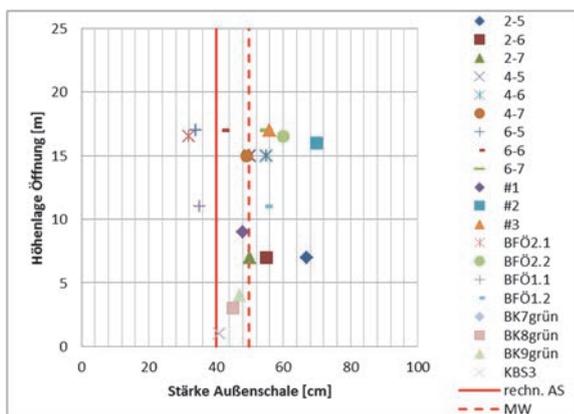


Bild 6 Auswertung der Stärke der Außenschale auf der Ostseite anhand von Bauteilöffnungen

Eine nennenswerte Korrelation der Schalenstärke zur Höhenlage der Untersuchungsöffnung ist nicht feststellbar. Für die Berechnungen wurde auf der sicheren Seite liegend allseitig eine Stärke der Außenschale von 40 cm angesetzt. Für die Ermittlung der Gesamtwichte des Mauerwerks wurde ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des demgegenüber höheren Mittelwertes der Schalenstärke eingeführt.

### 3.2.1 Materialkennwerte des Füllmauerwerks im Bereich der Musterinjektionsfelder

Die Wichte des mit im Zuge der Injektionsversuche vergüteten Füllmauerwerks wurde als Mittelwert von 18 Probekörpern zu  $18 \text{ kN/m}^3$  ermittelt. Die charakteristische Druckfestigkeit (5 % Quantilwert), der als Bruchwert des vergüteten Füllmauerwerks zugrunde gelegt werden darf, beträgt  $1,8 \text{ N/mm}^2$  [1].

Ein repräsentativer E-Modul des Füllmauerwerks konnte im Zuge der Versuche nicht ermittelt werden.

### 3.2.2 Materialkennwerte des Schalenmauerwerks

Die Wichte der Muschelkalkblöcke ergab sich aus dem Mittelwert aller untersuchten Probekörper zu  $28 \text{ kN/m}^3$  [1]. Zur Ermittlung der Wichte der Außenschale wurde ein Zweiphasenmodell aus Mörtel und Stein verwendet, wobei die Volumenverhältnisse aus den sichtbaren Fugenanteilen abgeleitet wurden. Dieses Vorgehen liegt auf der sicheren Seite, da die Stärke der Mörtelfuge im Innern des Mauerwerks in der Regel größer ist als auf der Ansichtsfläche. Aus dem Fugenanteil von 12 % der Ansichtsfläche ergab sich eine Wichte der Außenschale von  $26,8 \text{ kN/m}^3$ .

Die Festigkeit des Schalenmauerwerks wurden anhand von  $1,30 \text{ m}$  hohen Mauerschalenprüfkörpern im Modellmaßstab 1:2 ermittelt (s. Beiträge von Josipa Bošniak und Michael Stegmaier). Dem Nachweis des Schalenmauerwerks wurde der Bemessungswert der Prüfserie 5 (senkrechte Risse und oberflächenparallel Risse kombiniert) mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von  $4,2 \text{ N/mm}^2$  zu Grunde gelegt. Dieser Wert basiert auf einer Knicklänge der Außenschale von  $2,60 \text{ m}$ . Die Verfasser des Berichts empfehlen, die Druckfestigkeit zur Berücksichtigung größerer Vorverformungen des Schalenmauerwerks um 25 % abzumindern. Oberhalb  $6 \text{ m}$  über Gelände wurde diese Abminderung vorgenommen, unterhalb wurde hierauf wegen der geringen Verformungen in diesem Bereich verzichtet. Die genaue Bestandsaufnahme der verformten Geometrie war für diese Entscheidung eine wertvolle Grundlage.

Der E-Modul des Schalenmauerwerks wurde als Sekantenmodul aus den Bauteilversuchen der MPA Stuttgart zu etwa  $1.500 \text{ MN/m}^2$  abgeleitet.

### 3.2.3 Sicherheitskonzept und zulässige Spannungen

Für die Spannungsnachweise wurden auf Basis der von der MPA Stuttgart ermittelten charakteristischen Werte zulässige Spannungen ermittelt.

Die zulässige Druckspannung des vergüteten Füllmauerwerks ergibt sich somit zu

$$\sigma_{zul,FMW} = \frac{0,85 \times f_k}{\gamma_g \times \gamma_m} = 0,89 \text{ MN/m}^2$$

Mit

- $0,85$  = Faktor zur Ermittlung des Langzeiteinflusses nach DIN EN 1996
- $f_k = 1,8 \text{ MN/m}^2$  gem. Gutachten MPA

- $\gamma_g = 1,15$  aufgrund der großen Anzahl der Materialversuche abgeminderter Sicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite
- $\gamma_g = 1,5$  Sicherheitsbeiwert nach DIN EN1996 auf der Widerstandsseite

Die zulässigen Spannungen der Innen- und Außenschale wurde je nach Zustand der Steine ebenfalls aus dem Gutachten der MPA Stuttgart durch entsprechende Abminderung ermittelt. Da der Faktor zur Berücksichtigung des Langzeiteinflusses in der angegebenen Festigkeit bereits enthalten ist, ergibt sich die zulässige Spannung bis zu einer Höhe von 6 m zu

$$\sigma_{zul, Schale} = 2,43 \text{ MN/m}^2$$

und darüber zu

$$\sigma_{zul, Schale} = 0,75 \times 2,43 = 1,82 \text{ MN/m}^2$$

### 3.3 Spannungsverteilung im dreischaligen Mauerwerk

Die Bau- und Schadensgeschichte des Turmes führte im Laufe der vergangenen Jahrhunderte immer wieder zu Lastumlagerungen zwischen Füll- und Schalenmauerwerk. Auch das Entfernen der Zementverfugung und der Austausch verwitterter Mauerwerkssteine werden Lastumlagerungen von der Außenschale in das dann vergütete Füllmauerwerk auslösen. Eine eindeutige Ermittlung der Spannungsverteilung innerhalb des Mauerquerschnitts ist daher und auch aufgrund des nicht bekannten E-Moduls des vergüteten Füllmauerwerks nicht möglich.

Das der statischen Berechnung zu Grunde liegende Konzept ist daher, anhand der ermittelten zulässigen Spannungen der Mauerwerkskomponenten zulässige Spannungsverteilungen innerhalb des Mauerquerschnitts zu ermitteln und mit einer Parameterstudie zu prüfen, ob diese Verteilungen auf der sicheren Seite liegen.

Hierbei wurden als Grenzwertbetrachtungen zwei Spannungsverteilungen ermittelt, von denen eine die zulässigen Spannungen des Kernmauerwerkes und die andere die zulässigen Spannungen der Mauerschalen vollständig ausnutzt. Alle zwischen diesen Spannungsverteilungen liegenden Zustände sind demnach ebenfalls zulässig. Der "Abstand" zwischen den Grenzzuständen stellt das Umlagerungsvermögen innerhalb des Mauerquerschnitts dar.

Die Ermittlung der Spannungen erfolgte bewusst mit einfachen Mitteln auf Basis charakteristischer Einwirkungen. Dabei wurden Eigengewichts- und Windlasten berücksichtigt, Schnee- und Nutzlasten blieben aufgrund ihrer untergeordneten Bedeutung

unberücksichtigt. Die Spannungen wurden aus den Normalkräften und Biegemomenten an acht horizontalen Schnitten ermittelt. Die Querschnittsprünge wurden durch Veränderung der entsprechenden Widerstandsmomente berücksichtigt.

#### 3.3.1 Spannungsverteilung A: Maximale Spannungen im Füllmauerwerk

Die Spannungsverteilung A berücksichtigt den Extremfall eines maximal ausgelasteten Kernmauerwerks. Sie ergibt sich, wenn zwischen Schalen- und Füllmauerwerk voller Verbund und identische E-Moduli bestehen. In diesem Fall werden etwa 80 % der Last aus dem Turmaufsatz aus der Außenschale in den Mauerkern übertragen. Die Spannungen aus dem Eigengewicht des Turmschaftes und des Aufsatzes sowie aus den angreifenden Windlasten verteilen sich homogen im Mauerwerk. Umlagerungen vom Füllmauerwerk in Außen- und Innenschale (vgl. Bild 1), sind in dieser Spannungsverteilung nicht angesetzt.

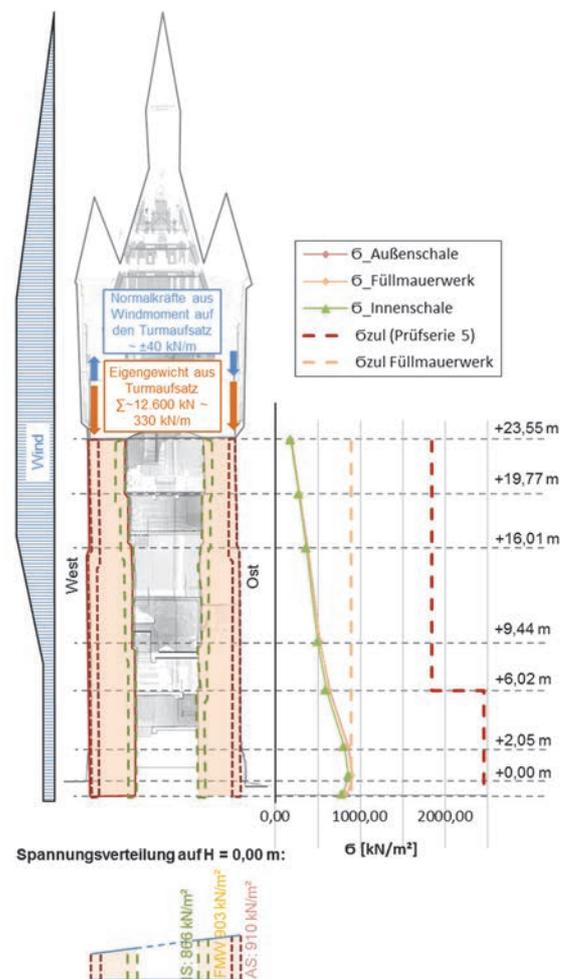


Bild 7 Spannungsverteilung A

Bild 7 stellt die sich daraus ergebenden maßgeblichen Spannungen für die Außen-, die Innenschale und das Füllmauerwerks dar, wobei die Spannungen der Außenschale nahezu identisch mit denen des Füllmauerwerks sind, weshalb die zugehörige Linie verdeckt ist. Die gestrichelten Linien zeigen die jeweils zulässigen Spannungen an. Auf  $H = 0,00$  m wird die zulässige Spannung des Füllmauerwerks zu 100 % ausgenutzt. Auf gleicher Höhe beträgt die Auslastung der Außenschale lediglich  $910 / 2430 = 38$  %. Gegenüber diesem Spannungszustand liegen demnach erhebliche Umlagerungsmöglichkeiten in Richtung der Außenschale vor.

### 3.3.2 Spannungsverteilung B: Maximale Spannungen im Schalenmauerwerk

Die Spannungsverteilung B stellt den Extremfall eines maximal ausgelasteten Schalenmauerwerks dar. Diese Spannungsverteilung wird erreicht, wenn die Normalkraft und das Windmoment aus dem Turmhelm ohne Mitwirkung des Füllmauerwerks ausschließlich von der Außenschale abgetragen werden. Zudem werden zusätzlich zum Eigengewicht des Schalenmauerwerks jeweils 25% des Eigengewichtes des Füllmauerwerks in Außen- und Innenschale umgelagert.

Bild 8 zeigt die sich daraus ergebenden maßgeblichen Spannungen für die Außen- und die Innenschale sowie für das Füllmauerwerk über die Höhe des Turmschaftes. Das Füllmauerwerk und die Innenschale sind am Mauerkopf unbelastet, die Spannungen nehmen nach unten hin kontinuierlich zu. Die Außenschale wird mit der Last des Turmaufsatzes beaufschlagt und weist daher bereits am Wandkopf eine Spannung von  $925 \text{ kN/m}^2$  auf. Es zeigt sich, dass bei voller Ausnutzung der zulässigen Spannungen in der Außenschale das vergütete Füllmauerwerk noch erhebliche Lastreserven aufweist. Die ermittelten Spannungen betragen hier mit  $350 \text{ kN/m}^2$  nur etwa 40 % der zulässigen Spannung. In der unteren Bildhälfte ist die Spannungsverteilung exemplarisch Querschnitt auf  $H = 0,00$  m dargestellt.

### 3.3.3 Parameterstudie zur Ermittlung der Spannungsverteilung

Zur Validierung der angenommenen Umlagerungen innerhalb des Mauerquerschnitts wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Studie erfolgte mittels eines zweidimensionalen linearelastischen Finite-Elemente-Modells, in dem folgende Parameter variiert wurden:

- $E_{\text{Füllmauerwerk}}$  (in % des ermittelten E-Moduls des Schalenmauerwerks)
- a)  $750 \text{ MN/m}^2$  (entspricht 50%)

- b)  $375 \text{ MN/m}^2$  (entspricht 25 %)
- c)  $187,5 \text{ MN/m}^2$  (entspricht 12,5 %)
- Verbund zwischen Schalen- und Füllmauerwerk
- a) Reibverbund  $\mu = 0,6$  mit nicht vorgespannten Nadelankern
- b) Reibverbund  $\mu = 0,6$  mit auf 30 kN vorgespannten Nadelankern
- Berücksichtigung der neu einzubauenden acht Lagen umlaufender Spannanker als horizontale Auflager
- a) mit Auflagern
- b) ohne Auflager

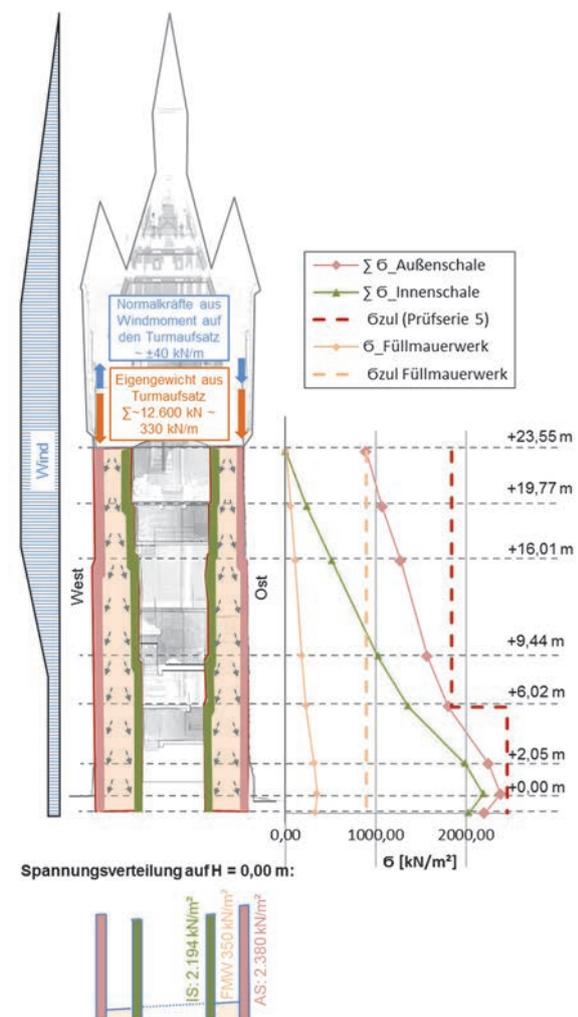


Bild 8 Spannungsverteilung B

Die Berechnungen wurden mit zwei Lastfällen durchgeführt. Lastfall 1 berücksichtigt nur das Eigengewicht des Turmschaftes und Lastfall 2 zusätzlich die Last aus dem Turmhelm auf die Außenschale.

Für die Studie wurde vereinfacht davon ausgegangen, dass die Nadelanker schon zu Beginn des Lastabtrages vorhanden und wirksam waren. In der Realität werden die Nadelanker in den bereits be-

lasteten Turm eingebaut und führen nur bei weiteren Verformungen z.B. durch Windbelastung oder Kriechvorgängen zu Veränderungen der Verbundspannungen. Die errechneten Umlagerungen werden demnach tendenziell überschätzt.

Nr.	$E_{FMW}$	$F_{VSP}$	Hor. Lager	Anteil FMW	Anteil AS
11	750	0 kN	Nein	3 %	21 %
12	750	30 kN	Nein	3 %	41 %
12a	750	30 kN	Ja	3 %	80 %
21	375	0 kN	Nein	11 %	26 %
22	375	30 kN	Nein	28 %	58 %
22a	375	30 kN	Ja	28 %	71 %
32a	187,5	30 kN	Ja	48 %	63 %

Tabelle 1 Auszug aus der Parameterstudie zur Lastverteilung im Mauerquerschnitt

- $E_{FMW}$ : E-Modul des Füllmauerwerks [MN/m<sup>2</sup>]
- $F_{VSP}$ : Vorspannkraft der Nadelanker [kN]
- Hor. Lager: Berücksichtigung einer horizontalen Halterung durch die Spannankergerieste
- Anteil FMW: Lastfall 1: Anteil des Eigengewichtes des Füllmauerwerks, der in das Schalenmauerwerk umgelagert wird.
- Anteil AS: Lastfall 2 minus Lastfall 1: Anteil der Last aus dem Turmaufsatz, der in das Füllmauerwerk und in die Innenschale umgelagert wird.

Die Ergebnisse der Parameterstudie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Am Wandkopf lagert sich ein erheblicher Teil der Last aus dem Turmaufsatz in den Mauer Kern um. Bei  $E_{Füllmauerwerk} = 750 \text{ MN/m}^2$  sind es 80%, bei  $E_{Füllmauerwerk} = 187,5 \text{ MN/m}^2$  werden aufgrund der großen Fläche und der daraus resultierenden Steifigkeit des Füllmauerwerks immerhin noch etwa 63% der Last über die Schubfuge übertragen. Die Umlagerung findet in der oberen Hälfte des Turmschaftes statt.
- Bis zu 48% des Eigengewichtes des Füllmauerwerks lagern sich bei sehr weichem Füllmauerwerk in Innen- und Außenschale um.
- Die Vorspannung der Nadelanker erhöht das Umlagerungspotential durch Aktivierung der Reibung in der Fuge zwischen Kern- und Füllmauerwerk erheblich.

Somit findet im oberen Bereich des Turmes eine Lastumlagerung von der Außenschale in das Füllmauerwerk statt und im unteren Bereich geht – aufgrund der geringeren Steifigkeit des Füllmauer-

werks – wieder ein Teil der Last zurück in die Außenschale. Die Umkehr der Wirkrichtung der Verbundspannungen auf halber Höhe des Schaftes ist in der Darstellung der Schubspannungen in Bild 9 gut zu erkennen. Die Größe der jeweiligen Umlagerungseffekte liegt in der Größenordnung, wie sie bei der Ermittlung der Spannungsverteilungen A und B angenommen wurden. Beide Effekte heben sich jedoch – wie die Parameterstudie zeigt – teilweise auf. Damit ist gezeigt, dass die in Kapitel 3.3.1 dargestellten Spannungsverteilungen die im Mauerwerk erfolgenden Umlagerungseffekte jeweils auf der sicheren Seite liegend abschätzen, die tatsächlichen Spannungen also unterhalb der ermittelten Extremwerte liegen.

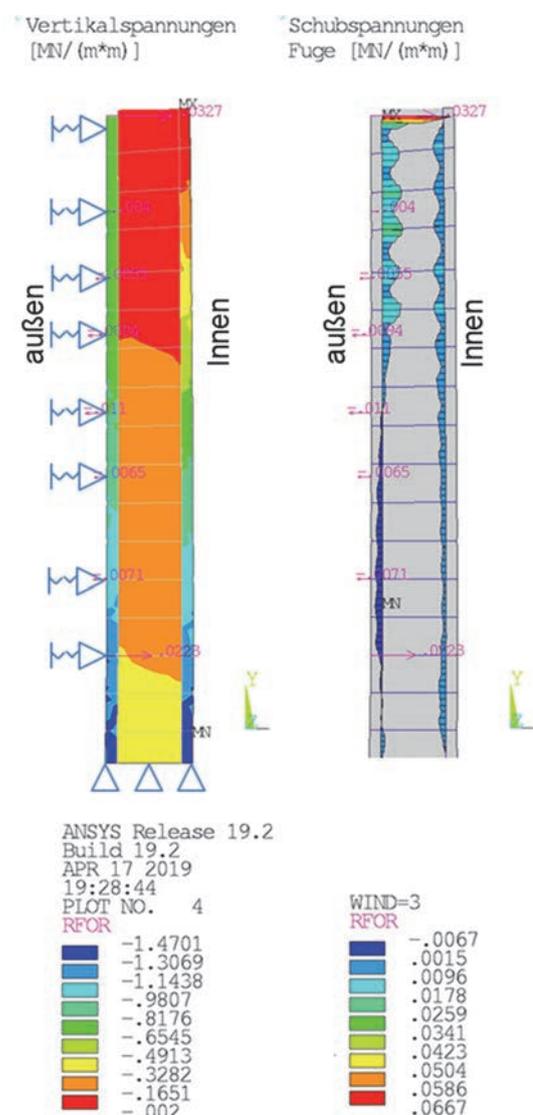


Bild 9 Auszug aus der Parameterstudie (Fall 22a), Mitwirkung: Matthias Jagfeld, TFI

### 3.4 Ausführung und Nachweis der Nadelanker

Die Nadelanker dienen dazu, ein Ausknicken des Schalenmauerwerks zu verhindern und die Übertragung von Schubkräften zwischen Schalen- und Füllmauerwerk zu ermöglichen. Da sich aus der Knicksicherung außer im Bereich stärkerer Beulen keine nennenswerten Lasten ergeben, war das maßgebende Bemessungskriterium die Schubkraftübertragung in der Fuge. Die Nadelanker wurden so bemessen, dass sie einen Verbund zwischen den Schalen erzeugen, der Lastumlagerungen von Spannungsverteilung A zu Spannungsverteilung B und andersherum ermöglicht. Zudem sollten – wie es die Parameterstudie nahelegt – 80 % der Lasten aus dem Turmaufsatz in den oberen 10 m des Turmstumpfes in den Mauerkern eingeleitet werden können. Die Anker werden aus Edelstahl S690 mit einem Durchmesser von 12 mm gefertigt. Jeder Nadelanker wird mit 30 kN vorgespannt. Die versenkten Kopfplatten auf der Außenseite erlauben bei Bedarf ein Nachspannen. Dies setzt voraus, dass kein Haftverbund zwischen Ankerstab und Injektionsmörtel besteht. Hierfür werden die Anker mit Kunststoffhüllrohren versehen.

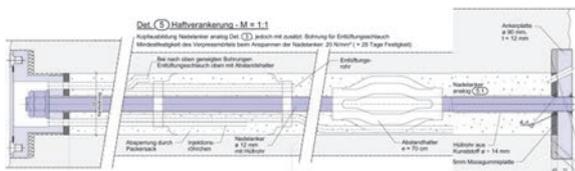


Bild 10 Auszug aus dem Ausführungsplan für die Nadelanker. Außen (links) mit Spannmutter, innen mit angeschweißter Ankerplatte. Beide Ankerplatten sind in das Mauerwerk eingelassen

### 3.5 Baugrund und Gründung

Die Gründungssituation des Turmes wurde auf Grundlage eines Schurfes in der südwestlichen Ecke und zwei Kernbohrungen bis in eine Tiefe von 10–12 m untersucht. Das Fundamentmauerwerk, das augenscheinlich in Qualität und Ausführung dem Sichtmauerwerk entspricht, steht in einer Tiefe von 70 cm auf einer ca. 5 m mächtigen Schicht aus stark verwittertem Ton- und Mergelstein auf. Darunter steht unverwitterter Fels an [2].

Zwar ist die bereits seit langer Zeit unveränderte Gründung phänomenologisch bis dato schadensfrei, allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Zuge der laufenden Maßnahme ca. 200 bis 250 Tonnen Injektionsgut in das Turmmauerwerk eingebracht wer-

den sollen, die zusätzlich von der Gründung abgetragen werden müssen. Bezogen auf das derzeitige Eigengewicht des Turmes von ca. 6.000 Tonnen beträgt die Erhöhung jedoch lediglich etwa 4 %.

Der Nachweis der Standsicherheit konnte unter Berücksichtigung des Spannungszustandes A geführt werden. Spannungszustand B konnte aufgrund der hohen Lastkonzentrationen in der Außenschale nicht nachgewiesen werden. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass die aktuelle Maßnahme die Lasten in der Außenschale erhöht, da die Injektion im Wesentlichen das Kernmauerwerk verfüllt. Zudem finden durch die Neuverfugung tendenziell Umlagerungen von der Außenschale in Richtung des Füllmauerwerks statt. Sollte wider Erwarten die Gründung im Bereich der Außenschale dennoch nachgeben, würden sich die Lasten schon bei kleinen Setzungen auf das Füllmauerwerk umlagern und die Standsicherheit wäre weiterhin gewährleistet.

## 4 Bauabläufe

Bei einem Eingriff in ein stark geschädigtes Gefüge ist nicht nur der Endzustand des Bauwerks zu planen, sondern es sind auch detaillierte Überlegungen über die Standsicherheit während des Bauens anzustellen. Hieraus ergibt sich die Anforderung, bestimmte Bauabläufe einzuhalten, um eine temporäre Überlastung des Gefüges zu verhindern. Die sich daraus ergebenden Vorgaben sollten den Bauablauf nicht unnötig durch lange Wartezeiten oder kleinteiliges Arbeiten ausbremsen.

Die im Fall des Blauen Turmes erarbeiteten Regelungen wurden auf den Ausführungsplänen detailliert festgehalten und werden im Folgenden grob zusammengefasst:

- Die Injektionsarbeiten finden von unten nach oben statt. Über die Höhe des Turmes wurden vier Abschnitte festgelegt. Es dürfen (derzeit) maximal zwei Kolonnen gleichzeitig arbeiten, um eine zu starke Verflüssigung des Mauerkerns zu vermeiden.
- Nach der Injektion des unteren Abschnittes erfolgen zunächst die Vernadelung und der Einbau der Spannanker in diesem Abschnitt, um vor der Lasterhöhung durch die darüberliegenden Injektionen eine ausreichende Tragfähigkeit des unteren Abschnittes herzustellen.
- Die 2015 eingebaute Notsicherung darf erst nach Abschluss der Injektions- und Vernadelungsarbeiten rückgebaut werden. Einzelne Hölzer, die vorab für den Einbau der Spannanker verschoben werden dürfen, wurden in den Plänen markiert.

- Nach Abschluss dieser Arbeiten erfolgen der lokale Steinaustausch der verwitterten Dolomitsteine und das Entfernen der zementösen Verfügun-gen von 1971 von oben nach unten. Hierdurch wird die Außenschale vorübergehend ge-schwächt. Der Mauerker-n ist zu diesem Zeit-punkt jedoch bereits verfestigt und durch die Nadelanker mit der Außenschale fest verbun-den, so dass Lastumlagerungen möglich sind.
- Für den Austausch der verwitterten Dolomit-steine wurden geometrische Randbedingungen festgelegt, welche Steine jeweils gleichzeitig ausgetauscht werden dürfen.

## 5 Zusammenfassung

Der Blaue Turm der ehemaligen Kaiserpfalz von Wimpfen zeigt ein komplexes Schadensbild. Bei früheren Reparaturkampagnen gelang es nicht, die Entstehung von Schäden dauerhaft und wirksam zu unterbinden, teilweise führten die umgesetzten Maßnahmen sogar zu neuen Schäden.

Aufbauend auf baugeschichtlichen Untersuchungen, eingehenden Bestands- und Schadensaufnahmen und Bauteilversuchen zur Ermittlung gebäudespezi-fischer Materialparameter, wurden statische Be-rechnungen sowohl zum Ist-Zustand als auch zu den vorgesehenen Instandsetzungsmaßnahmen unter-nommen.

Zur effektiven Beseitigung der Schadensursachen werden u.a. folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Injektion des Mauerker-n zur Verbesserung der Tragfähigkeit
- Vernadelung der Mauerschalen mit dem Kern-mauerwerk
- Einbau von Spannankern
- Rückbau schädlicher Zementverfugung und Ersatz durch Kalkmörtel

Für den Nachweis der Standsicherheit im Endzu-stand wurden in einem ersten Schritt als Grenz-wertbetrachtung zwei Spannungsverteilungen in-nerhalb des dreischaligen Mauerquerschnitts ermit-telt, die mit den ermittelten zulässigen Spannungen verträglich sind. Im zweiten Schritt wurde mittels einer Parameterstudie gezeigt, dass die diesen zu-grundliegenden Annahmen auf der sicheren Seite liegen, die tatsächliche Spannungsverteilung mithin zwischen den beiden Grenzwerten liegt und damit ebenso zulässig ist.

Die Nadelanker erhöhen das Umlagerungsvermögen und damit die Robustheit des Mauerquerschnitts maßgeblich, insbesondere, da sie vorgespannt ein-gebaut werden und damit den Verbund zwischen Schalen- und Kernmauerwerk erheblich verbessern. Die Mehrbelastung durch die Injektionsmaßnahmen

kann von der Gründung – ggf. unter geringfügigen zusätzlichen Verformungen – aufgenommen wer-den. Der Bauablauf wurde detailliert geplant, um Schäden infolge temporärer Überlastung während des Bauens zu vermeiden.

## Literatur

- [1] Untersuchungsbericht, Bad Wimpfen, Blauer Turm, 2. Untersuchungsabschnitt, Mauerwerkstechnische Versuche und Musterappli-kationen zu Instandsetzungsvorschlag, Mate-rialprüfanstalt Universität Stuttgart, 10.05.2017
- [2] Geotechnischer Bericht (Bericht Nr. 1) Bau-grunderkundung und Baugrundbeurteilung; Blauer Turm in Bad Wimpfen; Kempfert + Raithel Geotechnik GmbH, 02.08.2017

## Autor

Mark Böttges  
Barthel & Maus  
Beratende Ingenieure GmbH  
Infanteriestraße 11a  
80797 München  
Tel.: +49 89 286860-0  
E-Mail: M.Boettges@barthelundmaus.de



# Innovative Bindemittelsysteme für besondere Ansprüche

## Teil 1 – Bindemittelsystem für Mauerwerksinjektionen am Blauen Turm

Frank Rüßmann

**Abstract:** Herstellung und Eigenschaften von Dyckerhoff MIKRODUR Feinstzementen sowie die Entwicklung eines optimierten Bindemittelsystems in Kombination mit Mikrosilikaslurry für Mauerwerksinjektionen beim Projekt »Sanierung Blauer Turm«.

**Keywords:** Injektion, Feinstzement, Mikrosilika

### 1 Veranlassung/Vorgeschichte

Das denkmalgeschützte Bauwerk »Blauer Turm« in Bad Wimpfen ist stark sanierungsbedürftig. Es sollen u.a. Mauerwerksinjektionen mit einem mineralischen Bindemittel ausgeführt werden. Da zum Teil sehr feine Risse bzw. mit feinen Stoffen gefüllte Hohlräume erwartet wurden, wäre eine Injektion auf mineralischer Basis nur mit Feinstzement sinnvoll. Erste Vorversuche zeigten allerdings, dass selbst mit dem feinsten in Europa erhältlichen Feinstzement, MIKRODUR RX (95 % der Teilchen kleiner 6 µm), eine Ertüchtigung des Mauerwerks durch Injektion ohne weitere Optimierung nicht zielführend wäre.

### 2 Dyckerhoff MIKRODUR – Feinstzemente

Dyckerhoff MIKRODUR-Feinstzemente werden nach einem patentierten Verfahren hergestellt. Nach getrennter Vermahlung der Hauptkomponenten Hüttensand und Portlandzementklinker und separater Sichtung auf die erforderliche Feinheit erfolgt die Homogenisierung mit Gips als Erstarrungsregler nach vorgegebenen Rezepturen im Chargenmischer. MIKRODUR-Feinstzemente werden im Wesentlichen bei Verfestigungs- und /oder Abdichtungsinjektionen im Niederdruckverfahren eingesetzt, wo hydraulische Standardbindemittel aufgrund ihrer Korngröße nicht mehr injizierbar sind. Weitere Einsatzgebiete sind Abdichtung und Verfestigung von

Fels sowie die Bauwerksinstandsetzung. Als wichtiger Bestandteil von Hochleistungsbetonen und -mörteln erhöhen MIKRODUR-Feinstzemente die Packungsdichte des Gefüges und verbessern die mechanischen Eigenschaften.

### 3 Rezepturoptimierung des Injektionsgutes

Injektionen in Mauerwerk bzw. in poröse Betone wurden vielfach schon erfolgreich mit MIKRODUR – Feinstzementen ausgeführt. Allerdings war die Ausgangslage dort oftmals eine andere als beim Projekt Blauer Turm. Neben feinen Rissen wurden hier auch mit Feinstoffen gefüllte Hohlräume erwartet, deren Porenraum an der unteren Anwendungsgrenze von Injektionen mit Feinstzementen lag. Zum Erreichen dieser Grenze sollte das mineralische Injektionsgut eine stabile Suspension aus feinen Partikeln mit einer möglichst niedrigen Viskosität darstellen. Auf Basis von Erfahrungen eines früheren Projektes wurde als Zielwert eine Viskosität im Bereich von 10 mPas bei einer ausreichenden Suspensionsstabilität (Absetzmaß n. 24 h < 2%) definiert.

Erste Versuche mit dem bewährten Injektionssystem (MIKRODUR RX + MSH flüssig) zeigten schnell, dass ohne zusätzliche Stabilisierung die Ziele nicht zu erreichen sind.

Als stabilisierender Zusatz wurde das Produkt GrouTaid der Fa. Elkem gewählt, das als Suspension etwa

50 % Silikastaub als Wirkstoff enthält. GroutAid ist als stabilisierendes und festigkeitsbildendes Zusatzmittel für Feinstzement Injektionen in Mauerwerk und Beton bekannt.

Im Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden wurden die Rezepturen für das Projekt Blauer Turm wie folgt getestet:

Die Fließfähigkeit von Suspensionen wird i.d.R. mit einem Marshtrichter gemessen und dabei die Zeit bestimmt, bis 1 l der Suspension aus dem Trichter gelaufen ist. Wasser benötigt 28 s/l.

Die Viskosität wird mit Hilfe eines schubspannungsgesteuerten Rheometers bestimmt (Typ Bohlin CS

50) und in mPas bei der max. Schubspannung (10 Pa) angegeben.

Die Bestimmung der Suspensionsstabilität erfolgt durch das Absetzmaß in einem 250 ml Messzylinder und wird als Wasserüberstand nach 24 h in Vol.-% angegeben.

Die Druckfestigkeit wird an erhärteten Prismen aus der Suspension analog zur Zementnormprüfung bestimmt.

Die Prüfergebnisse der Rezepturen mit Wasser/Feststoffwerten von 1,95, 2,5 und 3,0 sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1

Versuchsnummer	1	2	3	4
Wasser/Feststoff Wert	1,95	2,5	3,0	3,0
MIKRODUR RX [kg/m <sup>3</sup> ]	440,6	328	280	280
Wasser [kg/m <sup>3</sup> ]	858,8	820	840	840
GroutAid [kg/m <sup>3</sup> ]	53,16 % = 234,2	53 % = 173,8	62 % = 173,6	58 % = 162,4
MSH flüssig [kg/m <sup>3</sup> ]	3,8 % = 16,7	3,0 % = 9,8	2,0 % = 5,6	2,5 % = 7,0
Suspensionsdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,29	1,24	1,21	1,21
Marshzeit sofort [s/l]	31	30	30,5	30,5
Viskosität sofort [mPas]	10,0	9,3	9,8	9,4
Marshzeit n. 60 min [s/l]	32	30,5	31	31
Viskosität n. 60 min [mPas]	10,5	9,9	10,4	9,5
Marshzeit n. 120 min [s/l]	34	31,5	32,5	32
Viskosität n. 120 min [mPas]	13,1	11,0	11,5	10,9
Marshzeit n. 180 min [s/l]	38	33,5	33,5	33,5
Viskosität n. 180 min [mPas]	28,9	12,7	12,7	11,9
Absetzmaß n. 24 h [Vol.-%]	0,8	0,8	0,7	1,2
Prismendruckfestigkeiten 2 Tage [MPa]	2,9	0,86	0,65	0,61
7 Tage [MPa]	8,6	4,1	2,9	2,7
28 Tage [MPa]	12,9	6,0	4,4	3,5

## 4 Zusammenfassung

Auch bei Erhöhung des Wasser/Feststoffwertes lässt sich eine fließfähige und stabile Feinstzement-Suspension herstellen. Offensichtlich entscheidend ist die Zugabemenge von GroutAid, wobei die erhöhte Stabilität der Suspension aber auch eine Erhöhung der Viskosität bewirkt. Als optimal wurde Rezeptur 2 eingestuft, die neben einer guten theoretischen Injizierbarkeit (geringe Viskosität bei hoher Stabilität) auch eine ausreichende Festigkeitsentwicklung zeigt. Deshalb wurde für die Bauausführung diese Rezeptur gewählt.

## Autor

Frank Rüßmann  
Dyckerhoff GmbH  
Vertrieb Grauzement Südost / Spezialbindemittel  
Biebricher Straße 72  
65203 Wiesbaden  
Tel.: +49 611 676-1291  
E-Mail: frank.ruessmann@dyckerhoff.com



# Innovative Bindemittelsysteme für besondere Ansprüche

## Teil 2 – Formulierte Kalke als Fugenmörtel am Blauen Turm

*Petra Egloffstein*

**Abstract:** Die Mischung sehr kalkreicher Mörtel und Putze ist schon seit sehr früher Zeit bekannt. Bei einer neuen Europäischen Normung der Baukalke sind neben den ungemischten, natürlich-hydraulischen und gemischten, hydraulischen Kalken neue gemischte Baukalkarten formuliert, welche einen deutlich höheren, frei verfügbaren Kalkgehalt ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) aufzeigen. Durch diese formulierten Kalke (FL) ist es möglich, Mörtel und Putze herzustellen, die in der Instandsetzung von historischen Bauwerken, neben einer sehr guten Verträglichkeit mit den bestehenden Mörteln, auch spezielle Eigenschaftsanforderungen aufzeigen. Dabei ist für den Erhalt des Materialbestands die Verträglichkeit von Alt und Neu unabdinglich notwendig.

**Keywords:** Formulierte Kalke, Zementfreie Mörtel, Historische Bauwerke, Baukalke

### 1 Bindemittel

Die heutigen Baukalkarten sind genormte Bindemittel und werden nach [1] eingeteilt. Hierbei werden Baukalke mit reiner carbonatischer Erhärtung sowie Baukalke mit carbonatischer und hydraulischer Erhärtung unterschieden. Unter carbonatischer Erhärtung versteht man die Aufnahme von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in das Kristallgitter des Calciumhydroxids ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) unter Feuchteinfluss zur Bildung von Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Bei carbonatischer und hydraulischer Erhärtung werden neben der Bildung von Calciumcarbonat hydraulische Phasen, sog. Calciumsilikathydratphasen, gebildet, welche unter Wasserbindung entstehen.

Das Ausgangsprodukt (Kalk oder mergeliger Kalk) und die Brenntemperaturen entscheiden über die Anteile der Klinkerminerale. Je höher die Hydraulikfaktoren  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , desto höher die Festigkeiten im abgebundenen Mörtel.

Des Weiteren sind ungemischte Weißkalke (CL 90, CL 80, CL 70) mit den Ausgangsmaterialien von relativ reinen Kalksteinen und niedriger Brenntemperatur (bis  $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ ) und ungemischte natürliche hydraulische Kalke (NHL 2, NHL 3,5, NHL 5) mit Ausgangsmaterialien von mergeligen Kalksteinen

und mittleren Brenntemperaturen (bis zu  $1.200\text{ }^\circ\text{C}$ ) zu unterscheiden.

Gemischte Produkte mit hohen Calciumhydroxidanteilen (FL 2, FL 3,5, FL 5) werden als formulierter Kalk bezeichnet und differieren nach neuer Norm deutlich von den gemischten hydraulischen Kalken (HL 2, HL 3, HL 5). In Bild 2 sind die Baukalke nach [1] dargestellt.

Die Mischungen der FL-Kalke können vielfältiger Natur sein. So können Weißkalke, natürliche hydraulische Kalke mit puzzolanischen (z. B. Trass, Ziegmehl, Stoffe mit reaktiver Kieselsäure) oder latent hydraulischen Zusätzen (z. B. Hochofenschlacken) und Zementen gemischt werden. Die Ausgangsstoffe und Mengenanteile müssen auf dem Bindemittelsack deutlich gekennzeichnet werden. In Bild 1 ist die Kennzeichnung eines Baukalkes FL B 5 exemplarisch dargestellt. Ferner sind die Bezeichnungen weiterer möglicher Zusatzstoffe aufgeführt. Es ist ebenfalls deutlich gekennzeichnet, dass das Kalkbindemittel FL B 5 in diesem Fall Zement enthält. Fehlt dieser Zusatz, ist kein Zement enthalten.

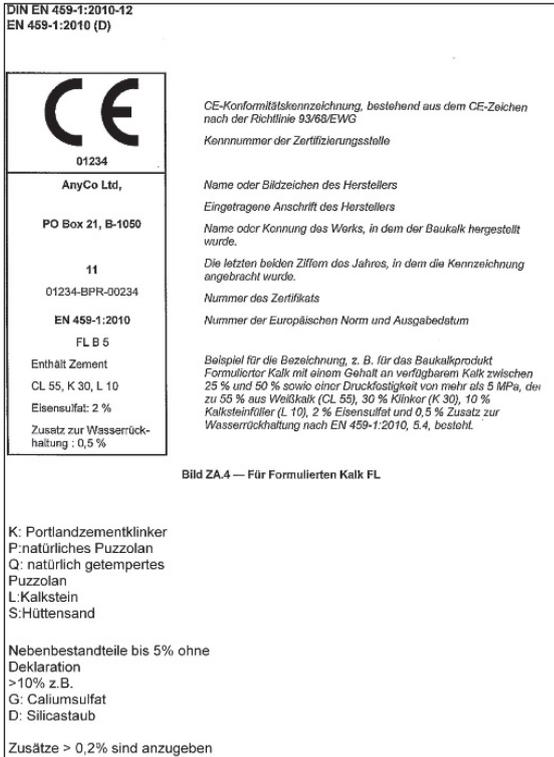


Bild 1 CE-Kennzeichnung eines Baukalkes FL B 5 nach DIN EN 459:2010 [1]

In Bild 2 werden im Überblick alle Baukalke nach [1] aufgezeigt.

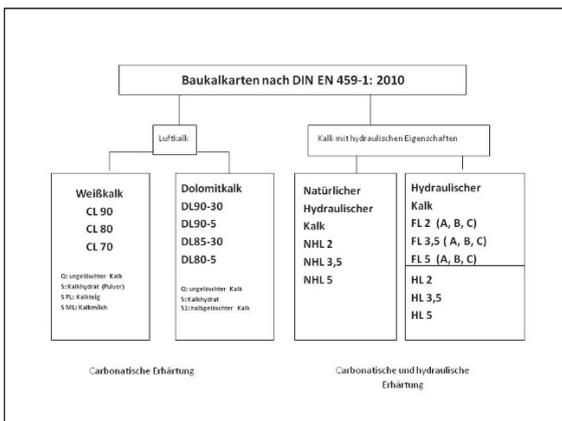


Bild 2 Baukalke nach DIN EN 459-1:2010 [1]

In Tabelle 1 werden die Unterschiede der Kalke in ihren Anteilen des Calciumhydroxidgehalts (Ca(OH)<sub>2</sub>) in Abhängigkeit ihrer Normdruckfestigkeiten verdeutlicht.

Tabelle 1 Calciumhydroxidgehalte und Druckfestigkeiten von Prüfmörteln, welche mit Normsandern hergestellt wurden.

Bezeichnung	Kurzzeichen	Verfügbare Kalk als Ca(OH) <sub>2</sub>	Druckfestigkeit [MPa] nach 28 Tagen
Natürlich hydraulischer Kalk 2	NHL 2	≥ 35	≥ 2 bis ≤ 7
Natürlich hydraulischer Kalk 3,5	NHL 3,5	≥ 25	≥ 3,5 bis ≤ 10
Natürlich hydraulischer Kalk 5	NHL 5	≥ 15	≥ 5 bis ≤ 15
Formulierter Kalk 2	FL 2		≥ 2 bis ≤ 7
Formulierter Kalk 3,5	FL 3,5		≥ 3,5 bis ≤ 10
Formulierter Kalk 5	FL 5		≥ 5 bis ≤ 15
FL A		≥ 40 und <80	
FL B		≥ 25 und < 50	
FL C		≥ 15 und < 40	
Hydraulischer Kalk 2	HL 2	≥ 10	≥ 2 bis ≤ 7
Hydraulischer Kalk 3,5	HL 3,5	≥ 8	≥ 3,5 bis ≤ 10
Hydraulischer Kalk 5	HL 5	≥ 4	≥ 5 bis ≤ 15

Die Gehalte an verfügbarem Kalk (Ca(OH)<sub>2</sub>) und die damit verbundenen carbonatischen sowie hydraulischen Erhärtungsmechanismen, abhängig von der Zusammensetzung der Kalke, sind ausschlaggebend für die Eigenschaften und somit den Einsatz der daraus hergestellten Mörtel und Putze.

## 2 Mörtel

Mörtel aus dem Bindemittel formulierte Kalke können nun durch ihre Zusammensetzung sehr unterschiedliche Eigenschaftsbilder aufzeigen. In Bild 3 werden die Möglichkeiten der Druckfestigkeitseigenschaften in Korrelation zur Zusammensetzung der FL Kalke zusammengefasst [2].

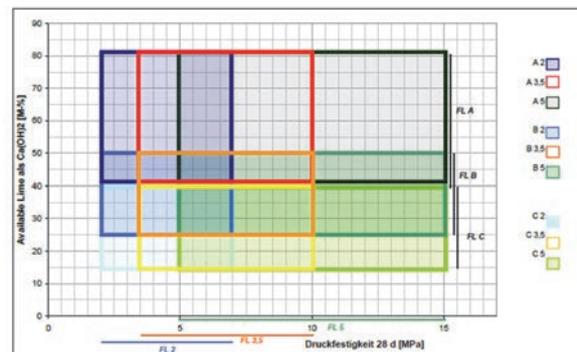


Bild 3 Einfluss der Zusammensetzung formulierter Kalke (FL) auf die Mörtelzusammensetzung [2]

Die unterschiedliche Formulierung der einzelnen Bindemittelstoffe spielt ebenfalls eine große Rolle für die Eigenschaften der hergestellten Mörtel. In Bild 4 wird die Vielfalt dieser Möglichkeiten anhand eines Ishikawa Diagramms aus [2] aufgezeigt.

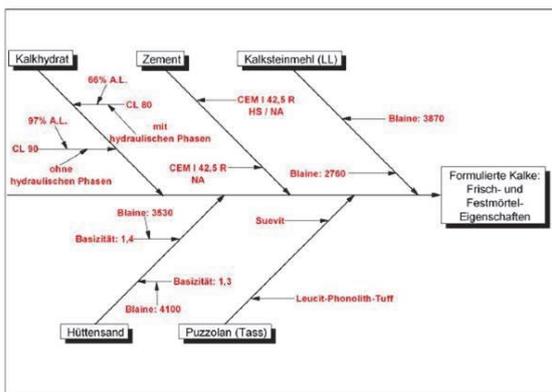


Bild 4 Einfluss der der unterschiedlichen Formulierungen der Bestandsstoffe eines formulierten Kalkes nach [2]

Durch diese Möglichkeiten der Mischung können spezielle Anforderungen für Mauer-, Fugenmörtel und Putze mit sehr hohen frei verfügbaren Kalkgehalten realisiert werden. Gerade zementfreie Mörtel auf Basis der FL-Kalke können mit ihren gesteuerten Eigenschaften für den historischen Bestand von großer Bedeutung werden. Auch ist nun die Möglichkeit gegeben, Leicht- und Dämmputze mit ausreichender Frühfestigkeit ohne Zementzusatz herzustellen.

Um dies zu verdeutlichen, werden in Bild 5 die Unterschiede der Festigkeiten an verschieden zusammengesetzten Mauermörteln mit unterschiedlichen Bindemitteln nach 28/56/90 Tagen dargestellt [4].

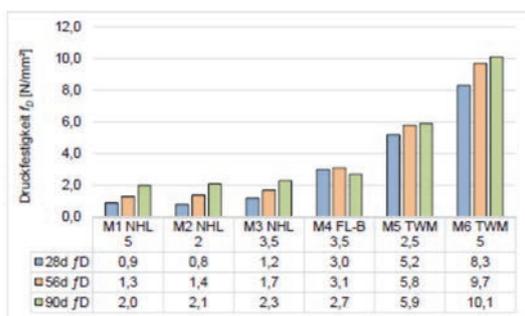


Bild 5 Änderung der Druckfestigkeiten unterschiedlich gebundener Mauermörtel nach 28/56/90 Tagen [4]

Bei ähnlicher Endfestigkeit sind die Anfangsfestigkeiten sehr verschieden. Der zementfreie, natürlich-hydraulische Mörtel (NHL) zeigt eine ca. 50 % geringere Festigkeit als der zementfreie, formulierte FL-Kalkmörtel (FL) auf.

Dieser besteht, bei der Fa. tubag, aus 60 % Weißkalk, 25 % natürlichem Puzzolan und 15 % natürlich

getempertem Puzzolan. Der Gehalt an frei verfügbarem Kalk liegt zwischen 25 % und 50 %.

Der Trass-Kalk-Mörtel (TWM M 2,5/M 5) ist auf HL-Basis in unterschiedlichen Festigkeitsstufen rezeptiert und enthält einen geringen Anteil an frei verfügbarem Kalk und ein in der DIN EN 459 geregelter Zementanteil. Die deutlich höheren Endfestigkeiten werden somit schon nach ca. 28 Tagen, begünstigt durch den Zementanteil, erreicht. Hier zeigt sich deutlich der Unterschied der Festigkeitseinstellung, d. h. des Zementanteils in Früh- und Endfestigkeit. Noch deutlicher zeigt sich der Unterschied der FL-Kalkbindemittel in den dyn. E-Modulwerten (Bild 6) [4]. Durch den Einsatz von natürlich getempertem Puzzolan, hier ein Abfallprodukt aus der Blähglasherstellung, werden die E-Moduli trotz höherer Festigkeiten deutlich herabgesetzt. Durch diese Eigenschaftsveränderungen können festere, jedoch deutlich spannungsärmere Kalkprodukte als Werk-trockenmörtel ohne Zement entwickelt werden.

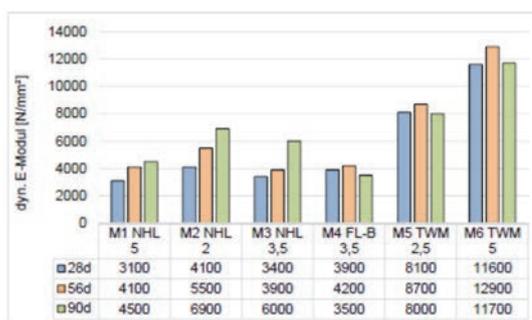


Bild 6 Änderung der dyn. E-Moduli unterschiedlich gebundener Mauermörtel nach 28/56/90 Tagen [4]

### 3 FL-Fugenmörtel am Blauen Turm in Bad Wimpfen

Beim Blauen Turm in Bad Wimpfen stand an erster Stelle die Anforderung der Zementfreiheit. Er sollte Trass zur besseren Verarbeitung enthalten. Der Trass, als auch das natürlich getemperte Puzzolan wirken durch ihre Reaktionen mit dem verfügbaren Kalk dem Aussintern entgegen. Dies ist bei erhöhter Feuchtigkeit, welche im Blauen Turm vorhanden ist, besonders wichtig.

Durch die Voruntersuchungen der MPA Stuttgart [3] wurden folgende mechanische Eigenschaften für den Mörtel im Trockenspritzverfahren festgelegt:

- Mindestdruckfestigkeit: 5 MPa
- Maximaldruckfestigkeit nach 28 Tagen: 8 MPa
- E<sub>dyn.</sub>-Modul: max. 10 GPa
- Zuschlag: Quarzsande

Ferner wurde gefordert, dass aufgrund der Applikationstechnik im Trockenspritzverfahren ein Nachweis der technischen Eigenschaften über Prüfkörper und anschließender Wasserlagerung nach 28 Tagen durchgeführt wird. Die Prüfung erfolgte über die MPA Stuttgart und erst nach Erreichen der geforderten Eigenschaften wurde die Charge freigegeben. Die Farbgebung erfolgte nach den Angaben der Denkmalpflege. Zur Anwendung kam ein FL-F 0-4 mm der Fa. tubag in einer Sondercharge.

## Autorin

Dr. Petra Egloffstein  
tubag Trass Vertrieb GmbH & Co. KG  
Tubag-Allee 12  
56642 Kruft  
Tel.: +49 151 42561900  
E-Mail: p.egloffstein@tubag.de

## 4 Literatur

- [1] DIN EN 459: Baukalk; Teil 1 (2010-12): Begriffe, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 459-1:2010; Teil 2 (2010-12): Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 459-2:2010; Teil 3 (2011-08): Konformitätsbewertung; Deutsche Fassung EN 459-3:2011. Beuth Verlag, Berlin.
- [2] B. Joschko, S. Haas, M. Ivanov, D. Klein, S. Kuhnt, B. Middendorf, S.-O. Schmidt (2013): Einfluss der Zusammensetzung Formulierter Kalk (FL) auf die Mörtel­eigenschaften Bildung eines Korrelationsmodells zur Mischungsoptimierung, Forschungsbericht Nr. 2/13, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.
- [3] Prüfbericht Festigkeitsentwicklung-Kennwerte Blauer Turm FL-Kalkmörtel, unveröffentlicht.
- [4] I. Wilhelm (2014): Eigenschaften von Mörteln mit unterschiedlichen Bindemitteln in verarbeitungsgerechter Rezeptur. Bachelorarbeit Universität Kassel, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften.

# Zustandserfassung am Mauerwerk des Blauen Turmes

## Mauerwerksöffnungen und Überprüfung von Injektionsmusterfeldern

*Friedrich Grüner*

**Abstract:** Die konventionelle Erkundung des Mauerwerks am Blauen Turm mit Kernbohrungen hatte keine eindeutige und ausreichende Zustandserfassung des inneren Mauerwerkaufbaues und des Verbundes zwischen Außenschale und Füllmauerwerk ergeben. Weiterhin sind viele Fragen zu Zustand und Festigkeit des historischen Mauermörtels sowie zu den Injektionen von 1971 unbeantwortet geblieben. Für die Klärung dieser Fragen wurden Mauerwerksöffnungen in der Außen- und Innenschale des Mauerwerks vorgenommen. Für die zu planenden neuen Injektionsmaßnahmen wurden mehrere Musterfelder in unterschiedlicher Höhe am Turm angelegt, um geeignete Injektionsmörtel, die erforderliche Applikationstechnik und Durchführung sowie im Anschluss den Erfolg ausführlich überprüfen zu können.

**Keywords:** Risse, Kalkstein, Injektionsmörtel, Mauerwerksöffnung

## 1 Anlass

### 1.1 Weiterführende Voruntersuchungen

Die zunächst an zahlreichen Bohrkernen durchgeführten Voruntersuchungen am Mauerwerk des Blauen Turmes hatten keine ausreichende Grundlage für einen rechnerischen Nachweis zur Stabilität des Mauerwerks erbracht. Eine wesentliche Ursache liegt in der mangelnden Festigkeit des historischen Mauermörtels und in weiterhin vorhandenen Hohlräumen im Mauerwerk. Weiterhin hatten die Bohrkernuntersuchungen keine ausreichend gesicherten Erkenntnisse über den Anschlussbereich von Sichtmauerwerk und Verfüllmauerwerk ergeben. Im Bohrkernmaterial ist nur wenig prüfbarer, historischer Kalkmörtel erhalten geblieben, meist konnte nur die verwendete Gesteinskörnung (überwiegend flache, gerundete und grobkörnige Neckarkiesel) geborgen werden. Zudem wurde im Verhältnis zu den von Pieper gemachten Angaben zu dem eingebrachten Injektionsmörtel sowohl im Bohrkernmaterial als auch in der Bohrlochendoskopie nur sehr wenig Injektionsmörtel wieder gefunden. Diese Unzuläng-

lichkeiten waren der Anlass für weitere Untersuchungen am Mauerwerk. Mit Hilfe von steinmetzmäßig hergestellten Öffnungen sollte ein besseres Verständnis über die Konstruktionsdetails und zum Erhaltungszustand des Mauerwerks im Blauen Turm erlangt werden.

### 1.2 Musterapplikation zu Mauerwerksinjektionen

Für eine bestmögliche Sicherstellung der praktischen Durchführbarkeit und des Erfolges von neuerlichen Mauerwerksinjektionen wurden die geplanten Arbeitsschritte mit den ausgesuchten Injektionsmörteln am Objekt mit Hilfe von mehreren Musteranwendungen erprobt und anschließend mit Hilfe von Bohrkernen überprüft.

## 2 Mauerwerksöffnungen

Insgesamt wurden vier Mauerwerksöffnungen in der Außenschale durch einen qualifizierten Steinmetzbetrieb (Fa. Peer Mühle) ausgeführt. Weitere Öffnungsstellen wurden im Anschluss in der Innenschale erstellt. Hierzu wurde an jeder geplanten Öffnungsstelle ein großformatiger Stein der Außenschale fest-

gelegt. Es wurde versucht den Quader durch trockenes Ausräumen von Stoß- und Lagerfuge aus dem Verband zu lösen. Bild 1 zeigt die Lage der Bohrungen und der beiden Öffnungsstellen an der Westseite des Turmes. Es zeigte sich jedoch ziemlich schnell, dass die vorgesehenen Muschelkalkquader nur schwer und in kleinere Einzelstücke zerteilt aus dem Mauerwerk herausgelöst werden konnten. An zwei der Öffnungsstellen der Westseite wurde über die Einbindetiefe hinaus bis in etwa 100 cm Tiefe die Öffnung erweitert. Ziel war zu prüfen, ob sich die Mauerwerksqualität in der Tiefe verändert. In der Öffnungsstelle West 1 wurde ein Kalkstein mit einer Höhe von rund 40 cm und einer Einbindetiefe von etwa 55-60 cm ausgebaut. Der ausgebaute Muschelkalkstein hat eine nach Innen zurückspringende, halbreisförmige Form aufgewiesen, die den historischen Baumeistern die Erstellung schmaler Vertikalfugen ermöglicht hat. Durch die Überarbeitung des Fugennetzes im Jahr 1971 kann dies heute vor Ort nicht mehr erkannt werden. Die Dicke der Lagerfugen sind mit ca. 30 mm in der Außenschale in Bezug zur Steinlänge sehr niedrig.



Bild 1 Lage der Bohrkernentnahmestellen 7 bis 9 und der Öffnungsstellen 1 und 2 an der Westseite

Der Öffnungsstein hat in ca. 10 cm Tiefe einen oberflächenparallelen, von außen zuvor nicht sichtbaren Riss aufgewiesen. Entgegen den Erwartungen konnte der Stein nicht in einem Stück ausgebaut

werden, weil sowohl an der Rückseite als auch im Bereich der Stoß- und Lagerfugen ab etwa der Steinmitte erhebliche Mengen an Injektionsmörtel der Maßnahme von 1971 vorhanden war. Dieser Befund legt einen hohen Anteil von Rissen und Hohlräumen im Kernmauerwerk vor der Maßnahme von Pieper nahe. Eine weitere wichtige Erkenntnis aus dieser ersten Öffnungsstelle ist die grundsätzlich gute handwerkliche Ausführung des Mauerwerks.

Ein an der Oberfläche des Turmes verlaufender Riss setzt sich deckungsgleich bis hinter die erste Steinlage in das Turminnere fort. Die Zwickelsteine binden bis in das Hinterfüllmauerwerk ein und sorgen somit für eine gute Verzahnung von Außenschale und Hinterfüllung. Hinter der Außenschale stehen kleinere, plattige Kalksteine schräg auf Spalt nebeneinander (siehe Bild 2).



Bild 2 Öffnungsstelle West 1: Diagonal eingebaute, kleinformatige Mauersteine im Hinterfüllmauerwerk bei einer Öffnungstiefe von rd. 60 cm. Zwischen den Steinen historischer Kalkmörtel und Injektionsmörtel (grau)

Dazwischen befindet sich wenig historischer Kalkmörtel und moderner Injektionsmörtel der Maßnahme von 1971. Die schräg eingebauten Steine weisen einen regelmäßigen Neigungswinkel von rd. 10–15° bzgl. der Vertikalen auf. Die Anordnung der Steine führt in Wandlängsrichtung zu einer unplanmäßigen Horizontalkraft aus der Schrägstellung. Dieser regelmäßig angeordnete, schräg stehende Steinverband des Füllmauerwerks wird in der Literatur als »opus spicatum« beschrieben. Der in hohem Anteil in der Öffnung vorkommende, historische Kalkmörtel ist optisch und haptisch feucht, weist eine geringe Festigkeit auf und zerfällt bei leichter Berührung. Er hat optisch einen hohen Bindemittelanteil mit deutlich sichtbaren Kalkspatzen und es lassen sich Holzkohlestücke im Mörtel finden.

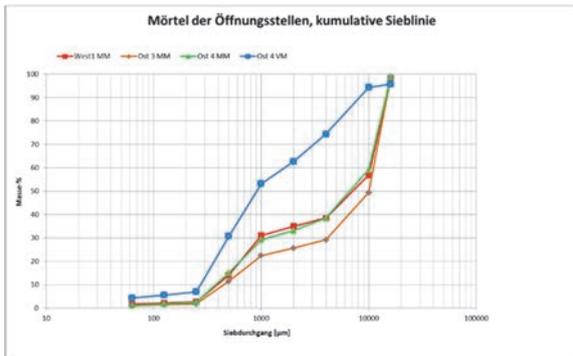


Bild 3 Sieblinie von Mauer- und Versetzmörtelproben der Öffnungsstellen West 1, Ost 3 und Ost 4. VM = Versetzmörtel, MM = Mauermörtel

Hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung gibt es einen deutlichen Unterschied zum historischen Versetzmörtel der Außenschale. Der Versetzmörtel hat ein kleineres Korn bis max. 4–8 mm aufgewiesen, der historische Verfüllmörtel des Kernmauerwerks weist hingegen ein Größtkorn bis zu ca. 32 mm aus flachen Neckarkieseln auf (Bild 3). Alle untersuchten Mauerwerksöffnungsstellen der Innen- und Außenschale weisen folgende Gemeinsamkeiten auf:

1. Das Mauerwerk ist grundsätzlich in einer guten handwerklichen Qualität gemauert worden.
2. Das Hinterfüllmauerwerk wurde gleichmäßig zu den entsprechenden Steinlagen von Außen- und Innenschale des Turmes hergestellt, um das Turmmauerwerk lagenweise aufmauern zu können.
3. Die Bauweise hat dem Stand der Technik zu damaliger Zeit entsprochen.
4. In allen Öffnungsstellen ist das innere Füllmauerwerk aus schräg liegenden, plattigen Kalksteinen gemauert worden und ist vergleichbar zu »opus spicatum«.

Der historische Mörtel ist sehr bindemittelreich (viele sichtbare Kalkspatzen), weist aber auch in den Öffnungsstellen eine geringe Festigkeit auf, was bei diesem hohen Bindemittelgehalt auffällig ist. Möglicherweise ist der Mörtel durch Umwelteinflüsse (Dauerfeuchte und Frost) degeneriert. Lichtmikroskopische Untersuchungen an mehreren Dünnschliffen haben eine hohe Porosität, häufige Rissbildungen und deutliche Lösungserscheinungen am karbonatischen Bindemittel gezeigt (vgl. Bild 4 bis Bild 6). Der historische Mörtel der Westseite ist optisch und haptisch deutlich feuchter als der historische Mörtel der Ostseite. Erst spät konnte im Laufe der Untersuchungen festgestellt werden, dass dies auf eine Leckage in der Entwässerung des Turmes zurück zu füh-

ren ist. Diese wurde bei der Instandsetzung der Türmerwohnung nach dem letzten Brand im Jahr 1985 verursacht.

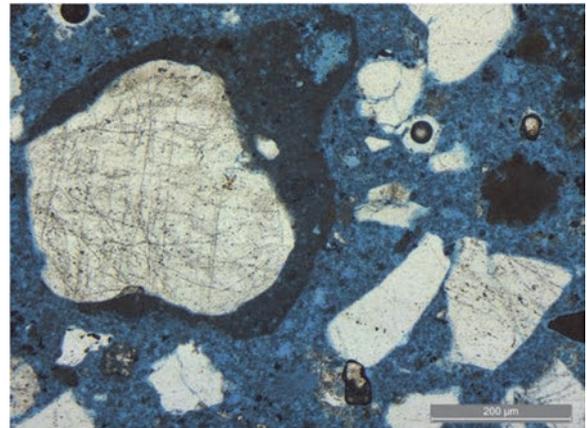


Bild 4 Westfassade, Bohrkern 7, im Allgemeinen ist das Mörtelbindemittel stark reduziert. Der Porenraum ist blau angefärbt. Um ein größeres Quarzkorn herum hat sich das karbonatische Bindemittel besser erhalten (dunkel gefärbt)

Die Durchfeuchtung von Kalkstein und Mauermörtel hat von oben nach unten in den Öffnungsstellen systematisch abgenommen. Die stärkste Durchfeuchtung wurde in der oberen Öffnungsstelle an der Westseite der Innenschale gefunden.

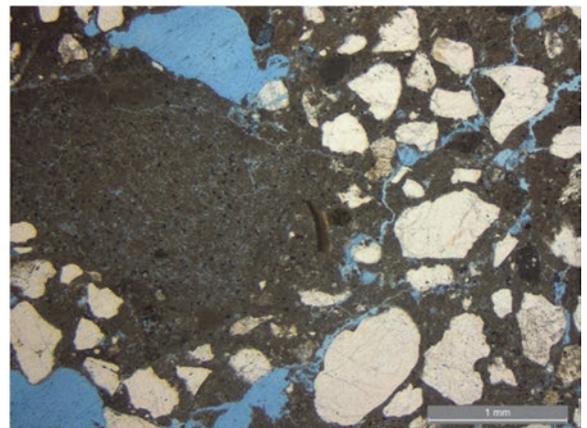


Bild 5 Ostfassade, großer karbonatischer Bindemittelklumpen in der linken Bildhälfte und zahlreiche, feine Rissbildungen in der Bindemittelmatrix, deutlich erkennbare, offene Porosität, blau angefärbt

An der Westfassade des Turmes ist der während der Sanierung 1971 eingebrachte Torkretmörtel deutlich tiefer in den Lagerfugen vorhanden (z. T. bis ca. 15–20 cm tief) als an der Ostfassade (bis zu ca. 12 cm). Dies deutet darauf hin, dass der Lagerfugenmörtel

der Westseite zum Zeitpunkt der letzten Sanierungsmaßnahme tendenziell stärker verwittert war als auf der Ostseite, da hier der Mörtel vor der Sanierung nicht so tief ausgeräumt wurde.

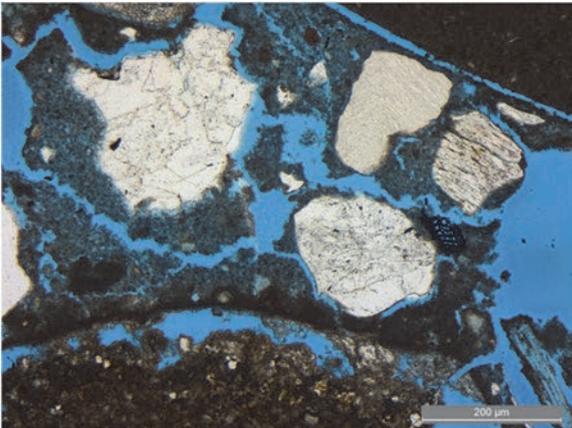


Bild 6 Historischer Mauermörtel aus der Öffnungsstelle West 1 mit starker Auflockerung des Korngefüges. Ablösung des historischen Kalkmörtels vom Injektionsmörtel (unterer Bildrand). Rechts im Bild ist noch die Zellstruktur in einem Holzkohlestückchen (schwarz mit Löchern) zu erkennen

In allen vier Öffnungsstellen der Außenschale wurde viel Injektionsmörtel gefunden. Daraus lässt sich schließen, dass die Sanierung bezüglich der Hohlraumverfüllung erfolgreich war. In den Öffnungsstellen konnten jedoch nach wie vor noch kleinere und größere Hohlräume gefunden werden. Insgesamt ist das Mauerwerk jedoch kompakt und hohlraumarm einzuschätzen (Bild 7 und Bild 9).



Bild 7 Öffnungsstelle West 1: Ansicht nach dem Herausnehmen des Steins mit gut sichtbarem Injektionsmörtel (mittelgrau)

Unterschiedliche Graufärbungen der Injektionsmörtel lassen auf unterschiedliche Wasserzugabe ( $w/z$ -Werte) bei der Herstellung schließen, was auch durch Porositätsmessungen mit Hg-Druckporosimetrie bestätigt wurde.

In den Öffnungsstellen wurden keine »neuen« Hohlräume/Risse entdeckt, die auf ein weiteres Ablösen der Außenschale vom Verfüllmauerwerk hindeuten. Häufig wurden oberflächenparallele Risse in einer Tiefe von 10–20 cm in den Kalksteinen der Außenschale sowohl in den Öffnungsstellen bzw. den Bohrkernen gefunden (Bild 8). In einer Öffnungsstelle wurde ein Binderstein mit einer Tiefe von ca. 80 cm entnommen, der ebenfalls oberflächenparallel in drei Tiefen gerissen war (Bild 10).

Die Häufung dieser oberflächenparallelen Risse im Kalkstein ist war im Hinblick auf ein das Instandsetzungskonzept als kritisch zu bewerten und die Sicherung dieser Schalen ist für die Sanierung zu berücksichtigten musste bei der Sanierung berücksichtigt werden.



Bild 8 Öffnungsstelle West 2: Rechte Flanke der Öffnungsstelle nach Verbreiterung und Vertiefung bis ca. 100 cm. Es ist deutlich der oberflächenparallele Riss im Kalkstein der Außenschale erkennbar



Bild 9 Öffnungsstelle Ost 3: Rechte Flanke der Öffnungsstelle nach dem Herausnehmen des Steins der Außenschale. Größere Hohlstelle in der Stoßfuge (siehe eingesteckter Meterstab)



Bild 10 Öffnungsstelle Ost 4: Ansicht der Öffnungsstelle mit einer Tiefe von rd. 80 cm nachdem der Binderstein ausgebaut war. An der Rückseite des Bindersteines ist eine größere Menge Injektionsmörtel (dunkelgrau) vorhanden, an dem noch ein Teil des Bindersteines klebt. Mehrfache Rissbildung im Dolomitmalkstein, zur Steinoberfläche hin kleinteiliger bis bröckeliger Zerfall

### 3 Musterinjektionen zur Mauerwerksverbesserung

#### 3.1 Injektionsmaterialien und Durchführung

Für die Überprüfung der Verbesserung der Mauerwerksfestigkeit durch neue und zusätzliche Injektionen wurden vom Ing.-Büro Barthel & Maus insgesamt sechs Musterinjektionsfelder am Blauen Turm geplant. Um möglichst alle Wegsamkeiten bzw. verbliebene Hohlräume im Mauerwerk zu erreichen, wurde für den höheren Turmabschnitt eine zweistufige Vorgehensweise vorgesehen. In der unteren Hälfte des Turmes wurde bereits durch die Maßnahmen von Pieper in den 1970er Jahren ein hoher Verfüllgrad von Hohlräumen erreicht. In den höheren

Abschnitten wurde von Pieper jedoch systematisch weniger Injektionsmaterial eingebracht, zum einen weil der finanzielle Rahmen der Maßnahme erreicht war und andererseits aus Gründen der Lastenerhöhung im Gründungsbereich des Turmes. Bis vor kurzem war zum Untergrund des Turmfundamentes nur wenig bekannt. Es wurde lange Zeit angenommen, dass der Turm auf massiven Fels gegründet ist, dies hat sich aber in den aktuellen Baugrunduntersuchungen nicht bestätigt. Vielmehr ist das Turmfundament auf Tonstein gegründet. Der Fels aus Muschelkalkstein wurde erst darunter angetroffen.

Die Lage der Musterinjektionsfelder ist im Plan von Bild 11 zusammen mit Auswertungen zur Injektionsmenge von 1971 und der bisherigen Voruntersuchungen verzeichnet. Jeweils drei Injektionsmuster wurden an der Westseite und an der Ostseite ausgeführt. Die Musterfelder wurden verteilt über die Höhe angeordnet.

In jedem Musterfeld wurden insgesamt neun Injektionsbohrungen durchgeführt, die dann zweistufig injiziert wurden. In der ersten Stufe der Injektion wurde mit einem herkömmlichen Injektionsmörtel der Fa. Tubag, Typ HSTV-p, verpresst. Mit diesem Material sollten größere Zugänglichkeiten und Hohlräume verfüllt werden. Nach ausreichender Erhärtungszeit wurde dann in einer zweiten Stufe mit Feinstzement Microdur R-X von Fa. Dyckerhoff nachinjiziert, um noch feinste Hohlräume und Risse im historischen Mörtel zu verfüllen. Der Erfolg dieser Injektionsmaßnahme wurde anhand der Begutachtung von insgesamt bis zu sieben Kernbohrungen aus jedem Musterinjektionsfeld und mit Hilfe von Druckfestigkeitsprüfungen an diesen verpressten Bohrkernen überprüft.

Ein weiteres wichtiges Ziel der Kernbohrung nach der Musterinjektion war, herauszufinden, wie sich das Injektionsgut um die Injektionsbohrstellen herum verteilt hat, um einen Anhaltspunkt für das Raster der Injektionsbohrungen für die endgültige Injektionskampagne zu erhalten.

Die Lage der zunächst geplanten Kernbohrungen nach der Injektion sind aus Bild 12 ersichtlich.

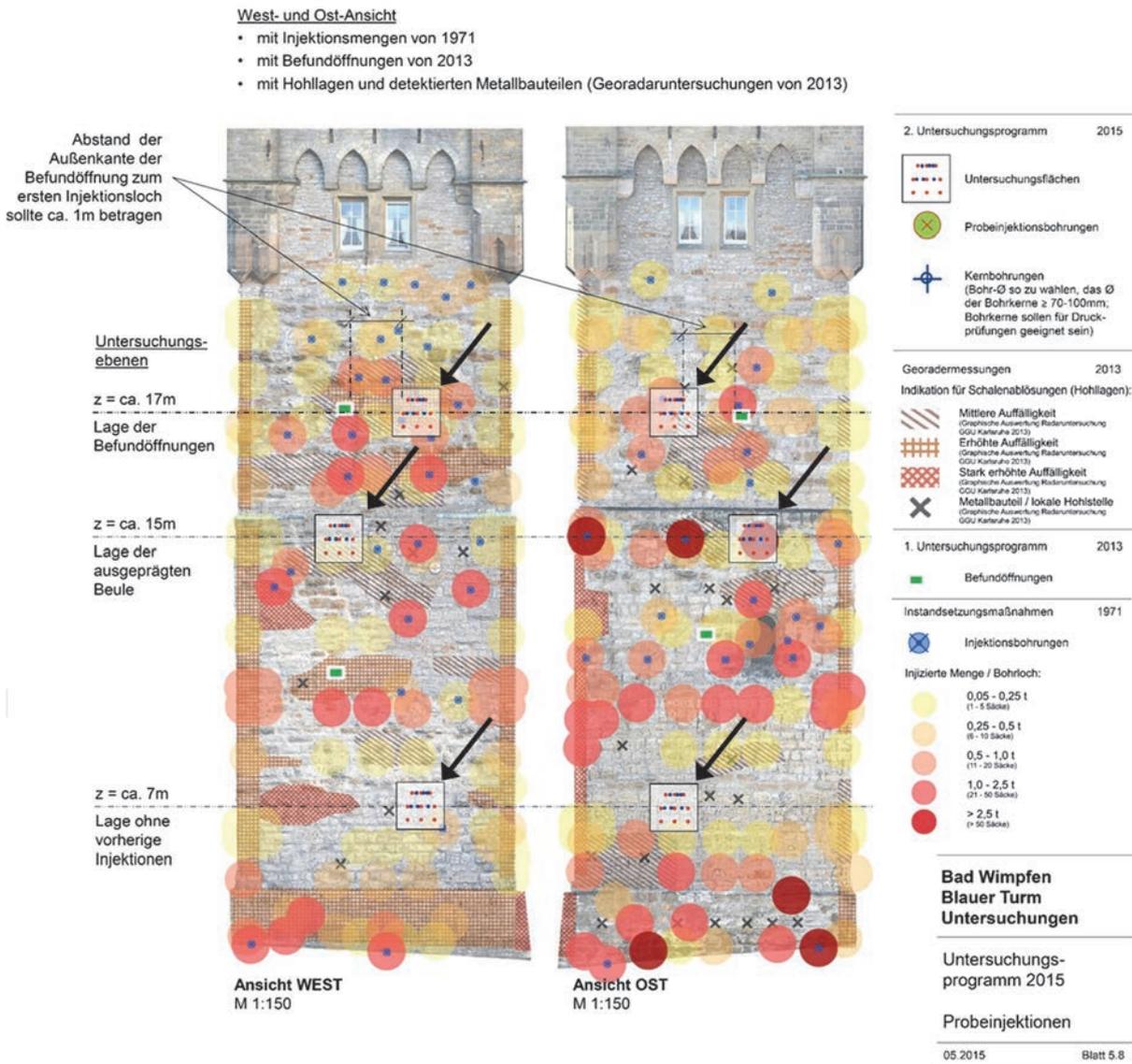


Bild 11 Lage der Musterinjektionsfelder, durch Pfeile markiert (Quelle: Barthel & Maus Beratende Ingenieure GmbH).

Aufgrund der angebrachten Notsicherung des Turmes konnte das Bohrraster der Kernbohrungen allerdings nicht wie geplant (siehe Bild 13) eingehalten, sondern musste entsprechend angepasst werden. An der ersten beprobten Musterfläche wurde nur wenig Injektionsmaterial in den Bohrkernen gefunden. Deshalb wurde das Bohrprogramm an jedem weiteren Musterfeld auf 3 Bohrkerns reduziert und nur in jedem Injektionsfeld die Bohrkerns Nr. 5, 6 und 7 entnommen. Die Lage der tatsächlich entnommenen Bohrkerns ist aus Bild 13 ersichtlich. An den Bohrkerns sollte die erreichte Druckfestigkeit des injizierten Kernmauerwerks ermittelt werden. Es wurde die Druckfestigkeit des Tubag HSTV-p Injektionsmörtels in Anlehnung an DIN EN 1015-11 mit ei-

ner Belastungsgeschwindigkeit von 200 N/s ermittelt. Dazu wurden aus dem Probenmaterial kleine Würfel mit einer Kantenlänge von rd. 20 mm bzw. 30 mm herausgearbeitet und die Lasteinleitungsflächen der Würfel wurden mit Stuckgips abgeglichen. Die Proben des Injektionsmörtels waren zum Zeitpunkt der Prüfung rd. 12 Wochen alt. Im Mittel wurde eine Druckfestigkeit von 39,8 N/mm<sup>2</sup> ermittelt. Zusätzlich wurde an Kernbohrmaterial aus den Injektionsfeldern eine mineralogische Phasenanalyse mit Röntgendiffraktometrie zur mineralogischen Phasenanalyse vorgenommen.

## 6 Versuchsflächen

- ⊗ 9 Injektionsbohrungen (Trockenbohrungen,  $\varnothing = 30\text{mm}$ ,  $L = 1,5\text{m}$ )  
 Injektionsmaterial mit vorab bestimmten w/z-Wert  
 (→ Firma Dyckerhoff GmbH)
- + 7 Kernbohrungen zur Prüfung der Eindringtiefe  
 (Durchmesser der entnommenen Bohrkern  $\geq 70 - 100\text{mm}$ , in Anlehnung an DIN EN 1926)

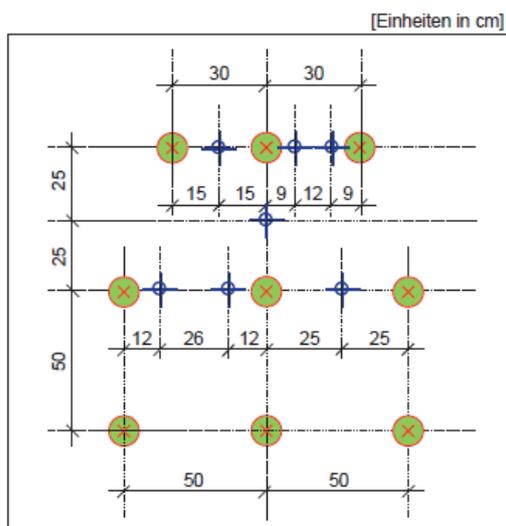


Bild 12 Lage der Injektionsbohrungen und der geplanten Kernbohrungen für jedes Musterfeld (Quelle: Barthel & Maus Beratende Ingenieure GmbH).

Für die nachfolgende Injektionsmaßnahme mit Microdur R-X Feinstzement wurden Vorversuche zur Prüfung des Absetzverhaltens durchgeführt. Von Fa. Dyckerhoff waren in Laborvorversuchen die Frisch- und Festmörteleigenschaften von zwei Rezepturen von Dyckerhoff Microdur R-X mit GroutAid und MSH flüssig sowie Wasser für die Anwendung am Blauen Turm getestet und eingestellt worden. Für die Injektionsversuche am Turm wurde die Rezeptur mit der höheren Druckfestigkeit von rund 6 MPa eingesetzt. In dieser Rezeptur wurden  $328\text{ kg/m}^3$  Microdur RX,

$9,8\text{ kg/m}^3$  MSH flüssig (3%),  $173,8\text{ kg/m}^3$  GroutAid (53%) und  $820\text{ kg/m}^3$  Wasser verwendet. Die weiteren Frisch- und Festmörteleigenschaften sind bereits im Beitrag von Frank Rüssmann in diesem Band berichtet. Im Mittel wurde an den frostfrei vor Ort zur Aushärtung gelagerten Proben eine Druckfestigkeit von  $4,9\text{ N/mm}^2$  und an den Proben, die zum Vergleich im Freien gelagert wurden, eine Druckfestigkeit von  $4,4\text{ N/mm}^2$  ermittelt.

Für die Probeinjektion wurden folgende Geräte von zwei unterschiedlichen Teams eingesetzt:

Team 1: Desoi Rührwerk mit Dissolverscheibe, Schneckenpumpe bis Gerüst, Zwischenbehälter mit Rührwerk, Membranpumpe bis zum Injektionspacker.

Team 2: Kolloidalmischer, Schneckenpumpe bis Gerüst, weitere Schneckenpumpe mit Rührstab im Behälter bis zum Injektionspacker.

Die einzuhaltende Mischreihenfolge ist Wasser + MSH + GroutAid für 30s rühren, danach Zugabe von Mikrodur R-X und mindestens 3 min rühren. Es wurden hoctourige Mischer verwendet, wie sie beispielsweise auch für Bentonitmischungen geeignet sind.

Die jeweils ersten Mischungen der beiden Teams (Fa. Desoi und Fa. August Wolfsholz) wurden mit Marshtrichter und Dichtewaage auf Übereinstimmung mit dem Datenblatt von Fa. Dyckerhoff geprüft. Es konnte eine gute Übereinstimmung mit den Vorgaben für die Marshtrichterdurchlaufzeiten und die Suspensionsdichten erzielt werden. Die Dichte der Mischungen im Kolloidalmischer waren grundsätzlich immer etwas höher (aus dem Protokoll der Injektionsversuche, Fa. Wolfsholz). Aus den ersten, vor Ort ausgehärteten Mischungen wurden würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von rd. 40 mm für die Prüfung der Druckfestigkeit hergestellt.

Die Proben wurden im Alter von 44 Tagen geprüft und wiesen eine deutliche Rissbildung durch Schwinden auf.

## Bohrplan für Bohrkernentnahme – Darstellung der Bohransatzpunkte in den Versuchsfeldern für die Probeinjektionen

Bohrplan (hier beispielhaft in Versuchsfeld F5 eingezeichnet)

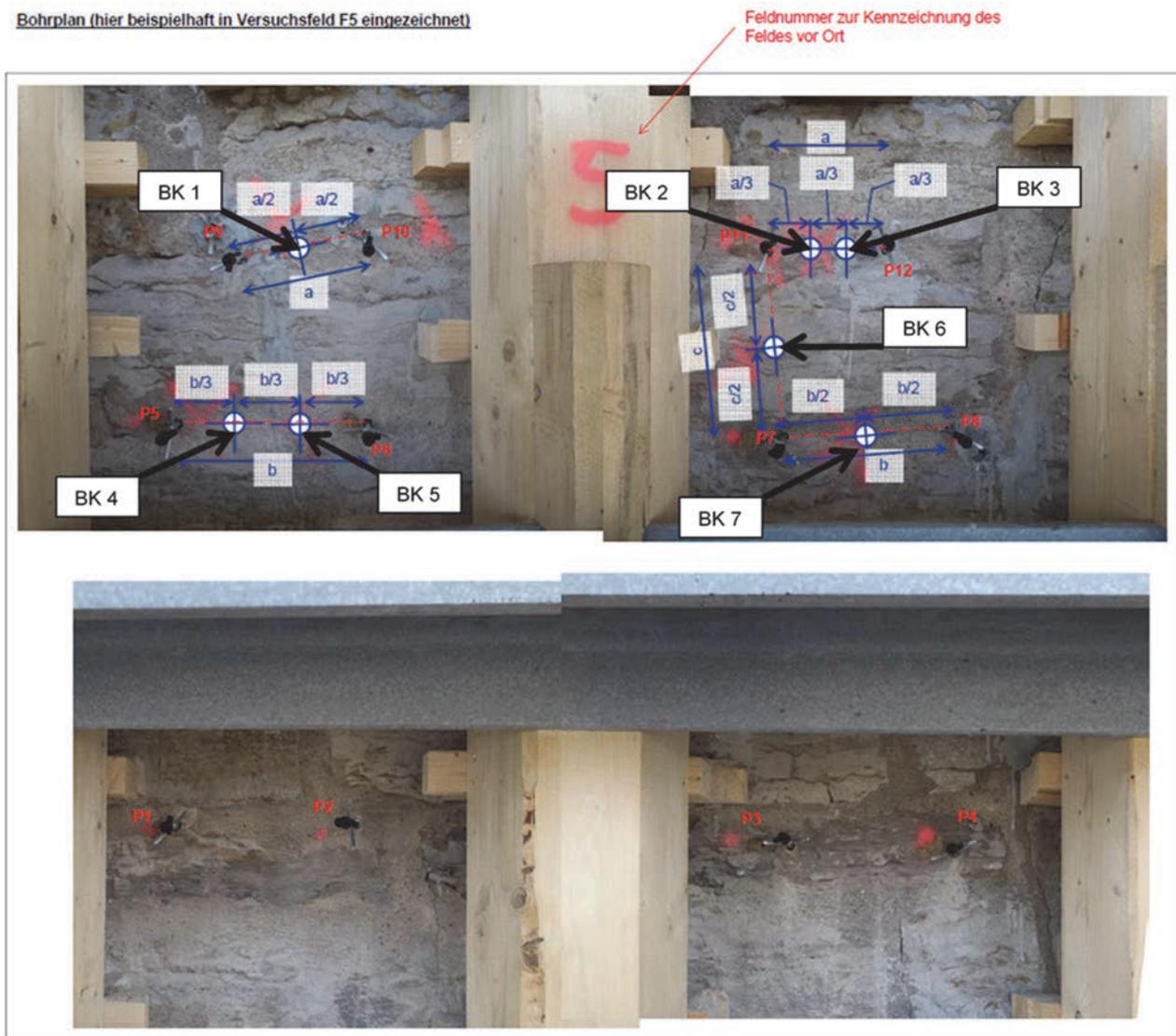


Bild 13 Tatsächliche Lage der Kernbohrungen (BK 1 - BK 7) an einem Musterinjektionsfeldern und Nummerierung der geplanten Bohrungen (Quelle: Barthel &amp; Maus Beratende Ingenieure GmbH).

### 3.2 Kernbohrungen und Erfolgskontrolle

Die Kernbohrungen der Musterinjektionsfelder wurden bis in eine Tiefe von rd. 150 cm bei einem Durchmesser von 100 mm durchgeführt. Das Injektionsmaterial konnte nicht alle vorhandenen Hohlräume erreichen und verfüllen. Das Injektionsmaterial (vorzugsweise der Feinstzement) verfüllte zum Teil Risse, die nur rd. 1 mm breit waren. An einzelnen Bohrstellen wurde der historische Mörtel erfolgreich stabilisiert und alle Hohlräume verfüllt.

An diesen Entnahmestellen wurde kaum ausgewaschener Kies oder kleine Kalksteinbruchstücke gefunden. Das Injektionsgut hat das Konglomerat aus Steinen und historischem Mörtel so weit verfestigt, dass annähernd vollständige Bohrkern im Nassbohrverfahren herausgebohrt werden konnten. Insgesamt wurde in den Bohrkernen aber nur relativ wenig des Injektionsmaterials gefunden. Daraus ist zu schließen, dass es entweder nur noch wenige Hohlräume gab, in die das Injektionsgut eindringen konnte oder dass der Abstand zwischen den Injektionsbohrungen zu groß gewählt war und somit die

Bereiche der Kontrollbohrungen nicht zuverlässig erreichen konnten.

Aus insgesamt 6 Bohrkernen konnten zusammenhängende Proben aus Naturstein, historischem Mörtel und Injektionsmaterial gewonnen werden. Die Anteile an Naturstein, historischem Mörtel und Injektionsmaterial waren großen Schwankungen unterworfen. Diese Streuung spiegelt gut die unterschiedlichen Bereiche des Verfüllmauerwerks wieder. Beispielhaft sind prüffähige Bohrkernabschnitte in Bild 14, Bild 15 und in Bild 16 dargestellt.



Bild 14 Prüffähiger Bereich aus dem Bohrkern 3-5 mit Lage der Prüfkörper, grau = Feinstzementinjektion



Bild 15 Prüffähiger Bereich aus dem Bohrkern 5-6 mit Lage des Prüfkörpers.

Aufgrund der Heterogenität der Mauerwerksprobekörper sind die Streuungen der ermittelten Druckfestigkeiten sehr hoch und betragen zwischen 1,6 N/mm<sup>2</sup> bis 32,3 N/mm<sup>2</sup>. Der Mittelwert der Proben von 10,7 N/mm<sup>2</sup> ist deshalb auch nur wenig aussagefähig.



Bild 16 Prüffähiger Bereich aus dem Bohrkern 5-5.

Bild 18 zeigt beispielhaft die an Bohrkern 3-5 erfolgte Dokumentation und Bohrkernaufnahme in den Mustern

### 3.3 Mineralogische Phasenbestimmung an den ausgehärteten Injektionsmassen

Neben der Untersuchung der festigkeitsverbessernden Eigenschaften wurde die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Altinjektionen von Pieper und des neu eingebrachten Injektionsgutes mit Röntgendiffraktometrie zur Phasenanalyse untersucht. Der Altinjektionsmörtel von 1971 hat einen hohen Portlanditgehalt aufgewiesen. Ettringit, ein das Mauerwerk stark schädigendes Treibmineral, wenn es als Sekundärphase durch Reaktion mit Sulfat im Mauerwerk gebildet wird, ist nur in geringen Mengen nachgewiesen worden. Geringe Ettringitbildung ist bei der Verwendung von Portlandzementklinker in Injektionsmörteln üblich. In allen Proben von 1971 und den aktuellen, erhärteten Injektionsmörteln sind deutliche röntgenamorphe Anteile an CSH-Phasen vorhanden.

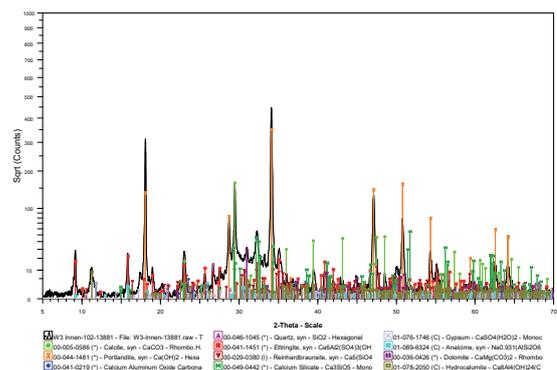


Bild 17 Öffnungsstelle West 3, Tiefe ca. 80 cm, hellgrau, Material von 1971, es ist noch sehr deutlich Portlandit vorhanden, Ettringit ist nachweisbar, hoher Anteil an röntgenamorphen CSH-Phasen. Mineralogisch kein signifikanter Unterschied zu dunkelgrauem Injektionsmörtel.

In Proben des grauen Altinjektionsmörtels kann Analcim, ein Zeolithmineral als Hinweis für die Verwendung von rheinischem Trass im Injektionsmörtel, gefunden werden.

In ihrem Phasenbestand sind deshalb diese Proben dem aktuell verwendeten Tubag-Material vergleichbar (siehe Bild 17 und Bild 19). Der neue Tubag-Injektionsmörtel hat deutlich Portlandit, (röntgenamorphe) CSH-Phasen, sowie Aluminatphasen und primären Ettringit aus der Frühphase der Erhärtung gezeigt.

Turmseite:	Probeinjektion West	Bohrkern Nummer:	3-5
Tiefenlage [cm]	(Tiefe des Bohrloches: 148 cm)		
0-60			
40-108			
92-148			
Tiefenlage [cm]	Bemerkungen		
0-20	Kalkstein mit oberflächenparallelem Riss in rd. 20 cm Tiefe Hier wurde eine Stoß- und Lagerfuge überbohrt Der Torkretmörtel ist hier bis zu einer Tiefe von rd. 10 - 15 cm in die Lagerfuge eingebracht worden		
20-45	Größeres Kalksteinstück mit anhaftendem historischem Lagerfugenmörtel Das Injektionsmaterial (Dyckerhoff) ist hier gut in die Hohlräume im Lagerfugenmörtel und zwischen dem Kalkstein und dem Lagerfugenmörtel eingedrungen und hat das Material gut stabilisiert. Es hat sich eine wabenähnliche Struktur aus Injektionsmaterial im historischen Mörtel gebildet Im Injektionsmaterial sind rel. viele Hohlräume sichtbar (eingeschlossene Luft beim Injektionsvorgang)		
45-55	2 größere Stücke historischer Mörtel, der durch Injektionsmaterial partiell umhüllt und gefestigt wurde		
55-92	Größeres Stück Dolomit am Dolomit haftet ein Kalkstein durch Mörtel an an den Grenzflächen zwischen dem Dolomit bzw. dem Kalkstein und dem historischen Mörtel ist Injektionsmaterial (Dyckerhoff) eingedrungen und hat den historischen Mörtel jeweils an den Gesteinen verklebt die historische Mörtelschicht weist in diesem Bereich eine Dicke bis zu 2 cm auf am Dolomit selbst wurden größere Risse partiell vom Injektionsgut verfüllt		
92-105	größeres Kalksteinstück mit viel Injektionsmaterial (tubag und Dyckerhoff) größere Menge an historischem Mörtel haftet an dem Injektionsmaterial		
105-125	mehrere große Stücke Injektionsmaterial (Dyckerhoff) ohne anhaftenden Kalkstein oder historischen Mörtel aus historischem Mörtel ausgewaschener Kies ohne anhaftendes Bindemittel größere Kalksteinbruchstücke, teilweise mit anhaftendem Injektionsgut kleinere, durch Injektionsgut (Dyckerhoff) stabilisierte Stücke historischen Mörtels		
125-148	2 größere Kalksteinbruchstücke, an einem Bruchstück etwas anhaftendes Injektionsgut (Dyckerhoff)		

Bild 18 Bohrkern 3-5 aus der Musterinjektionsfläche 3 (Westseite mittig)

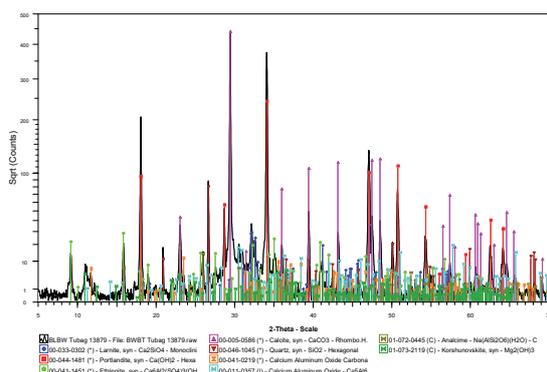


Bild 19 Tubag-Injektionsmörtels mit Portlandit, Kalzit, röntgenamorphen Phasen, Kalziumaluminathydraten, Trassmineralen (Analcim) und Ettringit

Der niedrige Gehalt an gebildetem Portlandit ist charakteristisch für Microdur R-X und erklärt sich aus seinem hohen Anteil an Hüttsand (Bild 20).

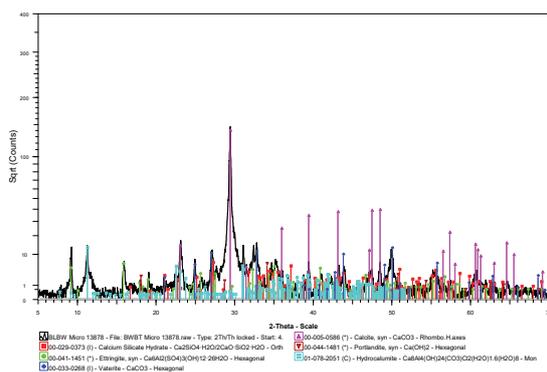


Bild 20 Phasenauswertung von Microdur R-X mit wenig Kalzit und praktisch kaum Portlandit, deutliche Anteile röntgenamorpher Phasen und etwas Ettringit

Das zur Anregung von latent hydraulischem Hüttsand notwendige Kalziumhydroxid wird während der Aushärtung und Bildung der CSH-Phasen weitgehend verbraucht.

## 4 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Öffnungsstellen in der Turmaußen- und Innenschale konnte eine gleichbleibende, handwerkliche Qualität hinsichtlich der ursprünglichen Ausführung festgestellt werden. Im Innenbereich des Turmes sind die Steine an der Oberfläche der Öffnungsstellen teilweise stark durch Brandeinwirkungen geschädigt (rötlich-braune Verfärbungen und Rissbildung). In allen Öffnungsstellen wurde ein Verfüllmauerwerk aus »opus spicatum« angetroffen.

Grundsätzlich weist das Verfüllmauerwerk an den Öffnungsstellen nur wenige sichtbare Hohlräume auf. Die Steine sind mit historischem Kalkmörtel bzw. Injektionsmörtel umhüllt.

Der historische Mörtel an der Westseite ist deutlich stärker durchfeuchtet als an der Ostseite. Dies ist, wie sich erst deutlich später herausgestellt hat, auf eine Leckage der Turmentwässerung zurück zu führen. Die Schadensstelle ist seit ca. 1985/86 existent. Die Qualität von Lagerfugen- und Verfüllmörtel der Innenseite ist mit den Mörteln der Außenschale vergleichbar. Der historische Lagerfugenmörtel enthält deutlich sichtbare Kalkspatzen. Analog zu den Öffnungsstellen an der Außenschale hat auch der Verfüllmörtel an der Innenschale ein deutlich größeres Größtkorn als der Lagerfugenmörtel.

In einzelnen Bohrstellen wurde durch die zweistufige Injektionsmaßnahme mit dem gröberen Injektionsmörtel und dem Feinstzement der historische Mörtel erfolgreich stabilisiert und Hohlräume verfüllt, so dass an diesen Stellen kaum ausgewaschener Kies oder kleine, lose Kalksteinbruchstücke bei der Bohrung gefunden wurden. Das Injektionsgut hat das Konglomerat aus Steinen und historischem Mörtel an diesen Stellen so verfestigt, dass annähernd vollständige Bohrkerns herausgebohrt werden konnten (Nassbohren!). Das Injektionsmaterial (vorzugsweise der Feinstzement) verfüllte zum Teil Risse, die nur rd. 1 mm breit waren.

Insgesamt wurde an den Entnahmestellen aber nur relativ wenig neues Injektionsmaterial gefunden und es wurden auch nicht alle vorhandenen Hohlräume im Bereich der Injektionsbohrungen vollständig und zuverlässig verfüllt. Daraus lässt sich ableiten, dass der gewählte Injektionsbohrlochabstand zu groß gewählt wurde und somit die Bereiche der Kontrollbohrungen nicht zuverlässig erreichen konnte.

Grundsätzlich ist es mit diesem Verfahren möglich, die noch vorhandenen Hohlräume zu verfüllen und das Verfüllmauerwerk zu stabilisieren. Eine strukturelle Verfestigung des historischen Mörtels ist jedoch nicht möglich.

Aufgrund der Heterogenität der erhaltenen Probekörper sind die Streuungen der ermittelten Druckfestigkeiten sehr hoch (1,6 N/mm<sup>2</sup> bis 32,3 N/mm<sup>2</sup>). Der Mittelwert der Proben von 10,7 N/mm<sup>2</sup> ist somit nur wenig aussagefähig. Für die Druckfestigkeiten der prüffähigen Proben aus den Bohrkernen ergibt sich ein 5%-Quantilenwert von 1,8 N/mm<sup>2</sup>.

Dieser Wert gilt für das verfestigte Verfüllmauerwerk nur unter der Voraussetzung, dass die Verfestigung

des Verfüllmauerwerks mit den hier geprüften Materialien und der in den Musterinjektionsfeldern durchgeführten Methodik ausgeführt wird.

## **Autor**

Dr. Friedrich Grüner  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685-66750  
E-Mail: [Friedrich.Gruener@mpa.uni-stuttgart.de](mailto:Friedrich.Gruener@mpa.uni-stuttgart.de)

# Klebeversuche am Muschelkalkstein

## Ergebnisse von Rissinjektionen im Labor und an Musterflächen vor Ort

*Hans Ettl*

**Abstract:** Die Werksteine der Außenschale weisen Risse auf, die kraftschlüssig verfüllt werden sollen, um wieder eine Kraftableitung über diesen Mauerwerksteil zu erreichen. Mit keinem der drei ausgewählten Verpressmaterialien – Steinsilikatkleber, Feinstzement, Epoxidharz – konnten die Risse geschlossen werden. Eine Ertüchtigung der äußeren Mauerwerksschale ist auf diesem Weg nicht möglich.

**Keywords:** Rissverpressung, Steinsilikatkleber, Feinstzement, Epoxidharz, Kraftableitung

### 1 Einleitung

Die kalkgebundenen Werksteine der Außenschale des Blauen Turms weisen oberflächenparallele Risse in unterschiedlichen Tiefen auf. Durch Füllung bzw. Verklebung dieser Risse soll wieder eine kraftschlüssige Verbindung der gerissenen Werksteine hergestellt werden. Dadurch kann eine Kraftableitung über diesen Mauerwerksteil erreicht und das Turminnere statisch entlastet werden.

### 2 Klebematerialien

Für die Klebeversuche an den Werksteinen des Blauen Turms wurden in einer Vorauswahl verschiedene Bindemittel organischer und anorganischer Natur diskutiert und bewertet. Letztlich wurden folgende Gesteinskleber verwendet:

- Steinsilikatkleber
- Feinstzement (Fa. Dyckerhoff)
- Epoxidharze (Fa. WEBAC)

Der **Steinsilikatkleber** ist ein rein mineralischer Kleber und besteht aus einer Mischung aus Kieselsäureester, wie er für die Steinfestigung verwendet wird, und aus gelöschtem Kalk ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), der nach dem Erhärten wie ein hydraulischer Kalk Calciumsilikathydrate ausbildet. Er wird seit über 10 Jahren erfolgreich in der Baudenkmalpflege eingesetzt.

Der verwendete **Feinstzement** ist das Produkt MIKRODUR RX der Fa. Dyckerhoff (Hauptkomponenten: Hüttensand und Portlandzementklinker) und wird mit dem Verflüssiger MSH Flüssig durch hoctouriges Dispergieren zu einer verpressfähigen Zementsuspension aufgeschlossen. Das Größtkorn ( $d_{95}$ ) ist kleiner als  $20\ \mu\text{m}$  und daher ist die Suspension in der Lage, in feinste Risse einzudringen.

Die vier verwendeten Epoxidharze der Fa. WEBAC (Injektionsharz 4120, 4180N, 4180-lv1, VP37-S14s) weisen die für die vorgesehene Verwendung günstigen Eigenschaften wie niedrige Viskosität, plastisches Verhalten und langsame Erhärtung auf. Die Haftzugfestigkeiten liegen bei allen vier Produkten lt. Techn. Merkblättern im günstigen Bereich größer als  $2,5\ \text{N}/\text{mm}^2$ .

### 3 Laborversuche

Vor dem Einsatz an Musterflächen wurden die verschiedenen Klebematerialien in Laborversuchen auf Eignung untersucht.

#### 3.1 Vorauswahl der Kleber durch Haftzugversuche

Bei allen drei Klebern wurde als wichtigster Kennwert in einem ersten Schritt die Haftzugfestigkeit auf Original- und vergleichbarem Ersatzmaterial

(Muschelkalk aus dem Bereich Vaihingen/Enz) geprüft. Dazu wurden aus quadratischen Scheiben mit 4 cm Kantenlänge und 1 cm Dicke bzw. aus runden Scheiben mit 5 cm Durchmesser »Sandwich«-Körper für die Haftzugmessung hergestellt (Bild 1).



Bild 1 Prüfkörper für die Messung der Haftzugfestigkeit

### 3.1.1 Stein-Silikat-Kleber

Die Klebungen wurden auf beiden am Blauen Turm auftretenden Gesteinsarten – Muschelkalk und Dolomitkalk - mit unterschiedlichen Stein-Silikat-Klebern durchgeführt:

KSE 300, mit und ohne Haftvermittler, in flüssiger und pastöser Konsistenz

KSE 500 E in flüssiger und pastöser Konsistenz

KSE 500 STE in flüssiger und pastöser Konsistenz

Bei KSE 300 flüssig liegen die Haftwerte, sei es mit und ohne Haftvermittler, bei beiden Gesteinsarten bei sehr geringen Werten  $< 0,001 \text{ N/mm}^2$ . Teilweise löst sich die Klebung bereits bei der Ankoppelung der Haftzugmesseinrichtung.

Sowohl mit KSE 300 pastös als auch mit KSE 500 E und KSE 500 STE, jeweils pastös oder flüssig, werden deutlich höhere Haftzugwerte zwischen ca. 0,1 und  $0,2 \text{ N/mm}^2$  erreicht, aber insgesamt betrachtet liegen die Werte des Stein-Silikat-Klebers auf Kalk- bzw. Dolomitgestein für den vorgesehenen Anwendungszweck zu niedrig. (Die Zugfestigkeit bei Sandsteinklebung z.B. Buntsandstein, beträgt im Mittel  $1,6 \text{ N/mm}^2$ ). Damit scheidet diese Kleberart für den Einsatz zur Stabilisierung der äußeren Mauerwerksschale des Blauen Turms aus.

### 3.1.2 Feinstzement

Die Zementsuspension wurde mit 600g MIKRODUR RX, 400g Wasser und 20g Verflüssiger MSH Flüssig entsprechend den Mischvorschriften angesetzt. Die Haftzugwerte am Ersatzgestein liegen im Mittel bei  $0,16 \text{ N/mm}^2$  (3 Prüfkörper).

Für die Verfestigung des in manchen Bereichen lockeren Mörtels im Turminneren wurden Versuche mit einer dem Mörtel nachgestellten Sieblinie durchgeführt. Dazu wurde der Zuschlag in dafür hergestellten Trögen mit Feinstzement - Kleber über seitlich gebohrte Löcher verpresst, nach Erhärtung in Scheiben gesägt und das Ergebnis visuell beurteilt (Bild 2). Es zeigt sich, dass das Sand-Kies-Gemisch nur bereichsweise verfestigt werden konnte.



Bild 2 Wannenscheibe mit Feinstzement-Verpressung: Es konnte nur ein Teil des Zuschlaggemisches verfestigt werden, das lockere Material im unteren Bereich wurde beim Sägen ausgespült

### 3.1.3 Epoxidharz

Für die Untersuchungen wurden vier verschiedene Epoxidharztypen der Fa. WEBAC ausgewählt:

WEBAC 4120	Mischungsverhältnis 3:1 VT
WEBAC VP37-S14s	Mischungsverhältnis 2:1 VT
WEBAC 4180N	Mischungsverhältnis 2:1 VT
WEBAC 4180LV	Mischungsverhältnis 1:1 VT

Um die Anzahl der auf Biegezugfestigkeit zu prüfenden Prismen zu reduzieren, wurde vorab die grundsätzliche Eignung der Harze über die Ermittlung der Haftzugfestigkeit an quadratischen Würfelscheiben mit 5 cm Kantenlänge (Original- und Ersatzgestein) im Labor überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Harze 4180N und 4180LV aufgrund zu geringer bzw. zu stark schwankender Haftzugfestigkeiten als nicht geeignet auszusondern waren.

Dagegen wiesen die Harze 4120 und VP37-S14s mit ca.  $3,7 \text{ N/mm}^2$  (teilweise noch höhere Werte) hohe Zugfestigkeitswerte auf (Tab. 1) und wurden für die weiteren Untersuchungen benutzt.

Tabelle 1 Haftzugfestigkeit der beiden ausgewählten EP-Harze

Gestein	EP-Harz	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bemerkungen
Ersatz- und Originalgestein	WEBAC 4120	2,23; 3,36; >3,74; >4,75; >4,73	Abriss im Harz (50 bzw. 20%) und Abriss im Stein; in 3 Fällen obere Leistungsgrenze der Haftzuggerätes erreicht
Ersatz- und Originalgestein	WEBAC VP37-S14s	3,43; 1,87; >3,74; >4,71; >4,71	Abriss im Harz (20%) und Abriss im Stein (100%); in 3 Fällen obere Leistungsgrenze der Haftzuggerätes erreicht

### 3.2 Biegezugversuche

Für die Festlegung des zu verwendenden Epoxidharzes wurde die Biegezugfestigkeit am Ersatzmaterial – Muschelkalk aus Vaihingen/Enz – an Prismen mit den Maßen 20 x 5 x 5 cm bestimmt.

Dazu wurde in einem ersten Schritt die Biegezugfestigkeit der intakten Muschelkalkprismen an der MPA Stuttgart ermittelt. Das intakte Gestein der 1. Charge weist einen Mittelwert 16,2 N/mm<sup>2</sup> (Tab.2) auf, das der 2. Charge einen Mittelwert von 13,4 N/mm<sup>2</sup> (Tab 3).

Im zweiten Schritt wurden die Prismen mit den beiden Epoxidharzen geklebt und nach der erforderlichen Reaktionszeit des Harzes erneut auf Biegezugfestigkeit belastet. Es wurden Mittelwerte von 13,1 N/mm<sup>2</sup> mit dem Harz EP 4120 (Tab. 2) bzw. 15,6 N/mm<sup>2</sup> mit dem Harz EP VP37-S14s (Tab. 3) erreicht. Die geklebten Prismen liegen damit im Festigkeitsbereich des intakten Gesteins, die Harze können für die Injektion der Risse verwendet werden. Einen Eindruck der geklebten und geprüften Prismen vermittelt Bild 3.

Tabelle 2 Biegezugfestigkeit der intakten und mit EP 4120 geklebten Prismen

Prüfkörpernr.	Biegezugfestigkeit intakt [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegezugfestigkeit geklebt [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchbild
A1	16,6	13,6	Stein bei Fuge
A2	18,1	15,1	Stein bei Fuge
A3	15,7	13,1	Stein bei Fuge
A4	18,2	8,3	Stein bei Fuge
B6	12,2	15,5	Stein neben Fuge
Mittelwert	16,2	13,1	

Tabelle 3 Biegezugfestigkeit der intakten und mit EP VP37-S14s geklebten Prismen

Prüfkörpernr.	Biegezugfestigkeit intakt [N/mm <sup>2</sup> ]	Biegezugfestigkeit geklebt [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchbild
B1	13,5	16,7	Stein neben Fuge
B2	13,7	14,1	Stein bei Fuge
B3	13,0	15,8	Stein bei Fuge
B4	13,6	15,0	Stein bei Fuge
B5	13,1	16,5	Stein neben Fuge
Mittelwert	13,4	15,6	



Bild 3 Geklebte Prüfkörper nach der Messung der Biegezugfestigkeit

### 3.3 Bewertung der Ergebnisse der Laborversuche

Die Anwendung des Stein-Silikat-Klebers hat nur zu sehr geringen Haftzugwerten geführt und wurde demzufolge an den Musterflächen vor Ort nicht eingesetzt. Auch die Werte des Feinstzementes MIKRODUR blieben mit Haftzugfestigkeiten von max. ca.  $0,2 \text{ N/mm}^2$  hinter den Erwartungen zurück. Dagegen weisen zwei der vier untersuchten Epoxidharztypen mit Haftzug- bzw. Biegezugwerten von ca.  $3,7 \text{ N/mm}^2$  bzw. 13 bis  $16 \text{ N/mm}^2$  Werte im Bereich der natürlichen Gesteinsfestigkeit auf. Für das Anlegen der Musterflächen wurden der Feinstzement und das Epoxidharz mit den höchsten Biegezugfestigkeitswerten verwendet.

## 4 Anlage von Arbeitsmustern am Blauen Turm

Mit Hilfe der Arbeitsmuster sollte die Möglichkeit der Verfüllung/Verpressung von oberflächenparallelen Rissen in den Werksteinen der äußeren Mauerwerksschale erprobt werden.

### 4.1 Vorbereitende Arbeiten

Am 20.04.2016 wurden auf der Nord- und Südseite des Turms in Höhe der 3. Gerüstlage 10 bzw. 8 Bohrungen mit 8 mm Durchmesser an Werksteinen aufgebracht, die bei der Georadar-Untersuchung der MPA Stuttgart im März 2016 oberflächenparallele Rissbildungen in Tiefen zwischen 10 und 50 cm erkennen ließen. Gebohrt wurde jeweils 2–3 cm über die im Plan angegebene Tiefe des jeweiligen Risses.

### 4.2 Rissverpressung mit Mikrozement

Trotz der relativen niedrigen Haftzugwerte bei den Laborversuchen (ca.  $0,2 \text{ N/mm}^2$ ) wurde der Feinstzement an Musterflächen für die Rissinjektion getestet und folgende Rezeptur verwendet:

- 3 kg Mikrodur RX (Fa. Dyckerhoff GmbH)
- 2 kg Wasser (W/Z-Wert: 0,75)
- 100 g Verflüssiger MSH

Bei der Verfüllung des Materials mit einer Handspritze zeigte sich, dass bei insgesamt 10 Bohrungen auf der Nord- und Südseite des Turms lediglich in eine Bohrung ca. 180 ml Zementmischung eingebracht werden konnte.

### 4.3 Rissverpressung mit Reaktionsharz

Für die Rissverpressung mit Reaktionsharz wurde folgende Rezeptur verwendet:

- 300g VP37-S14 Komp.A (Fa. Webac-Chemie)
- 150g VP37-S14 Komp.B (Fa. Webac-Chemie)

Insgesamt wurde bei 9 Bohrungen auf der Nord- und Südseite versucht, über eine Handpumpe mit Druckanzeige und mit ca. 500 ml Fassungsvermögen Harz in die Risse einzubringen.

Im Gegensatz zum Feinstzement ließ sich bei allen Bohrungen Harz einpressen, überwiegend aber nur geringe Mengen zwischen 7 und 13 ml, wobei der Druck von 25 – 65 bar bestehen blieb. Lediglich bei einer Bohrung konnte in zwei Arbeitsgängen insgesamt ca. 130 ml Harz verpresst werden, wobei der Druck immer wieder abfiel.

## 5 Überprüfung der Arbeitsmuster

Am 28.04.2016 wurde das Eindringverhalten bzw. die Verteilung der Verpressmaterialien im Stein mittels Kernbohrungen überprüft. Dazu wurden von der Fa. Jäger teilweise mittig auf dem Injektionskanal, teilweise exzentrisch dazu liegend jeweils ca. 5 cm dicke Bohrkerne entnommen. Die Bohrtiefe orientierte sich an der jeweiligen detektierten Tiefenlage des oberflächenparallelen Risses. Um Unsicherheiten bezüglich dieser Tiefenlage zu umgehen, wurden die Bohrungen ca. 5 cm tiefer durchgeführt.

## 5.1 Rissverpressung mit Mikrozement

Von den insgesamt 6 Bohrkernentnahmen auf der Nord- und Südseite werden zwei beispielhaft dargestellt.

### Bohrung N1

Mit dem Georadar wurde ein Riss in ca. 20 cm Tiefe detektiert; die Bohrkernlänge beträgt 44 cm, die Risse befinden sich in 2-3 und ca. 23 cm Tiefe. Wie in Bild 4 erkennbar, wurde nur der Bohrkern mit Zement verfüllt, in den beiden Rissebenen befindet sich kein Zement.



Bild 4 Bohrung N1; in der Mitte des gebrochenen Bohrkernabschnittes ist der mit Mikrozement gefüllte Bohrkern zu erkennen

Dieser Befund – Bohrkern verfüllt, aber kein Material in der Rissebene - wiederholt sich mit einer Ausnahme an allen entnommenen Bohrkernen. Lediglich die Bohrung S8, bei der nennenswerte Mengen an Zementsuspension eingebracht werden konnten, bietet ein anderes Bild.

### Bohrung S8

Der Riss wurde mit Hilfe des Georadars in ca. 10 cm Tiefe detektiert. In zwei Durchgängen wurden ca. 180 ml Zementmischung eingebracht. Sowohl im Bohrkern als auch im oberflächenparallel verlaufenden Riss in ca. 8,5 cm Tiefe befindet sich Verpressmörtel (Bild 5 und 6).



Bild 5 Bohrung S8; in der ca. 8,5 cm tief liegenden Rissebene wie auch im Bohrkern befindet sich Verpressmörtel



Bild 6 Bohrung S8; Blick auf die Rissebene mit anhaftendem Verpressmörtel, der auch im Bohrkern erkennbar ist

## 5.2 Rissverpressung mit Epoxidharz

Die Rissverpressung mit Epoxidharz liefert ähnliche Ergebnisse wie die Versuche mit Feinstzement, die Risse wurden nicht oder nur sehr unvollständig vom Harz erreicht. Als Beispiel werden die Bohrungen N8a und N8b auf der Nordseite des Turms dargestellt.

### Bohrung N8a

Der Riss wurde mittels Georadar in 15 cm Tiefe detektiert; die Bohrung liegt direkt neben dem Bohrkern, die Bohrkernlänge beträgt 40 cm. Die Rissebene befindet sich in ca. 12 cm Tiefe, es wurde kein Harz gefunden (Bild 7).

### Bohrung N8b

Auch hier wurde die Risttiefe in 15 cm Tiefe detektiert. Die Bohrung liegt direkt auf dem Bohrkanal, der Bohrkern ist 40 cm lang; die Rissebene liegt ebenfalls in ca. 12 cm Tiefe. Der Riss ist unverfüllt, lediglich im Bohrkanal befindet sich Harz (Bild 7).



Bild 7 Bohrung N8a und N8b, unterer Bohrkern N8a: Rissebene in ca. 12 cm Tiefe, kein Harz in der Rissebene, nur im Bohrkanal

## Autor

Dr. Hans Ettl  
 Labor Dr. Ettl / Dr. Schuh  
 Imhofstraße 3  
 8085 München  
 Tel.: +49 89 362 597  
 E-Mail: ettl-schuh@t-online.de

## 6 Bewertung der Ergebnisse

Die Verpressversuche haben weder mit Mikrozeement noch mit Epoxidharz zufriedenstellende Ergebnisse erbracht. In den meisten Fällen wurde nur der Bohrkanal verfüllt. Wenn Harz in die Rissebene eingedrungen ist, besteht keine kraftschlüssige Verbindung.

Als Ursache für das schlechte Eindringverhalten bzw. die ungenügende Verteilung der Verpressmaterialien im Stein wird vermutet, dass die Risse nicht oder nur in ungenügender Weise zugänglich gewesen sind. So befinden sich u. U. Reste des Bohrmehls in den Spalten der zu verfüllenden Rissflächen und erschweren bzw. verhindern das Eindringen des Mörtels bzw. des Harzes.

Im Rahmen eines weiteren Ortstermins am 30.05.2016 wurde der anfallende Bohrstaub in den Bohrlöchern zur besseren Vorbereitung gezielt und kontinuierlich abgesaugt. Nach Fertigstellung wurden die Bohrkanäle zusätzlich mit Druckluft ausgeblasen und anschließend mit Aceton gespült. Trotz dieser vorbereitenden Arbeiten konnte letztlich kein besseres Eindringverhalten des Harzes in die feinen Risse des Gesteins erreicht werden.

Somit ist die Ertüchtigung der äußeren Mauerwerksschale, damit sie als kraftableitendes Bauteil zur Stabilisierung des Turmes beitragen kann, auf diesem Weg nicht möglich.

# Konservierung von oberflächennahen Schädigungen an Werksteinen am Blauen Turm in Bad Wimpfen

Karl Fiedler

**Abstract:** Für die Konservierung der zerklüfteten Werksteinoberflächen an der Fassade des Blauen Turms in Bad Wimpfen ist unter anderem eine Sicherung der oberflächennahen, erodierten Steinzonen notwendig. Zu diesem Zweck sollten unterschiedliche Schlämm-Rezepturen für Muschelkalk und Dolomitkalk entwickelt und sowohl an Probekörpern als auch an der Fassade erprobt werden.

**Keywords:** Steinkonservierung, Steinschlämmen, konservierende Schlämmung, Konservierung, Muschelkalk, Kalkstein

## 1 Objektbeschreibung

Wie bei allen historischen Gebäuden ist die durch Materialwahl, Bearbeitung und Farbgebung der Oberflächen bestimmte »Haut« des Blauen Turms ein wesentlicher Bestandteil des historischen Dokuments und auch des Erscheinungsbilds. Gemessen an den zu gravierenden statischen und strukturellen Problemen führenden tief reichenden Schäden am Blauen Turm treten die oberflächennahen Schädigungen an den bearbeiteten Oberflächen fast in den Hintergrund. Dennoch sind für den Erhalt des historischen Dokuments konservierende Maßnahmen notwendig.

### 1.1 Kurzbeschreibung Bestand

Neben den im unteren mittelalterlichen Turmbebereich hauptsächlich in den Mauerflächen verbauten Quadern aus Muschelkalk und Dolomit fanden in einigen Detailbereichen wie an den Fenstergewänden der Ostfassade und am Erker an der Südfassade auch Werkstücke aus rötlich-grauem Heilbronner Sandstein Verwendung.



Bild 1 Mauerfläche mit Quadern aus Muschelkalk und Dolomitkalk mit modernem, rötlich-grauem und grauem Fugenmörtel (Spritzverfugung)

Der heute hauptsächlich sichtbare Fugenmörtel ist das Resultat der Spritzverfugung der letzten großen Instandsetzung des Turmes. Das rötlich-graue, hydraulisch gebundene Material reicht weit in die Quaderoberfläche hinein. Vereinzelt sind jüngere Reparaturen aus grauem, ebenfalls hydraulisch gebundenem Mörtel erkennbar. Unter diesen Mörtelschichten sind in vereinzelt Ausbrüchen helle kalkgebundene Mörtel zu erkennen.



Bild 2 Erker Südfassade aus Sandstein – Wappenrelief an Bedachung

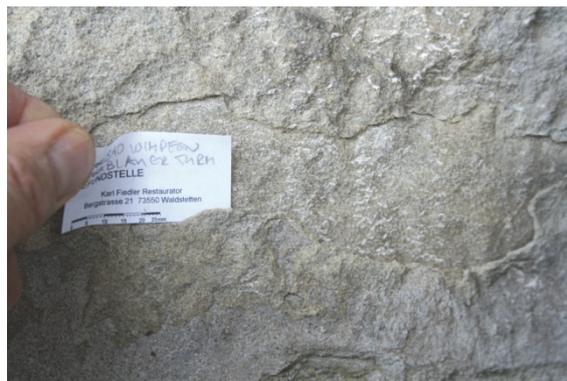


Bild 4 Sandsteinwerkstück am Erker Südfassade mit Schalenbildung

## 1.2 Kurzbeschreibung Zustand

Neben den Rissen und Schalenbildung in mehreren Zentimetern Tiefe zeigen die **Mauerquader aus Kalkstein** in der oberflächennahen Steinzone in vielen Bereichen eine sehr kleinteilige Schädigung. Ein feines Rissnetz mit bröckeligem Zerfall und die Bildung von dünnen, zum Teil mehrfach übereinander liegenden Ablösungen und Schuppen haben zu mehreren Millimeter tiefen Zerklüftungen mit zahlreichen kleineren Ausbrüchen geführt. An einigen wenigen Stellen reichen die Zerklüftungen in mehrere Zentimeter Tiefe.



Bild 3 Kalksteinwerkstück mit tiefer reichenden Zerklüftungen

An den **Werkstücken aus Sandstein** haben sich dunkle Schmutzkrusten und Flechtenbewuchs gebildet. Zum Teil sind sie durch oberflächennahe dünne Schalen und Schuppen geschädigt. An einigen Stellen sind hierdurch auch bereits tiefer reichende Verluste mit weiterhin gefährdeter Oberfläche in der Fehlstelle entstanden. An einzelnen Werkstücken zeigen sich Risse und Abspaltungen.



Bild 5 Sandsteinwerkstück am Fenstergewände mit tiefer reichender Rückwitterung

## 2 Planung, Entwicklung und Erprobung

Für die Konservierung der zerklüfteten Werksteinoberflächen an der Fassade des Blauen Turms ist unter anderem die Sicherung der oberflächennahen Ausbrüche und Risse notwendig.

Zu diesem Zweck sollten unterschiedliche Schlämmrezepturen für Muschelkalk und Dolomit entwickelt und sowohl an Probekörpern als auch an der Fassade vor Ort erprobt und abschließend durch naturwissenschaftliche Analysen überprüft werden<sup>1</sup>. Die für die Labor-Versuche benötigten Probekörper aus in eine Größe von ca. 26 × 11 × 5 cm geschnittenen Muschelkalk-Werkstücken wurden von der MPA Stuttgart zur Verfügung gestellt.

<sup>1</sup> Die Untersuchungen der Probekörper und Arbeitsproben vor Ort werden im Artikel von Dr. Friedrich Grüner, MPA beschrieben.

Tabelle 1 Varianten der zu applizierenden Probmassen

Material	Ersatzmasse	Ersatzmasse	Ersatzmasse
Muschelkalk	Syton X 30 (pH 9,5)	Ludox HSA (pH 5)	MPA Weimar
Nachfestigung	KSE 300 E	KSE 300 E	KSE 300 E
Nachfestigung	KSE 300 HV	KSE 300 HV	KSE 300 HV
Nachfestigung	ohne	ohne	ohne
Dolomit	Syton X 30	Ludox HSA	MPA Weimar
Nachfestigung	KSE 300 E	KSE 300 E	KSE 300 E
Nachfestigung	KSE 300 HV	KSE 300 HV	KSE 300 HV
<b>Nachfestigung</b>	<b>ohne</b>	<b>ohne</b>	<b>ohne</b>

Tabelle 2 Rezepturen kieselgel-gebundene Kitt /Schlamm-Masse für Kalkstein Bad Wimpfen

Muschelkalk Kalkstein Rezeptur 01	Füllstoff-Bestandteil	Anteile in Gramm
Kalksteinmehl Grau	Fa. Schön und Hippelein, Satteldorf	1000 g
Quarzmehl Dorsilit 2500	Fa. Dorfner	1000 g
Quarzsand Dorsilit F6 9H	Fa. Dorfner	0 g
Marmormehl Prugna, braunrot, 0-0,6 mm	Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.59201	0
Schiefermehl, grau-grün	Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.40920	0
<b>Ocker JTCLES</b>	<b>Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.40010</b>	<b>0</b>

Muschelkalk Kalkstein Rezeptur 02	Füllstoff-Bestandteil	Anteile in Gramm
Kalksteinmehl Grau	Fa. Schön und Hippelein, Satteldorf	1000 g
Quarzmehl Dorsilit 2500	Fa. Dorfner	500 g
Quarzsand Dorsilit F6 9H	Fa. Dorfner	500 g
Marmormehl Prugna, braunrot, 0-0,6 mm	Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.59201	0
Schiefermehl, grau-grün	Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.40920	0
<b>Ocker JTCLES</b>	<b>Fa. Kremer Aichstetten Best.Nr.40010</b>	<b>0</b>



Bild 6 Probekörper aus Muschelkalk

Die Vorauswahl der Schlamm-Rezepturen erfolgte auf der Basis von bereits an anderen Objekten erprobten<sup>3</sup> und überprüften Rezepturen in Absprache mit Herrn Dr. Friedrich Grüner, MPA.

<sup>3</sup> Entwicklung und Überprüfung von Steinersatzmassen für parlierzeitliche Pfeilerfiguren aus Kalkstein an der Chorfassade des Ulmer Münsters, Bericht Haftzugmessungen vom 10.10.2006 sowie Bericht Bewitterungssimulation vom 08.03.2007 Auftrags-Nr.: 901 2432 000 MPA Stuttgart, Dr. F. Grüner

## 2.1 Materialien

Die Materialien zur Ersatzmasse MPA Weimar mit den Bezeichnungen »Kalkstein grob 2/00« und »Kalkstein grob, grau 2/492« wurde von Fa. Romstedt<sup>4</sup> zur Verfügung gestellt.

Es handelt sich um Füllstoffgemische (Steinsande und -Mehle) und ein Bindemittel »Acrylharzdispersion verarbeitungsfertig«. Das Bindemittel erinnert in Aussehen, Konsistenz und Geruch an Primal<sup>®</sup> oder an Acrylharzdispersions-Produkte des Herstellers Lascaux<sup>®</sup>.

Als Füllstoff für die Kieselgel-gebundenen Schlämmen wurde graues Kalksteinmehl der Firma Schön und Hippelein<sup>5</sup>, sowie Quarzmehle und -Sande der Firma Dorfner (Dorsilit<sup>®</sup>) verwendet. Das Bindemittel Syton X 30 ist über Fa. Kremer-Pigmente zu beziehen, Ludox HSA wurde von GRACE GmbH & Co. KG<sup>6</sup> geliefert.

Die Rezepturen sind auf eine Grundfarbigkeit eingestellt und können bei Bedarf durch Veränderung der färbenden Füllstoffanteile vor Ort an die Oberflächen abgestimmt werden.



Bild 7 Probekörper aus Muschelkalk mit den Schlämm-Applikationen

Tabelle 3 Übersicht über die Schlämm-Proben

Bindemittel	Sample	Sample	Sample
Syton X 30	04/1	04/2	04/3
Nachfestigung	keine	KSE 300 E	KSE 300 HV
Ludox HSA	03/1	03/2	03/3
Nachfestigung	keine	KSE 300 E	KSE 300 HV
MPA Weimar	02/1	02/2	02/3
Nachfestigung	keine	KSE 300 E	KSE 300 HV
MPA Weimar	07/1	07/2	07/3
Nachfestigung	keine	KSE 300 E	KSE 300 HV

## 2.2 Applikation der Kieselgel-Massen auf Probekörper

Die Probekörper weisen allesamt eine glatte, nahezu geschlossene, gesägte Oberfläche auf.

Erste Versuche wurden auf saugfähigerem Untergrund (Pappe) ausgeführt. hier konnte keine Schwundrisse beobachtet werden. Die ersten Applikationsversuche mit Rezeptur Kalkstein 01 fein auf den Probekörpern zeigten die Bildung eines starken Krakelees. Ablösungen vom Untergrund konnten keine festgestellt werden.

Ein Applikationsversuch an der verwitterten Seitenfläche eines Probestücks mit kleineren Volumina der Ergänzungsmasse, wie sie auch bei einer realen Verarbeitung der Masse auftreten, zeigten keine erkennbaren Schwundrisse. Da an der verwitterten Originaloberfläche feinere Klüfte und Spalten zu füllen sind, kann eventuell wieder mit feinerem Material gearbeitet werden.

Eine zweite Applikation mit niedrigerem Bindemittelanteil erfolgte auf den Rückseiten der Probekörper. Nach erneuter Krakelee-Bildung wurde die Beschichtung abgehobelt und mit einer veränderten Rezeptur unter Zugabe von gröberem Füllstoffanteilen (Quarzsand) zur Verbesserung der Sieblinie (Rezeptur Kalkstein 02 gröber) neu aufgetragen.

Die Applikation der Rezepturen MPA Weimar zeigte sich schwierig, da sich die Beschichtung zum Teil von der glatten Probenoberfläche abrollt. Die Masse besitzt im Vergleich zu den Kieselgel-Massen eine stärkere Kohäsion. Beim Auftragen entsteht zum Teil eine krümelige Konsistenz. Auch dieser Abroll-Effekt ist vermutlich am verwitterten Original mit der raueren Oberfläche weniger zu erwarten.

<sup>4</sup> Fa. Romstedt Technologien für Restauratoren GmbH, Geleitweg 97/98 D-99334 Kirchheim

<sup>5</sup> Bezugsquelle Kalksteinmehl, grau: Schön & Hippelein GmbH & Co. KG, Natursteine, Industriestraße 1, D-74589 Satteldorf. Ansprechpartner: Herr Keitel Tel. 07951 498 45 - kernmuehle-waage@schoen-hippelein.de

<sup>6</sup> Bezugsquelle Ludox HSA: GRACE GmbH & Co. KG, In der Hollerhecke 1, D -67545 Worms, Germany, Tel.: +49/6241/40300 Ansprechpartnerin: Frau Nina Heck: nina.heck@grace.com

## 2.3 Nachfestigung

Die Nachfestigung erfolgte mit zwei handelsüblichen KSE-Produkten: Die Proben mit der Kennzahl x/1 blieben ohne Nachfestigung, die Proben mit der Kennzahl x/2 wurden mit dem Produkt Remmers KSE 300E, mit der Kennzahl x/3 mit dem Produkt Remmers KSE HV nachgefestigt. Die Nachfestigung erfolgte mit dem Pinsel. Die Schlämmaufträge wurden bis zur Sättigung durchtränkt, überschüssiges Material mit Küchenpapier abgenommen. Eine Tränkung des ohnehin eher wenig bis überhaupt nicht saugenden Steinmaterials erfolgte nicht.

## 2.4 Herstellung von Proben zur Wasserdampf-Diffusionsmessung

Für die Untersuchung der Wasserdampf-Diffusionsfähigkeit wurden Probenkörper der unterschiedlichen Rezepturen hergestellt.

Die Probenkörper haben einen Durchmesser von ca. 72 mm und eine Dicke von ca. 3 mm.



Bild 8 Probenkörper Wasserdampf-Diffusionsfähigkeit

## 3 Applikationsproben vor Ort

Erste Applikationsversuche vor Ort erfolgten an der Ost- und Südfassade. In der Zone mit Reinigungsproben<sup>7</sup> an der Ostfassade wurden Schlammproben an gereinigten, ehemals stark verschmutzten und sowie an ungereinigten, leicht verschmutzten Flächen angelegt. Weitere Proben erfolgten an einer stark mit Salzen belasteten Zone der Südfassade in Nähe des Erkers.

Die Schlämmen wurden mit Spatel / Pinsel appliziert und überschüssiges Material mit dem Mikroporen-

Schwamm abgenommen. Zielsetzung war die Verfüllung von Erosionstiefen zur Sicherung des Bestandes ohne Bedeckung der vorstehenden Höhen der Steinoberfläche. Die Auswahl von zusammenhängenden exemplarischen Schadensbereichen als Probenzonen erwies sich wegen des aufwendigen Korsetts zur Sicherung des Turms als schwierig.

### 3.1.1 Probenzone 1 (Ostfassade)

Bereich mit bis in ca. 5 bis 8 mm Tiefe stark zerklüfteter oberflächennaher Steinzone. Die Spalten und Klüfte sind zum Teil senkrecht zur Oberfläche entwickelt, zum Teil haben sich Schuppen und kleinere Schalen parallel zur Oberfläche gebildet. Die Oberfläche ist ungereinigt, es erfolgte eine Abnahme von losen Schmutz- und Staubauflagen mit dem Pinsel.



Bild 9 Schlammproben vor Ort, Detail: Zerklüftete oberflächennahe Steinzone - Probe 03



Bild 10 Schlammproben vor Ort Zerklüftete oberflächennahe Steinzone – Probe 01 Rezeptur MPA Weimar – Kalkstein grob, grau 2/492, Probe 02 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Syton X 30, Probe 03 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Ludox HSA

<sup>7</sup> Die Reinigungsproben erfolgten durch FGV Steinmetz&Bildhauer GmbH Am Ellersgraben 18, 96148 Bau nach im Mikrosandstrahl-Verfahren mit unterschiedlichen Strahlgütern.

### 3.1.2 Probenzone 2 (Ostfassade)

Bereich mit leicht erodierter Oberfläche mit vereinzelt Schuppen und feinen Rissen. Die Oberfläche ist ungerneigt, es erfolgte eine Abnahme von losen Schmutz- und Staubauflagen mit dem Pinsel.



Bild 11 Schlammproben vor Ort, leicht erodierte Oberfläche – Probe 04 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Syton X 30, Probe 05 – Bindemittel Ludox HSA

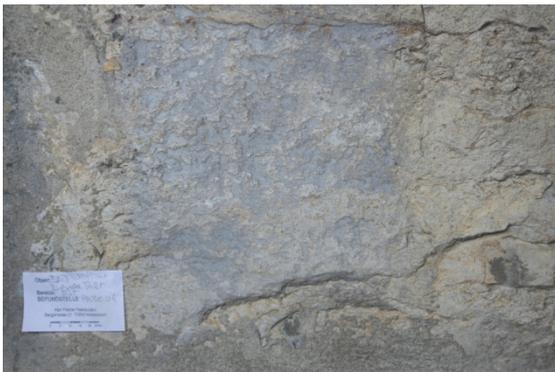


Bild 12 Schlammproben vor Ort, leicht erodierte Oberfläche – Probe 06 Rezeptur MPA Weimar – Kalkstein grob, grau 2/492

### 3.1.3 Probenzone 3 (Ostfassade):

Bereich mit leicht erodierter Oberfläche mit vereinzelt Schuppen und feinen Rissen. Die Oberfläche ist im Mikro-Sandstrahl-Verfahren gereinigt.

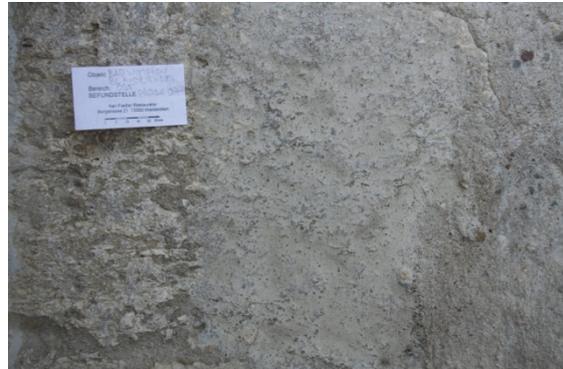


Bild 13 Schlammproben vor Ort, leicht erodierte Oberfläche, gereinigt – Probe 07 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Syton X 30



Bild 14 Schlammproben vor Ort, leicht erodierte Oberfläche, gereinigt – Probe 08 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Ludox HSA



Bild 15 Schlammproben vor Ort, leicht erodierte Oberfläche, gereinigt – Probe 09 Rezeptur MPA Weimar – Kalkstein grob, grau 2/492

### 3.1.4 Probenzone 4 (Südfassade)

An der Südfassade in Nähe des Erkers findet sich eine Zone mit offensichtlicher **Salzbelastung**. Der Bereich besitzt eine leicht erodierte Oberfläche mit vereinzelt Klüften, Schuppen und feinen Rissen. Die Oberfläche ist ungeräumt, es erfolgte eine Abnahme von losem Schmutz- und Staubaufgaben mit dem Pinsel. Für die Bewertung der Auswirkungen der Salzbelastung auf die Ergänzungsmassen erstrecken sich diese Proben auch auf kleine Bereiche des Fugenmörtels.



Bild 16 Schlämmpfropfen vor Ort, leicht erodierte Oberfläche, gereinigt - Probe 10 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 - Bindemittel Syton X 30, Probe 11 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Ludox HSA, Probe 12 Rezeptur MPA Weimar – Kalkstein grob, grau 2/492

Die Nachfestigung sämtlicher Proben erfolgte mit KSE 300 HV.

## 3.2 Weitere Applikationsversuche vor Ort

Das Schadensbild an einzelnen Kalksteinquadern zeigt eine in die Tiefe reichende Zerklüftung der oberflächennahen Steinzone. Die Schlämmpfropfen 01 bis 03 stellen erste Versuche einer mechanischen Sicherung der Bruchstücke dar. Vor allem sollten Sie einer Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten der Schlämme dienen. Als Erweiterung dieser Überprüfung wurde angeregt, einen Konservierungsversuch an diesen Schadensphänomenen durchzuführen um mit Hilfe anschließender Kernbohrungen zu klären, ob die Möglichkeit besteht, das Schadensbild mit einer Schlämme in ausreichende Tiefe zu erfassen.

### 3.2.1 Probezone 5 (Süd- und Ostfassade)

Hierzu wurden weitere Proben an Werkstücken mit stark zerklüfteter Oberfläche erstellt. Die Vorfestigung erfolgte mit KSE 300E. Im Probenbereich an der Südfassade 13/14/15 wurden ca. 55 ml Festiger mit Spritze und Kanüle appliziert, an der Ostfassade, Probenbereich 16 ca. 25 ml.



Bild 17 Schlämmpfropfen vor Ort, tief reichende Zerklüftung, Kontrollprobe Festigung ohne Schlämme – Probe 13

Nach der Hydrolyse erfolgte die Applikation der Schlämmpfropfen. Bei der Applikation wurde versucht, die Schlämme möglichst gut in die tiefen Klüfte einzubringen. Eine Nachfestigung der Schlämmungen erfolgte aus Zeitgründen nicht. Entsprechend der Fragestellung kann dies in diesem Fall vernachlässigt werden.



Bild 18 Schlämmpfropfen vor Ort, tief reichende Zerklüftung, Vorzustand – Probe 14, 15



Bild 19 Schlammproben vor Ort, tief reichende Zerklüftung – Probe 14 Rezeptur MPA Weimar - Kalkstein grob, grau 2/492, Probe 15 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Syton X 30



Bild 20 Schlammproben vor Ort, tief reichende Zerklüftung, Vorzustand – Probe 16



Bild 21 Schlammproben vor Ort, tief reichende Zerklüftung - Probe 16 Rezeptur Kalksteinmehl / Quarzmehl 1:1 – Bindemittel Syton X 30

## 4 Dank

Mein Dank gilt allen Projektbeteiligten, besonders Herrn Dr. Friedrich Grüner für die konstruktiven Diskussionen und Vorgespräche zur Planung und Entwicklung der Schlamm-Massen und Herrn Dr. Ing Helmut Maus für die Projektplanung.

Dem Vertreter von Eigentümer und Auftraggeber in Person von Herrn Roland Löffler, Stadt Bad Wimpfen, sei gedankt für die wohlwollende Geduld und das Verständnis, dass der Zeitplan in erster Linie durch die Bedürfnisse und Eigenheiten des Objekts bestimmt wird.

Der Vertreterin der Denkmalpflege, Frau Ulrike Schubart, danke ich für die freundliche Begleitung und fachliche Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Otto Wölbart, Restaurator am LAD, der zahlreiche von mir bearbeitete Objekte über viele Jahre kritisch wohlwollend begleitet und fachlich unterstützt hat. Auch danke ich ihm für die gemeinsame turbulente Zeit berufspolitischen Engagements für die Restauratorenschaft. Für den wohlverdienten Ruhestand wünsche ich ihm das Allerbeste.

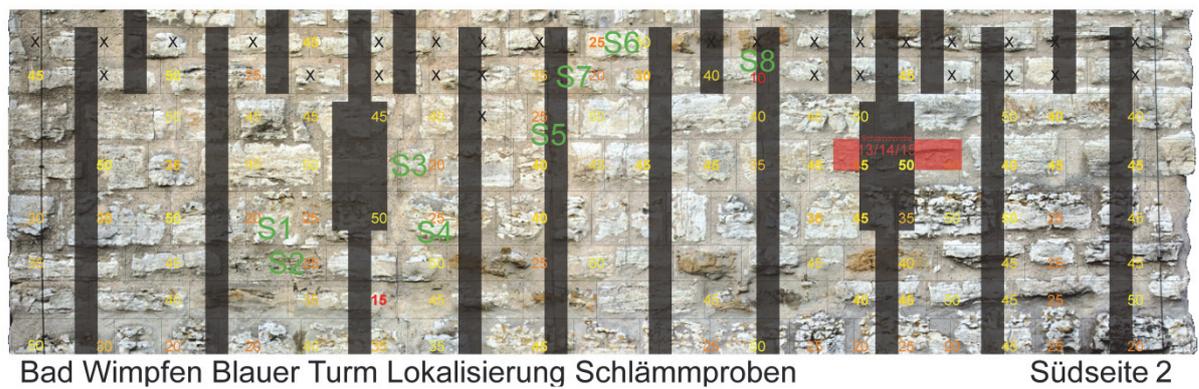
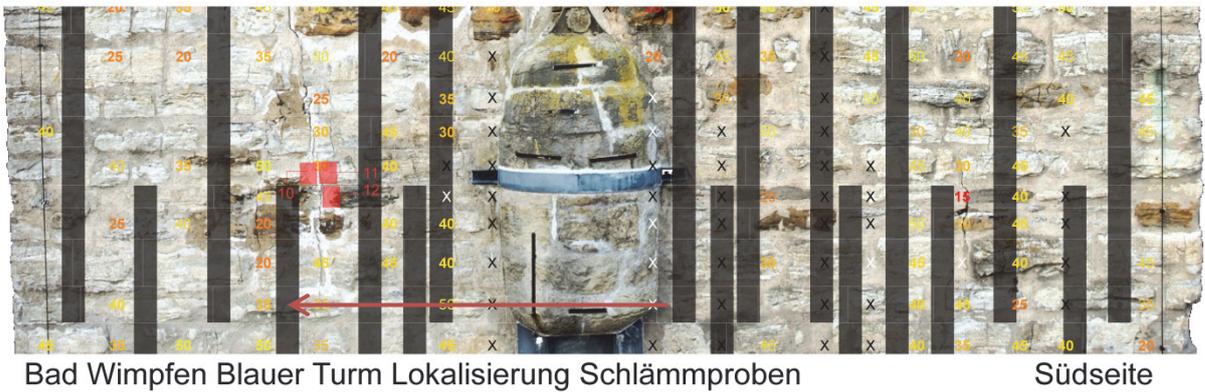


Bild 22 Lokalisierung der Schlammproben

## Autor

Karl Fiedler  
Restaurator  
Bergstrasse 21  
73550 Waldstetten  
Tel.: 07162 23764  
E-Mail: karl.fiedler.rest@online.de



## Objektüberwachung unter ›erschwertenen‹ Bedingungen

### Ein Beitrag von strebewerk. Architekten GmbH zu den Maßnahmen am Blauen Turm

*Stefan Schädel*

**Abstract:** Die Sanierung eines komplexen Objektes wie dem Blauen Turm in Bad Wimpfen birgt Herausforderungen für alle Beteiligten: Von der Finanzierung, unter anderem durch Spenden und Fördermittel, über die Ertüchtigung durch dem Bauwerk angepasste Methoden bis hin zur Objektüberwachung und Monitoring, um die Wirkung der Maßnahme so lange wie möglich zu erhalten, möchte alles geregelt sein. Durch eine sorgfältige Planung wird eine Aufgabe solchen Umfangs jedoch kein Grund zur Resignation, sondern eine Chance, durch bedachtes Handeln historische Substanz zu schützen und zu erhalten.

**Keywords:** Blauer Turm, Bad Wimpfen, staufische Stadtbefestigung, Objektüberwachung, Bauüberwachung, Sanierung, historische Substanz, Kulturdenkmal, Tragwerksplanung, statische Ertüchtigung, Mauerwerksertüchtigung, Monitoring, Qualitätssicherung, Ausschreibungen, Fördermittelgeber, Spenden, Landesamt für Denkmalpflege, Deutsche Stiftung Denkmalschutz, Dokumentation, Hohlräume, Packer, Mauerwerksinjektion

## 1 Nur Mut!

Die Bauüberwachung der Sanierungsarbeiten am Blauen Turm in Bad Wimpfen stellt eine singuläre Aufgabe für einen Architekten dar. Selbstverständlich gibt es auch andere historische Bauwerke, an denen Sanierungsaufgaben geplant und umgesetzt werden. Selbstverständlich gibt es auch bei anderen Bauvorhaben in der Regel nur einen Versuch, »alles richtig zu machen«. Dennoch kristallisiert sich diese Feststellung am Blauen Turm in besonderer Weise. An diesem Objekt überlagern sich die historische und aktuelle Bedeutung eines Bauwerks mit komplexen Schadmechanismen, einer dramatischen Baugeschichte sowie schwierigen logistischen Rahmenbedingungen. Nebenbei kennen wir keine alternative Lösung für die Sicherung der historischen Substanz und die Tragweite eines Fehlversuchs wäre verheerend. Die Metapher, nur einen Schuss frei zu haben, scheint durchaus passend, so dass auf dieser Baustelle auch einiges anders abläuft als gewöhnlich.



Bild 1 Symbolisch: Für die Sanierung des Blauen Turms gibt es nur einen Versuch.

Die Anforderungen an einen bauüberwachenden Architekten lassen sich üblicherweise über die Leistungsbilder der HOAI recht gut abbilden, doch schon hier hat die Konzeption des Büros Barthel & Maus wohlweislich Änderungen vorgesehen. Das Einarbeiten in das im Vorfeld entwickelte Konzept zur Tragwerksplanung wurde ebenso als gesonderte Leistung betitelt wie auch die Anforderung, bei

Bedarf eine tägliche örtliche Bauüberwachung zu leisten. Zur Realisierung der statischen Ertüchtigung gesellen sich im Folgenden jedoch auch noch zahlreiche weitere Themen und Gewerke, die bauüberwachend zu koordinieren sind. Alle Arbeiten müssen dabei in Rücksicht auf die historische Substanz und die umfangreichen Ertüchtigungsmaßnahmen konzipiert werden. Wechselwirkungen zwischen diesen Themen und allgemeingültigen Bauvorschriften, die ein solches Bauwerk nicht vorsehen, sind allgegenwärtig und nicht selten konfliktrichtig. Eine hölzerne Treppe als Fluchtweg, Regenrinnen als Aussichtsplattform und unzählige Kernbohrungen in staufischen Buckelquadern – solche unkonventionellen Konzepte und Lösungsansätze zum Erhalt eines Kulturdenkmals stehen in keinem Lehrbuch.

Doch es gibt nicht nur Probleme, der Blaue Turm ist auch ein gewichtiges Pfund, schließlich hat dieses ganz besondere Haus auch eine enorme Inklusionswirkung. Alle Beteiligten engagieren sich für den Blauen Turm, das verbindet und baut Brücken über Gewerke- und Interessensgräben hinweg. Die Anfrage bei Handwerksbetrieben, kurzfristig unkonventionelle Arbeiten zu übernehmen, stoßen nie auf Begeisterungstürme. Erläutert man hingegen, dass es sich dabei um Arbeiten am Blauen Turm handelt, eröffnet das unmittelbar die Bereitschaft, die eben noch gehegten Vorbehalte und Bedenken beiseite zu schieben. Konstruktive und kreative Ideen scheinen allein durch das identitätsstiftende Bauwerk beflügelt.



Bild 2 Arbeiten bis in die Nacht? Für den Blauen Turm geht das wie selbstverständlich in Ordnung.

## 2 Vergesst die Fördermittelgeber nicht

Es wäre ein Leichtes, mit unbegrenzten Ressourcen zu planen und mit vollen Händen für eine Sanierung

Geld auszugeben. Doch wie an jeder gewöhnlichen Baustelle kann auch am Blauen Turm nicht geprasst werden, zumal eine Wirtschaftlichkeitsberechnung dieses Objekts ohnehin zu fatalen Ergebnissen kommen müsste. Da war es sicher keine leichte Entscheidung, den finanziellen Aufwand zur Sanierung des Blauen Turms mit 6,2 Millionen Euro zu beziffern – und für die Stadt, dies nach einer nicht minder aufwendigen Voruntersuchung zu akzeptieren. Doch hier kommen zwei besonders wichtige Projektbeteiligte ins Spiel: die staatlichen und die privaten Fördermittelgeber. Dank eines außergewöhnlichen Engagements für das staufische Stadtwahrzeichen kann man in Bad Wimpfen von einer „Traumfinanzierung“ sprechen. Das Landesamt für Denkmalpflege, die Deutsche Stiftung Denkmalschutz und zahllose Firmen und Privatpersonen haben es durch ihren Einsatz verdient, an dieser Stelle ausdrücklich und lobend erwähnt zu werden. Erst durch ein solches Spendenaufkommen ist eine derartige Mammutaufgabe zu bewältigen.



Bild 3 Solide wie der Turm: Die Finanzierung des Vorhabens setzt sich aus vielen kleinen und großen Mittelgebern zusammen.

Dabei sind Spenden alles andere als ein Selbstläufer. Die aktive Kommunikation der ermittelten Erkenntnisse und viele erklärende, beschreibende und überzeugende Gespräche sind erforderlich, dass eine solche Maßnahme nicht nur akzeptiert, sondern auch unterstützt und finanziell mitgetragen wird. Ein breit aufgestelltes bürgerschaftliches Engagement ist dabei ebenso unverzichtbarer Bestandteil der Fördermittelgewinnung wie auch die enge und frühzeitige Einbeziehung der Denkmalpflege – nicht nur als genehmigende Behörde, sondern in erster Linie als Berater auf Augenhöhe, Dialogpartner und Multiplikator des Vorhabens. Wenn sich dann auch noch einzelne Großspenden einstellen, die das Projekt zusätzlich unterstützen,



der kostengünstigsten Lösung zum Gegenstand haben. Es ist auch eine Frage der Fairness gegenüber den Bietern, im Vorfeld klar zu kommunizieren, welche Anforderungen an die Arbeiten zur Sanierung der historischen Substanz gestellt werden.



Bild 6 Beratungen: Woher kommt der Stein? Am besten wird das gemeinsam im Steinbruch geklärt.

Doch auch nachdem die geeigneten Fachfirmen gefunden und beauftragt wurden, kann nicht unmittelbar mit der Ausführung begonnen werden. Arbeitsweisen, Materialbezug und Kommunikationswege müssen im Vorfeld abgestimmt werden, um für die praktische Sanierung geregelte Verhältnisse zu haben. So dient beispielsweise ein Ortstermin im Steinbruch dazu, Steinmetz und Steinbruchbetreiber, Materialwissenschaftler, die Denkmalpflege wie auch die Architekten zu einem gemeinsamen Verständnis der Materialbeschaffung für den Blauen Turm zu bringen.

### 3.2 Während der Ausführung

Die Arbeiten zur Mauerwerksertüchtigung werden kleinschrittig überwacht – zuerst von der ausführenden Firma selbst, dann durch die Objektüberwachung und zudem von den weiteren fachlich beteiligten: Tragwerksplaner, MPA und LAD. So misst z.B. die ausführende Firma von jeder angemischten Einheit Feinstzement Parameter, um versehentliche Abweichungen von der speziell erstellten Mischanweisung zuverlässig festzustellen, bevor das Injektionsgut eingebracht wird. Die Überprüfung der Mauerwerkstemperaturen in unterschiedlichen Tiefen erfolgt über das Monitoring, um eine gestörte Aushärtung des Mörtels zu vermeiden. Die explizit geforderte Injektionseinheit dokumentiert präzise, in welcher Zeit über welchen Packer wieviel Injektionsgut ins Mauerwerk eingebracht wurde und welcher Druck dabei aufgebaut wurde. Die

Bohrtiefen für die Packer werden ebenso überprüft wie auch die Lieferscheine des antransportierten Materials, die Bautagesberichte werden ebenso wie auch die ausgegebenen Injektionsbilanzen extern kontrolliert. Die Bauwerksüberwachung der MPA analysiert dauerhaft die Bewegungen, Risse, Temperatur- und Feuchtigkeitsentwicklungen. Spezielle Messungen (FreshCon-System) erfassen zudem den dynamischen Erhärtungsprozess und die ohnehin anzulegenden Bohrkerne werden zwischenzeitig archiviert und zeigen, in welchem Grad Hohlräume erreicht und verfüllt wurden. All diese vorgenannten Kontrollen dienen letztlich der Qualitätssicherung einzig und allein bezüglich der Injektage des Feinstzements in das Mauerwerk.



Bild 7 Nur nichts vergessen: Zur Dokumentation hilft auch die Notsicherung.

Diese und viele weitere Kontrollen und Prüfungen bezüglich anderer Arbeitsschritte bilden insgesamt ein Netz aus Parametern, das engmaschig die einzelnen Maßnahmen erfasst und frühzeitig eventuelle Probleme während der Ausführung aufzeigt, falls Abweichungen vom geplanten Soll auftreten.

Darüber hinaus gilt auch für die langfristige Nachvollziehbarkeit der vorgenommenen Sanierungsarbeiten: dokumentieren, dokumentieren und nochmals dokumentieren. Das dient dabei keinesfalls einem Selbstzweck oder der alleinigen Erfüllung einer Auflage des LAD, sondern um tatsächlich darzulegen, was am Turm gemacht wurde.

### 3.3 Nach Abschluss der Arbeiten:

Die Bauwerksüberwachung wird durch die sukzessive Demontage der Notsicherung Messstellen einbüßen. Dafür werden an anderer Stelle weitere Sensoren im Zuge der Mauerwerkssicherung installiert, um auch nach Abschluss der Arbeiten kontinuierliche Messergebnisse bezüglich der verschiedenen Parameter zu erhalten, was zu einer Interpreta-

tion des Gesamtsystems herangezogen werden kann. Zudem warnt das Monitoring bei eventuellen Spannungsabfällen oder außergewöhnlichen Bewegungen frühzeitig, um eventuellen unguten Tendenzen rechtzeitig entgegenwirken zu können. Ein weiterer wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung und Nachvollziehbarkeit ist die Dokumentation der einzelnen Arbeitsschritte, der eingesetzten Produkte und Techniken, um späteren Generationen die Maßnahme transparent zu machen. Die bereits während der Ausführung gesammelten Informationen und angefertigten Dokumentationen werden nach Abschluss der Arbeiten nochmals in Form gebracht und verteilt. Wichtig ist dabei die Nachvollziehbarkeit für unbeteiligte Dritte, damit auch in Jahrzehnten die Maßnahme nach den unterschiedlichsten Aspekten wieder befragt, analysiert und bewertet werden kann. In Anbetracht der rund 800-jährigen Baugeschichte des Blauen Turms sind an die Dauerhaftigkeit solcher Unterlagen besonders hohe Ansprüche zu stellen.

## 4 Zeit ist Geld

Die Objektüberwachung hat allerdings nicht nur die Aufgabe, die bauliche Qualität der Sanierungsmaßnahme sicherzustellen, sondern auch die beiden weiteren Komponenten der Trias »Zeit – Geld – Qualität« im Auge zu behalten. Die pekuniären Aspekte wurden unter Punkt 2 schon ein wenig beleuchtet und sollen an dieser Stelle nicht über die wesentliche Komponente der Fördermittelbeschaffung hinaus Thema sein. Die Bauzeit allerdings stellt ein weiteres gewichtiges Thema der im Titel bereits genannten erschwerten Bedingungen dar.

### 4.1 Risiken und Unwägbarkeiten

Der Bauablauf zur Sanierung des Blauen Turms lässt sich aufgrund von einigen Unbekannten nicht mit absoluter Sicherheit planen. Neben der Witterung (insbesondere der Temperaturverlauf während des Winters) ist hier vor allem der Zustand des Mauerwerks in seinem Inneren als Unbekannte zu benennen. Trotz aller Voruntersuchungen kann vor der Ausführung nicht verlässlich prognostiziert werden, wo mit kleinen oder auch großen Hohlräumen zu rechnen ist. Daher lässt sich beispielsweise nicht planen, ob an einem Packer eine Arbeitszeit von wenigen Sekunden oder mehreren Stunden anfällt. Auch bei der Arbeitsunterbrechung im Winter kann die zeitliche Varianz groß ausfallen und daher den Arbeitsfortschritt merklich beeinflussen. Bei solchen Aspekten mussten Annahmen getroffen werden, die eine Balance zwischen ansponnender, ambitio-

nierter Herangehensweise und vorsichtigem Pessimismus halten.



Bild 8 Die Zeit eilt. Gerade jetzt ist aber Qualität gefragt.

Unter gewissen Umständen lässt sich auch ein zügigerer Baufortschritt durch zusätzliche finanzielle Aufwendungen »erkufen«. So könnten theoretisch mit Einhausungen die Arbeitsunterbrechungen im Winter minimiert oder durch zusätzliches Gerät ein höherer Personaleinsatz realisiert werden. Im Gegenzug macht sich eine kürzere Bearbeitungszeit z.B. durch geringere Gerüstkosten positiv bemerkbar. Ausgiebige entsprechende Untersuchungen helfen dem Bauherrn, eine für ihn möglichst günstige Konstellation zu finden.

Keine Tauschoption ist hingegen, das Niveau der Ausführungsqualität für eine zeitliche Ersparnis zu opfern. Daher muss klar unterschieden werden, welche Auswirkungen einzelne Ideen zur Beschleunigung des Bauablaufs auf die Fertigungsqualität haben und unter Umständen auch verlockende Optionen als nicht geeignet abgelehnt werden.

### 4.2 Logistik und Organisation

Zeitliche Aspekte sind auch bei der Baustellenorganisation eine wesentliche Komponente. Welche Arbeiten und Gewerke können parallel ausgeführt werden? Sind Synergieeffekte bei entsprechender Planung möglich? Und welche Infrastruktur kann zur Verfügung gestellt werden? Dies beginnt schon bei einfachen Maßnahmen wie dem Benennen und Beschildern der Gerüstebenen. So kann ein Beitrag zu einer einfacheren Orientierung und eindeutigen Kommunikation über die meist gleich scheinenden Fassadenbereiche geleistet werden. Hier kann die Bauüberwachung praktisch helfen.



Bild 9 Treffpunkt Gerüstlage 08: Einfache Maßnahmen helfen bei der Orientierung am Bau.

Doch auch die Baustelleneinrichtungsflächen spielen bezüglich der Arbeitsorganisation und -effizienz eine Rolle. Leider der Regelfall in Ortszentren: es gibt gefühlt viel zu wenig Platz für die Gerätschaften und Materialien der verschiedenen Gewerke. Doch wenn vor dem Bauzaun noch die Feuerwehr passieren können soll, muss hier eben eng zusammengedrückt werden. Und nach eingehender Beratung findet sich schließlich doch für jeden Container und jede Palette ein Platz. Entscheidend ist, dass die Gewerke füreinander sensibilisiert sind und über die Bauüberwachung voneinander erfahren, wer wann welchen Platz benötigt.

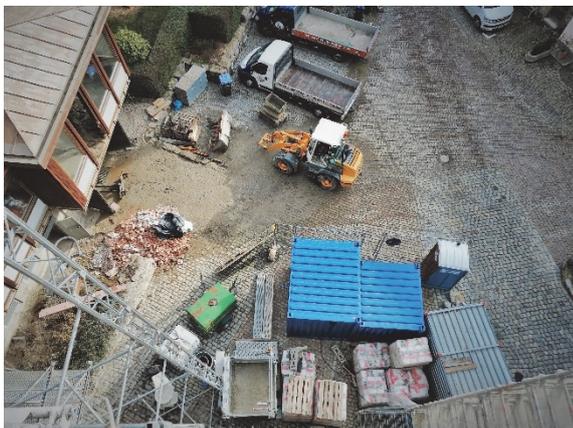


Bild 10 Und dann auch noch eine Baustelle in der Nachbarschaft - manchmal wird es eng.

## 5 Kommunikation ist alles

Die statische Ertüchtigung des Blauen Turms stellt eine in vielerlei Hinsicht aufwendige und vielschichtige Maßnahme dar, bei der wie oft bei der Sanierung von denkmalgeschützten Gebäuden konkurrierende Belange verhandelt werden müssen. Entscheidend für den Erfolg der Maßnahme ist dabei,

rechtzeitig Konflikte zu erkennen und die vordergründig widersprüchlichen Bestrebungen unterschiedlicher Beteiligter zu thematisieren. In der Diskussion der fachlichen Argumente zeichnet sich nicht zwingend sofort eine Auflösung der Situation ab. Umso wichtiger ist es, hier besonnen und wertschätzend die Vorstellungen und Bedürfnisse der Projektpartner nachzuvollziehen, die aus der eigenen Perspektive heraus betrachtet nicht selbsterklärend sind. Eventuell lässt sich auch nur durch einen scheinbar unvollkommenen Kompromiss eine Lösung finden. Gerade in der Kommunikation über solche unbequemen Punkte zeigt sich allerdings die Stärke der Gruppe der Projektbeteiligten, die dann auch als Baustellengemeinschaft bezeichnet werden könnte.



Bild 11 Symbolisch: In konflikträchtigen Fragestellungen hilft nur die gemeinsame Beratung.

Neben der Kommunikation mit den diversen Projektbeteiligten spielt jedoch auch die Kommunikation der Baustelle in der Öffentlichkeit eine wesentliche Rolle. Wie bereits unter Punkt 2 erläutert interessiert es die Bürgerschaft zurecht, was an einem solch markanten, stadtbildprägenden Gebäude geschieht, und es ist nicht zu unterschätzen, wie wenig sich ein mit Netzen verhülltes Gerüst für den interessierten Laien erschließt. Daher wurden für die Baumaßnahme am Blauen Turm verschiedene Formate der Baustellenkommunikation eingerichtet. Im Rahmen einer Bürgerinformation im Rathaus wurde im Vorfeld die geplante Gesamtmaßnahme der interessierten Öffentlichkeit erläutert und die bevorstehenden Einschränkungen thematisiert. Seitdem werden etwa drei- bis viermal im Jahr über das kommunale Amtsblatt aktuelle Informationen über die Baustelle geschildert und so regelmäßig informiert, welche Arbeiten erledigt wurden und welche nächsten Schritte geplant sind. Zudem wird bei signifikanten Änderungen die regionale Presse mit eingebunden, um sich auch einer über die

Stadtgrenzen interessierten Öffentlichkeit zu stellen und die Maßnahme offensiv zu kommunizieren. Nur so kann verhindert werden, dass nach Jahren der Geduld mit dem eingerüsteten Turm der Unmut über die teils doch beträchtlichen Einschränkungen überhand nimmt.



Bild 12 Was machen die Steinmetze auf dem Gerüst? Das interessiert Nutzer und Presse gleichermaßen.

## Autor

Stefan Schädel  
 strebewerk. Architekten GmbH  
 Reinsburgstraße 95  
 70197 Stuttgart  
 Tel.: +49 711 66456915  
 E-Mail: stefan.schaedel@strebewerk.de

## 6 Fazit

Die Bauüberwachung am Blauen Turm ist eine anspruchsvolle und herausfordernde Aufgabe, die jedoch auch besonders inspirierend und alles andere als alltäglich ist. Auch wenn die Tätigkeit der Bauüberwachung personengebunden konzipiert ist, lässt sie sich nur als Team bewältigen. Interdisziplinäre Zusammenarbeit und Gemeinschaftssinn haben daher für den Erfolg der Sanierungsmaßnahme herausragende Bedeutung.

Überwachung im Sinne der Erfolgskontrolle kann nur mit geeigneten, auf das Projekt und die avisierten Maßnahmen zugeschnittenen Werkzeugen gelingen. Mit der Komplexität und Intensität einer Sanierungskonzeption steigen auch die Anforderungen an die messtechnische Überprüfung und Dokumentation. Am Blauen Turm ist insbesondere durch die Installation eines umfassenden Monitorings dies in beispielhafter Weise gewährleistet.

Die Risiken und Unwägbarkeiten, die die historische Substanz mit sich bringt, müssen offensiv kommuniziert werden. Maßnahmen, die daraus entstehenden Verzögerungen entgegenwirken, bedürfen einer intensiven Überprüfung auf eventuelle Qualitätseinbußen, die jedoch unbedingt zu verhindern sind.

Öffentlichkeitsarbeit trägt wesentlich zur finanziellen und ideellen Unterstützung bei und muss daher intensiv betrieben werden. Vielfältige Kommunikationswege sind für die ausreichende Informationsweitergabe zu bedenken.

# Die Instandsetzung des Blauen Turms in Bad Wimpfen

Aktuelle Forschung an Kulturdenkmälern

Tagungsband zum Kolloquium am  
17. Mai 2019 in Bad Wimpfen

Während des ganztägigen Kolloquiums werden die Ergebnisse umfangreicher Voruntersuchungen zu Material und Mauerwerksaufbau des Blauen Turms in Bad Wimpfen vorgestellt. Das zum Teil noch romanische Kalksteinmauerwerk des Turms aus der Stauferzeit hat durch wiederholte Brände und Wiederherstellung des oberen Turmhelms mehrfache, statisch relevante Veränderungen erfahren. Seit etwa 1851 wird von Rissbildungen im romanischen Mauerwerk berichtet, die im Laufe der Zeit stark zugenommen haben, sodass Anfang der 1970er-Jahre eine umfangreiche Sanierungsmaßnahme mit Mauerwerksinjektionen und weiteren statischen Sicherungsmaßnahmen stattgefunden hat. In der Folgezeit sind jedoch erneut umfangreiche, statisch bedingte Rissbildungen eingetreten, deren Ursachen noch weitgehend unklar geblieben sind.

Ab 2012 wurde in einem interdisziplinären Team den Schadensursachen systematisch nachgegangen. Archivrecherche, eine grundlegende Untersuchung des vorliegenden Mauerwerksaufbaus, vielfältige Materialuntersuchungen und verschiedene statische Modellberechnungen des Mauerwerks und seiner Beanspruchung wurden in Kombination mit einem vorgeschalteten aufwendigen Testprogramm zum derzeit durchgeführten Instandsetzungskonzept zusammengeführt.

Ein seit Beginn der Untersuchungen eingebautes instrumentiertes Monitoringsystem überwacht äußere Einflüsse und die Veränderungen der Geometrie am Turm auch während der Instandsetzungsmaßnahmen.



Baden-Württemberg

LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE  
IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART

Barthel & Maus  
Beratende Ingenieure GmbH



M<sub>PA</sub> STUTTGART  
Materialprüfungsanstalt  
Universität Stuttgart

EIN BEITRAG ZUM  
EUROPÄISCHEN  
KULTURERBEJAHRE 2018  
SHARING  
HERITAGE

[www.mpa.uni-stuttgart.de](http://www.mpa.uni-stuttgart.de)

ISBN 978-3-7388-0301-3



9 783738 803013

Fraunhofer IRB Verlag