



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

9. SYMPOSIUM EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON BAUKONSTRUKTIONEN



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE
UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 43

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller
Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastrau

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68
Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer
Korrekturen: Angela Heller
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf www.qucosa.de.

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i>	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzke, Franziska Pannasch</i>	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreusch, Florian Bavendiek</i>	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i>	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i>	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Krüedener, Pascale Dominik</i>	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i>	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i>	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i>	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i>	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i>	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i>	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i>	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i>	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i>	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i>	207
Übersicht KID-Hefte	215

Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen

Sabine Koch¹, Axel Dominik¹, Jessica Klinkner², Clara-Maria Nocker²,
Domenika Baronesse von Kruedener², Pascale Dominik³

Zusammenfassung. Beim Bauen im Bestand müssen Mauerwerkkonstruktionen oft hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit beurteilt werden. Ein historischer Weinkeller, errichtet aus Bruchsteinmauerwerk, hat im Zuge einer Umbaumaßnahme eine Umnutzung erfahren. Weintanks mit großem Fassungsvermögen sollen zukünftig über den Kellergewölben aufgestellt werden. Damit werden die Lasten auf das Kellermauerwerk gegenüber der bisherigen Nutzung deutlich erhöht. Um die zusätzlichen Lasten aufnehmen zu können, sind das Bruchsteinmauerwerk ertüchtigt und das Tragverhalten der Mauerwerkkonstruktion vergleichend messtechnisch untersucht worden (siehe dazu auch [1] und [2]).

Summary: Experimental and partial photooptical detection of deformations of strengthened and unstrengthened natural stone masonry under laboratory and practical conditions. Historic buildings, composed of masonry constructions, are often judged to their load-carrying capacity. A historical wine cellar, made of quarystone work, has been given a different use due to alternatives. Wine tanks, with an increased volume, are to be put up on top of the cellar vaults. The weight, carried by the cellar masonry, would significant rise compared to the present use. The quarystone work has been strengthened to take up the additional weight. The load-carrying capacity of the masonry construction has been comparative examined (see [1] and [2]).

1 Einführung

Die Weinkellerei der Winzergenossenschaft in Mayschoß an der Ahr, die neben modernen Lagerhallen auch noch einen historischen Weinkeller besitzt (siehe Bild 1), sollte umgenutzt werden, um die Lagerkapazität zu erhöhen. Dazu sind zwei Lagerhallen (siehe Bild 2), die oberhalb des historischen Weinkellers liegen, nach mehreren Umplanungen bis auf das Kellergewölbe (Gewölberücken) abgerissen und einschließlich der Stahlbetondecke neu aufgebaut worden.

Der unter den Lagerhallen vorhandene historische Weinkeller besteht überwiegend aus einem (Ahr-)Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk und kann in zwei wesentliche Bereiche unterschieden werden [3], den „neuzeitlichen“ (1888/1889) und den historischen Weinkeller (1873) (siehe dazu auch die Bilder 1 und 2). Der „neuzeitliche“ Weinkeller ist mit einem Tonnen-

1 Dipl.-Ing., Dominik Ingenieurbüro, Bornheim-Merten

2 B. Eng., Dominik Ingenieurbüro, Bornheim-Merten

3 B. A., Dominik Ingenieurbüro, Bornheim-Merten



Bild 1: Weinkeller; links: „neuezeitlicher“ Weinkeller, Gewölberücken (oben) und Gewölbeleitung (unten); rechts: historischer Weinkeller, Gewölberücken (oben) und Gewölbeleitung (unten)
Fotos: [3]

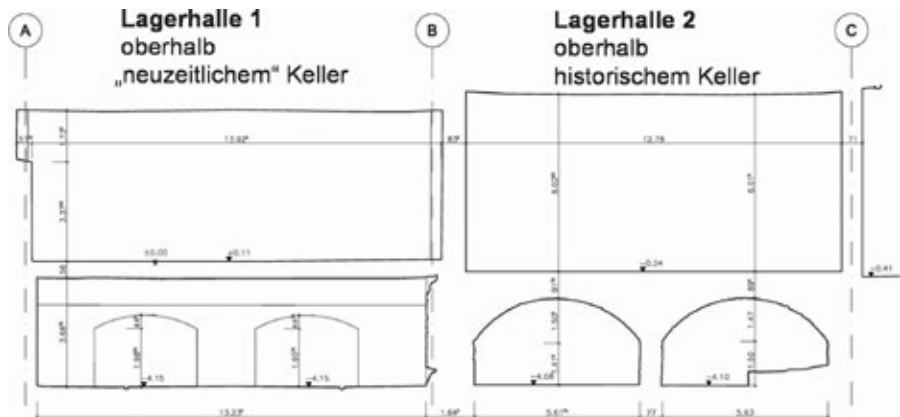


Bild 2: Querschnittsplan: Lagerhalle 1 oberhalb „neuezeitlichem“ Keller (links); Lagerhalle 2 oberhalb historischem Keller (rechts), Winzergenossenschaft Mayschoß

Zeichnung: [4]

gewölbe aus Mauerziegelmauerwerk und der historische Weinkeller mit einem Tonnengewölbe aus Bruchsteinmauerwerk überwölbt. Die Wände beider Keller sind mit einem Bruchsteinmauerwerk errichtet worden.

In der Lagerhalle 1 (siehe Bild 2) oberhalb des „neuezeitlichen“ Gewölbekellers sollen zukünftig Edelstahltanks zur Weinlagerung aufgestellt werden. Die andere Lagerhalle (Lagerhalle 2), oberhalb des historischen Weinkellers, wird zunächst, wie bisher, weiter als Lager genutzt.

Aufgrund der geplanten Umnutzung der Lagerhallen oberhalb des historischen Weinkellers ergibt sich eine Lastzunahme für das Mauerwerk des Weinkellers um etwa das Dreifache. Um abschätzen zu können, ob die zusätzlichen Lasten von den Mauerwerkswänden bzw. Mauerwerkpfelern (Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk) des Weinkellers aufgenommen werden können bzw. welche Ertüchtigungsmaßnahmen ggf. notwendig sind, sind vorab Untersuchungen und statische Berechnungen [5] erfolgt.

In Ergänzung zu den Untersuchungen und statischen Berechnungen sind zusätzlich Eignungsversuche zur Mauerwerkertüchtigung vor Ort in zuvor ausgewählten Bereichen durchgeführt worden. Anhand der Eignungsversuche ist geprüft worden, ob und auf welche technische Weise das Mauerwerk so ertüchtigt werden kann, dass die zusätzlichen Lasten aufgenommen werden können. Infolge der nach der Ertüchtigung zwangsläufig stattfindenden Formänderungen sind Rissbildungen im Mauerwerk, die später evtl. nachgearbeitet werden müssen, nicht auszuschließen. An den Gewölben können zudem Ausblühungen auftreten, die entsprechend behandelt werden müssen.

Die Ertüchtigungsarbeiten am Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk des „neuzeitlichen“ Gewölbekellers der Winzergenossenschaft in Mayschoß umfassen im Wesentlichen die Mauerwerkpfiler bzw. -pfeilervorlagen mit den angrenzenden Mauerwerkswänden; nicht enthalten sind die gemauerten Gewölbe sowie die Gurtbögen und evtl. das oberhalb des Gewölbes vorhandene Mauerwerk.

Unter anderem, um im Hinblick auf den weiteren Bauablauf abzuschätzen, welche Wirkung die ertüchtigungs- und lastbedingten Formänderungen auf das Mauerwerk ausüben und wann ein Ausgleichs- bzw. Ruhezustand erreicht ist, sind Formänderungsmessungen an dem Mauerwerk im Weinkeller vorgenommen worden.

Begleitend zu den Ertüchtigungsarbeiten an dem Grauwackemauerwerk des Weinkellers in Mayschoß ist eine Bachelorarbeit [6] an der TH Köln mit Laboruntersuchungen zum Thema Bruchsteinmauerwerk bearbeitet worden. Im Rahmen der Bachelorarbeit sind u. a. Mauerwerkprüfwände aus Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk (die hier verwendeten Grauwackesteine stammen von den Abbrucharbeiten der Winzergenossenschaft in Mayschoß) errichtet und geprüft worden. Zusätzlich sind wesentliche Eigenschaftskennwerte der verwendeten Baustoffe (Mörtel, Mauerstein) bestimmt worden.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen vor Ort sowie den Laboruntersuchungen sind, soweit möglich, verglichen und abgeglichen worden, so dass das Verhalten des ertüchtigten Grauwacke-Bruchsteinmauerwerkes des Weinkellers in Mayschoß hinsichtlich des unter Last zu erwartenden Formänderungsverhaltens abgeschätzt und entsprechende Werte zur statischen Berechnung dem Tragwerkplaner zur Verfügung gestellt werden konnten.

2 Problem- und Aufgabenstellung

Zwei Lagerhallen der Winzergenossenschaft in Mayschoß sollten im Bereich oberhalb des „neuzeitlichen“ und des historischen Weinkellers (siehe Bild 2) umgenutzt werden. Aus der Umnutzung ergeben sich für das Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk des Weinkellers zusätzli-

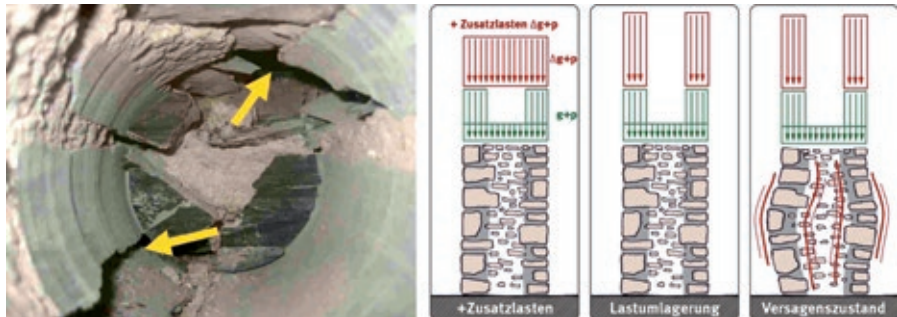


Bild 3: Hohlraumreiches Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk (links); Lastzustand Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk durch geplante Umnutzung (Prinzipskizze) (rechts)

Foto und Grafik: [7]

che Lasten in Höhe von etwa dem 3fachen Wert (etwa 83 kN/m^2) gegenüber der bisherigen Nutzung (etwa 25 kN/m^2).

Untersuchungen des historischen Bruchsteinmauerwerkes haben ergeben, dass das Mauerwerk nahezu „zweischalig“ mit einer mittigen „Auffüllung“ errichtet worden ist und somit z. T. große Hohlräume aufweist (siehe links in Bild 3). Aufgrund des Aufbaus des Mauerwerkes als Zweischalenkonstruktion mit mittiger Verfüllung besteht bei dem Aufbringen der geplanten Zusatzlasten durch die Umnutzung der Lagerhallen die Gefahr, dass das Mauerwerk ausknickt (siehe dazu auch Bild 3, rechts).

Um die Zusatzlasten aus der geplanten Umnutzung aufnehmen zu können, soll das Kellermauerwerk ertüchtigt werden. Dazu sind verschiedene Maßnahmen geplant worden, die vorab in einem Eignungsversuch mit einer in der Restaurierung erfahrenen Firma im „neuzeitlichen“ und im historischen Keller hinsichtlich Umsetzbarkeit überprüft worden sind. Das Mauerwerk des Weinkellers soll zunächst mit speziellen Doppel-Wendelankern (DWA), [8]) so vernadelt werden, dass die Mauerwerkschalen „zusammengehalten“ werden. Die DWA werden dazu mittels eines speziellen und an die Mauerwerkeigenschaften angepassten Mörtels in das Mauerwerk eingesetzt. Anschließend wird das Mauerwerk mit einem ebenfalls angepassten Mörtel injiziert.

Das Durchführen der Eignungsversuche hat aufgrund der Verbrauchsmengen u. a. gezeigt, dass insbesondere die Trennwände aus Bruchsteinmauerwerk große Hohlräume aufweisen, die auf die oben beschriebene Art und Weise ertüchtigt werden können. Um die Wirkung der geplanten Maßnahmen abschätzen zu können, sind im Rahmen einer Bachelorarbeit [6] Laboruntersuchungen durchgeführt worden (siehe Abschnitt 3 ff.). Nach dem Ertüchtigen des Grauwacke-Bruchsteinmauerwerkes des Weinkellers der Winzergenossenschaft sind auch hier begleitende Messungen am Mauerwerk vor Ort durchgeführt worden (siehe Abschnitt 4).

3 Laboruntersuchungen [6]

Im Rahmen einer umfangreichen Bachelorarbeit an der TH Köln sind von drei Studentinnen Laboruntersuchungen zum Tragverhalten von Bruchsteinmauerwerk [5] durchgeführt worden, die in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden.

3.1 Baustoffkennwerte

Im Rahmen der Bachelorarbeit sind u. a. wesentliche Eigenschaftskennwerte von den Grauwackebruchsteinen im Vergleich zu Mauerziegeln und Römertuffstein sowie von einem Rezeptmörtel und einem Verbundmörtel bestimmt worden. Dieser Verbundmörtel ist u. a. auch im Kellermauerwerk der Winzergenossenschaft im Rahmen der Ertüchtigungsmaßnahmen (Vernadeln/Injizieren) eingesetzt worden.

Neben der Druck- und Biegezugfestigkeit sowie dem dynamischen E-Modul ist auch die Wasseraufnahme der eingesetzten Baustoffe bestimmt worden (siehe Bild 4). Die ermittelte Wasseraufnahme der einzelnen Materialien macht die Unterschiede in den Eigenschaften der Baustoffe deutlich. Die Wasseraufnahme der Grauwacke ist mit $0,07 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ min}^{0,5})$ sehr

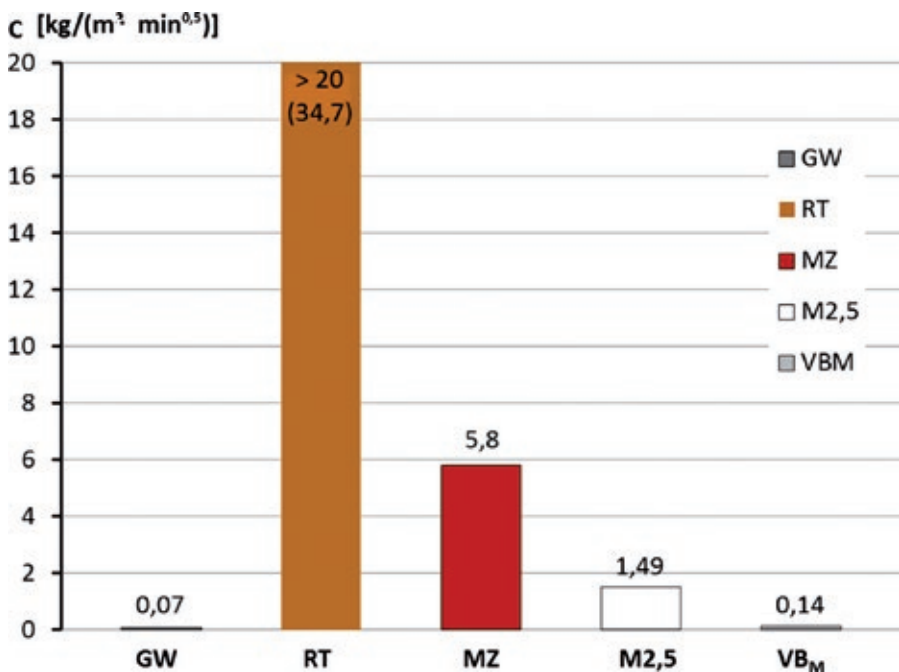


Bild 4: Untersuchungsergebnisse Wasseraufnahme C der Mauersteine aus Grauwacke (GW), Römertuffstein (RT), Mauerziegel (MZ) und Mauermörtel (M2,5) sowie Verbundmörtel (VBM)
Diagramm: [6]

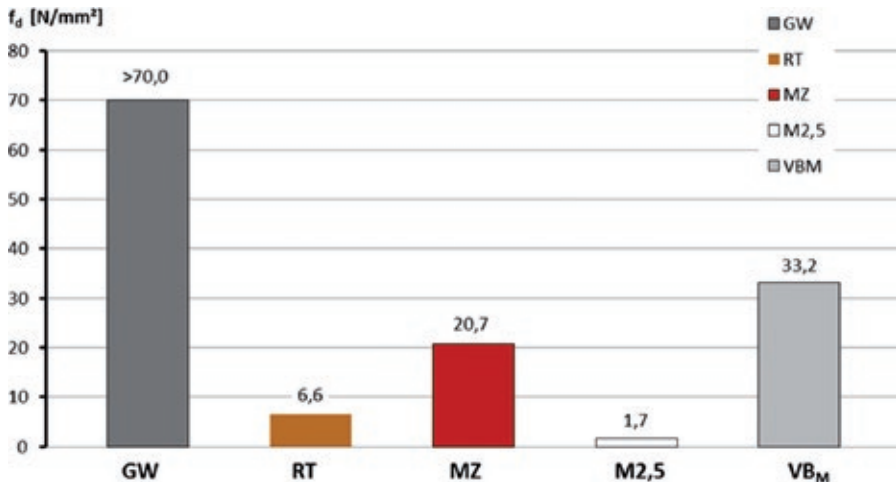


Bild 5: Untersuchungsergebnisse Druckfestigkeit f_d aus Grauwacke (GW), Römertuffstein (RT), Mauerziegel (MZ) und Mauermörtel (M2,5) sowie Verbundmörtel (VBM)

Diagramm: [6]

gering, die Druckfestigkeit mit $> 70,0 \text{ N/mm}^2$ dagegen sehr hoch (siehe Bilder 4 und 5). Im Vergleich dazu ist die Wasseraufnahme des Römertuffsteins mit $34,7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{0,5})$ sehr hoch und die Druckfestigkeit mit $6,6 \text{ N/mm}^2$ gering (siehe Bilder 4 und 5). Die Eigenschaften des Mauerziegels bezüglich Wasseraufnahme und Druckfestigkeit liegen jeweils zwischen den beiden anderen Steinen (siehe Bilder 4 und 5).

Die Wasseraufnahme des Mauer- sowie des Verbundmörtels ist mit $1,49 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{0,5})$ bzw. $0,14 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{0,5})$ ähnlich und insgesamt als gering einzustufen (siehe Bild 4). Die als Normprisma geprüften Druckfestigkeiten der Mörtel sind dagegen mit $1,7 \text{ N/mm}^2$ bzw. $33,2 \text{ N/mm}^2$ sehr unterschiedlich (siehe Bild 5). Für die Laboruntersuchungen sind bewusst Mörtel ausgewählt worden, die in ihren Eigenschaften unterschiedlich sind, um Ansätze dafür zur Verfügung zu haben, wie ein solches System u. a. im Tragverhalten wirkt. Im Verbund mit den Mauersteinen Grauwacke, Römertuff und Mauerziegel erreicht der Verbundmörtel bei allen drei Mauersteinen etwa 30 bis 40 N/mm^2 .

3.2 Zwei-Stein-Verbundprüfkörper

In Ergänzung zu den Eigenschaftskennwerten sind sogenannte Zwei-Stein-Verbundprüfkörper aus den oben angegebenen Materialien hergestellt worden (siehe dazu auch Bild 6). Mittels dieser Verbundprüfkörper sollte neben dem Ermitteln des Haftverbundes zwischen Mauerstein und Mauer- sowie Verbund- und Injektionsmörtel insbesondere das Formänderungsverhalten der Materialien im Verbund unter Druck untersucht werden. Dazu ist in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Optik und Elektronik (AOE) der TH Köln [9, 10] ein neues Untersuchungsverfahren entwickelt und eingesetzt worden.

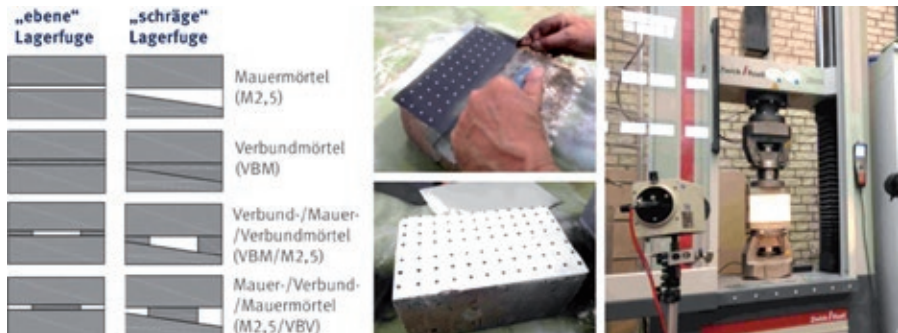


Bild 6: Zwei-Stein-Verbundprüfkörper; links: Prinzipdarstellung; rechts: Prüfen der
Zwei-Stein-Verbundprüfkörper Skizze und Fotos: [6]

Die Zwei-Stein-Verbundprüfkörper sind mit unterschiedlichen Mörteln sowie unterschiedlichen Fugenausbildungen jeweils mit einer „ebenen“ und einer „schrägen“ Fuge hergestellt worden (siehe dazu Bild 6). Anhand der „schrägen“ Fuge sollte im Labor der Einfluss von unebenen Steinen, wie sie insbesondere bei einem unregelmäßigen Bruchsteinmauerwerk (z. B. Bruchsteinmauerwerk im Weinkeller der Winzergenossenschaft) vorkommen, näherungsweise untersucht werden.

Als Mörtel für die Laboruntersuchungen ist in einem ersten Ansatz ein Mauermörtel (Mörtelklasse M2,5) sowie ein Verbundmörtel (Mörtelklasse M30) verwendet worden. Der Mauermörtel steht dabei für den historischen Mörtel im Bruchsteinmauerwerk, der Verbundmörtel für einen Injektionsmörtel des ertüchtigten Bruchsteinmauerwerkes. Um auch die Wechselwirkung der beiden gerade in ihrer Festigkeit unterschiedlichen Mörtel im Labor zu erfassen, sind Zwei-Stein-Verbundprüfkörper mit sogenannten Verbundfugen aus Mauer- und Verbundmörtel hergestellt und untersucht worden (siehe dazu auch Bild 6).

Es zeigte sich, dass die Verbundprüfkörper, hergestellt mit dem Mörtel der Festigkeitsklasse M2,5 (Baustellenrezeptmörtel), so gut wie keine Haftung zu den Mauersteinen aufwiesen, während der Verbundmörtel sehr große Haftzugfestigkeiten im Verbund zu den Steinen erreicht hat.

Nach entsprechender Standzeit (>28 Tage) sind die Zwei-Stein-Verbundprüfkörper geprüft (Druckprüfung) worden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Optik und Elektronik (AOE) der TH Köln [9, 10] ist die dabei im Fugenbereich auftretende Formänderung tastweise und mittels einer speziellen Messtechnik (fotooptisch) erfasst und digital ausgewertet worden (siehe dazu auch die Bilder 7, 8 und 9).

Die Auswertung der mittels Druckprüfung und Formänderungsmessung ermittelten Daten zeigt bei den Verbundprüfkörpern mit „ebener“ Fuge über die Fugenlänge von Messpunkt A bis Messpunkt N eine nahezu gleichmäßige Spannungsverteilung (siehe Bild 7). Bei der Verbundfuge aus dem Mauermörtel M2,5 und dem Verbundmörtel VBM ist über die Fugenlänge im Bereich der Mörtelwechsel (Messpunkte C/D und K/L, siehe Bild 8) eine deutliche Spannungsänderung zu erkennen.

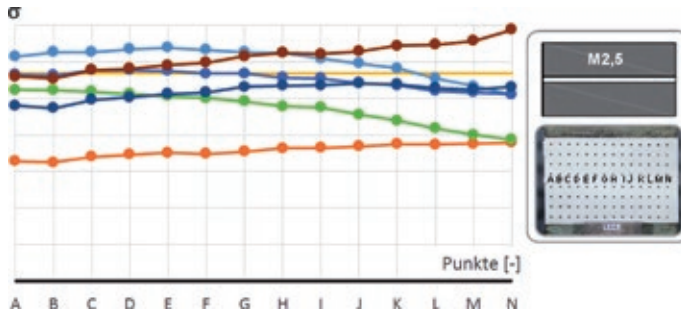


Bild 7:
Spannungsverlauf σ
über die Fugenlänge
(Messpunkte A bis N)
beim Erreichen
der Bruchlast, qua-
litative Darstellung,
Zwei-Stein-Verbund-
prüfkörper (Gauwacke,
verschiedene
Prüfkörper mit
„ebener“ Fuge mit
Mauermörtel M2,5)

Diagramm: [6]

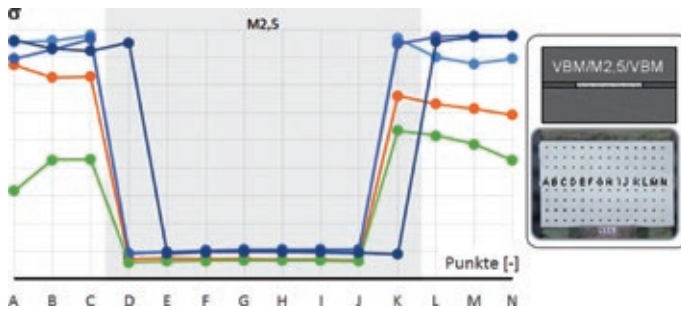


Bild 8:
Spannungsverlauf σ
über die Fugenlänge
A bis N beim Errei-
chen der Bruchlast,
qualitative Darstel-
lung, Zwei-Stein-Ver-
bundprüfkörper
(Gauwacke, ver-
schiedene Prüfkörper
mit „ebener“ Fuge
mit Verbundfuge aus
Kombination VBM/
M2,5)

Diagramm: [6]

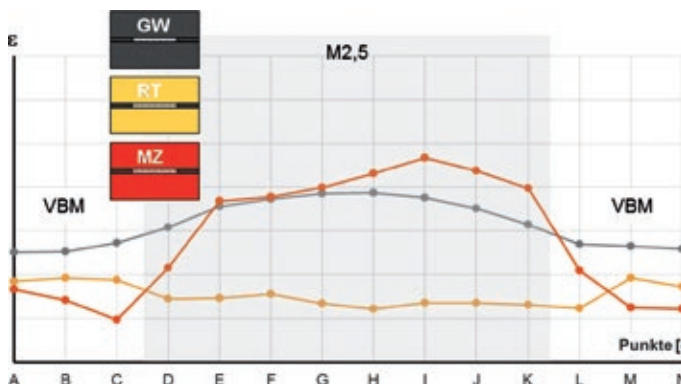


Bild 9:
Dehnungsverlauf ϵ
über die Fugenlänge
(Messpunkte A bis N)
beim Erreichen
der Bruchlast, qua-
litative Darstellung,
Zwei-Stein-Verbund-
prüfkörper (GW, RT,
MZ) mit „ebener“
Verbundfuge aus
Kombination VBM/
M2,5)

Diagramm: [6]

In Bild 9 ist die Formänderung über die Fugenlänge A bis N für die Prüfkörper mit einer „ebenen“ Verbundmörtelfuge („weicherer“ Mörtel M2,5 in Fugenmitte) für die drei geprüften Mauersteinarten Grauwacke, Römertuff und Mauerziegel im Vergleich dargestellt. Bei den Mauersteinen Grauwacke und Mauerziegel ist im Bereich des Mörtelwechsels VBM/M2,5 (Messpunkte C/D und K/L, siehe Bild 9) eine Zunahme der Formänderungen festzustellen, bei dem Römertuffstein eine Abnahme.

Im Vergleich zu dem Römertuff weisen die Grauwacke und der Mauerziegel höhere Stein-druckfestigkeiten auf, so dass bei Grauwacke und Mauerziegel die „weiche“ Fuge M2,5 (geringer E-Modul) stärker zusammengedrückt wird als der Fugenbereich VBM. Bei dem geringer festen Römertuffstein dagegen drückt sich offensichtlich die Fuge in den „weichen“ Mauerstein (siehe Bild 9). Weitere Auswertungen und Beurteilungen der Messergebnisse sowie des Bruchverhaltens sind derzeit noch in Bearbeitung.

3.3 Mauerwerkprüfwände

Zum Abrunden des Untersuchungsprogramms sind aus Grauwackebruchsteinen drei Mauerwerkprüfwände im Labor errichtet worden (siehe Bild 10). Dazu sind Grauwackesteine, die aus den Abbrucharbeiten bei den Umbauarbeiten der Winzergenossenschaft stammen, verwendet worden. Als Mauermörtel ist ein Baustellenrezeptmörtel (Mauermörtel) eingesetzt worden, der ebenso bei den Zwei-Stein-Verbundprüfkörpern verwendet worden ist.

Die Mauerwerkprüfwände sind, wie bei dem Mauerwerk im Weinkeller der Winzergenossenschaft gegeben, als Zweischalenkonstruktion mit mittiger Verfüllung errichtet worden. Eine der drei Prüfwände ist dann wie aufgemauert belassen worden, die zweite Mauerwerkwand ist mit dem bereits bei den Zwei-Stein-Verbundprüfkörpern eingesetzten Verbundmörtel über zuvor eingesetzte Injektionspacker injiziert worden. Die dritte Wand ist zusätzlich zu der Injektion mit speziellen Ankern (Doppel-Wendelanker, DWA [8]) vernadelt worden. Nach ent-



Bild 10: Mauerwerkprüfwände (Zweischalenkonstruktion mit mittiger Verfüllung); (1): aus May-schoß-Grauwacke aufgemauert; (2): zusätzlich injiziert, (3): injiziert und vernadelt

Fotos: Verfasser

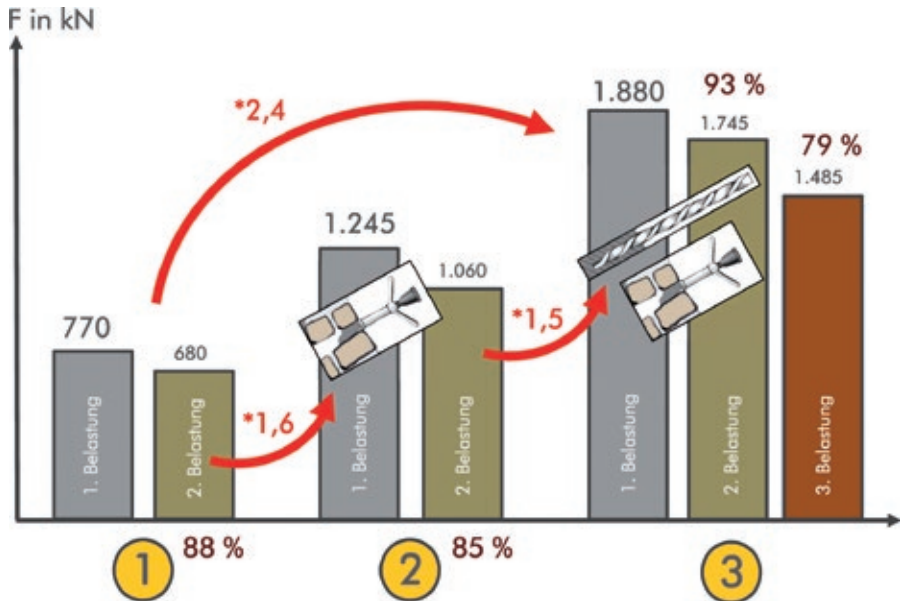


Bild 11: Ergebnisse Druckprüfung (Mehrfachprüfung) der Mauerwerkprüfwände 1 bis 3 im Vergleich in kN
Grafik: Verfasser

sprechender Standzeit (> 28 Tage) sind die Prüfwände im Labor der TH Köln hinsichtlich der Druckfestigkeit geprüft worden.

Vor dem Abdrücken der Wände sind digitale Wegaufnehmer an zuvor in den Mauersteinen eingelassenen Vorrichtungen installiert worden, um die vertikalen und horizontalen Formänderungen an je einer Kopf- und Längsseite der Prüfwände während der Druckprüfungen aufzeichnen zu können.

Die Druckprüfung der Mauerwerkprüfwände 1 bis 3 hat u. a. gezeigt, dass durch die Injektion bzw. die Injektion mit Vernadelung die Lastaufnahme der Mauerwerkswände deutlich gesteigert werden kann. Durch die Injektion des Mauerwerkes kann eine Lastzunahme bei der Mauerwerkprüfwand 2 von etwa dem 1,6-Fachen gegenüber der nicht ertüchtigten Mauerwerkprüfwand 1 erreicht werden. Durch die Injektion des Mauerwerks und einer zusätzlichen Vernadelung konnte die Lastaufnahme der Mauerwerkswand 3 um das insgesamt etwa 2,4-Fache gegenüber der Ausgangssituation gesteigert werden (siehe Bild 11).

Die Prüfwände sind nach Durchführung der ersten Prüfung (Erreichen der Bruchlast bei plötzlichem Lastabfall während der Prüfung (Brucherkenennung der Prüfmaschine, 1. Belastung) noch einmal bis zum Bruch belastet worden (2. Belastung), um die Resttragfähigkeit des Mauer-

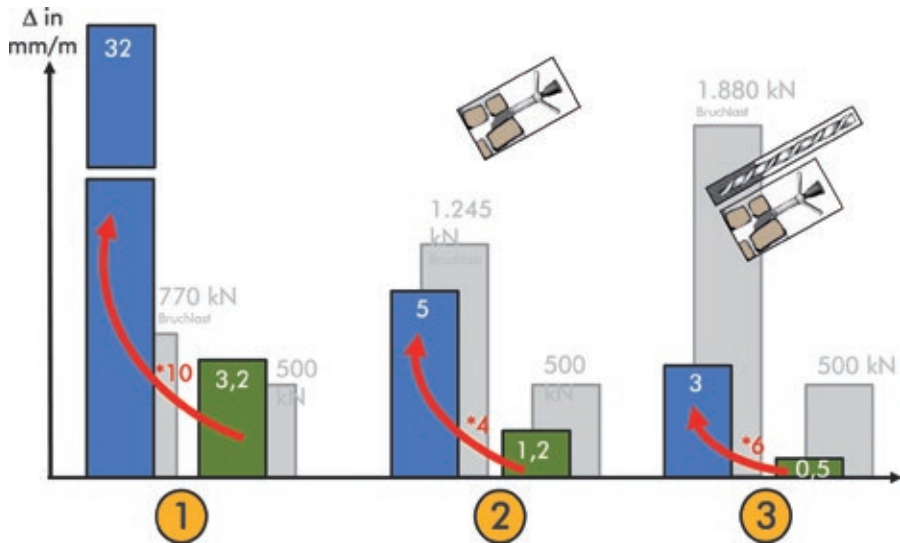


Bild 12: Maximale vertikale Formänderung Δ der Mauerwerkprüfwände 1 bis 3 bei der Druckprüfung (grau) im Vergleich in mm/m bei einer Last von 500 kN (grün) und der Bruchlast (blau)
Grafik: Verfasser

werkes nach Erreichen der Bruchlast abschätzen zu können (siehe dazu auch Bild 11); die Prüfwand 3 ist insgesamt dreimal bis zum Bruch (siehe oben) belastet worden. Bei allen drei Prüfwänden ist bei der 2. Belastung noch eine Resttragfähigkeit von über 80 % erreicht worden. Die Prüfwand 3 erreicht bei der 3. Belastung immer noch eine Tragfähigkeit von rund 79 % gegenüber der 1. Belastung (siehe Bild 11).

Die vertikale Verformung bei der Druckprüfung wurde bei der nicht ertüchtigten Mauerwerkswand 1 mit etwa 32 mm/m zum Zeitpunkt des Eintrags der Maximallast gemessen. Durch die Injektion konnte bei der Wand 2 die Formänderung bei einer deutlich größeren Spannung schon auf etwa 5 mm/m reduziert werden. Bei der vernadelten Prüfwand 3 wurde beim Bruchversagen nur noch eine vertikale Formänderung von etwa 3 mm/m gemessen (siehe dazu auch Bild 12).

4 Baupraktische Untersuchungen

Wie bei den Mauerwerkprüfwänden im Labor, sind auch an ausgesuchten Stellen (Pfeiler, Gewölbe, Trennwand) des Weinkellers der Winzergenossenschaft in Mayschoß digitale Wegaufnehmer zum Messen der Formänderungen sowie Feuchtemessensoren zum qualitativen Messen des Feuchtegehaltes des mittels Injektion und Vernadelung ertüchtigten Mauerwerkes installiert bzw. eingebaut worden (siehe Bilder 13 und 17).

4.1 Formänderungsmessungen

Die Auswertung der Daten der Formänderungsmessungen mittels digitaler Wegaufnehmer über einen Zeitraum von bisher etwa elf Monaten beispielhaft für den Mauerwerkpfeiler (P, siehe Bild 13) ist in Bild 14 dargestellt.

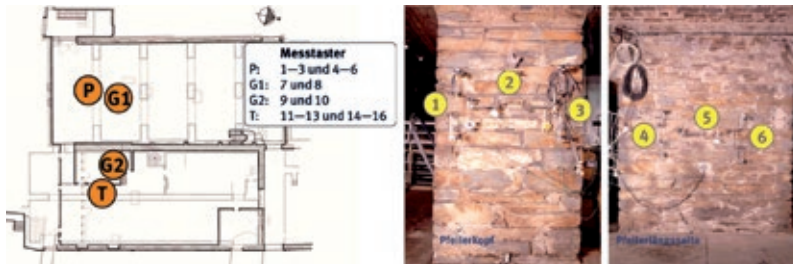


Bild 13: Ausgesuchte Stellen im Weinkeller zur Formänderungsmessung am Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk; links: Grundriss, P: Pfeiler; G: Gewölbe, T: Trennwand; rechts: Formänderungsmessungen an Kopf- und Längsseite eines Mauerwerkpfeilers (P) mit den Messtastern 1 bis 6
Grundriss: [4], Fotos: [10]

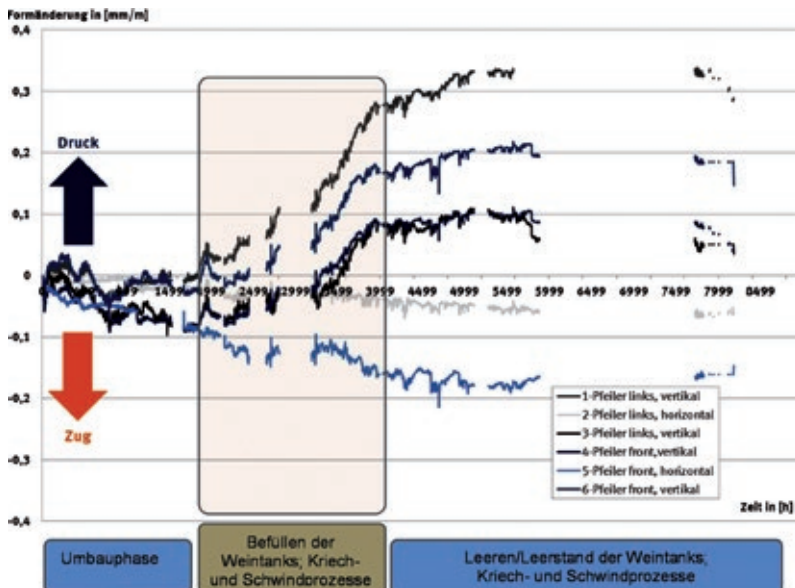


Bild 14: Formänderungsmessungen in mm/m an Mauerwerkpfeiler (P) über einen Messzeitraum von etwa 11 Monaten mit qualitativer Darstellung der wesentlichen Belastungsphasen des Mauerwerkpfeilers durch das Befüllen und Leeren der Weintanks sowie durch Kriech- und Schwindprozesse
Grafik: Verfasser

Die Messung hat nach Abschluss der Ertüchtigungsarbeiten im Weinkeller der Winzergenossenschaft begonnen. In diesem Zeitraum sind keine wesentlichen Formänderungen an der ausgewählten Messstelle festzustellen. Mit Beginn der Lese im Herbst 2016 und damit dem Befüllen der Weintanks in der Lagerhalle 1 (siehe Bild 2) nehmen die vertikalen Formänderungen (Messtaster 1, 3, 4 und 6; Druck) an dem Kopf und der Längsseite des Mauerwerkpfeilers zu. Die horizontalen Formänderungen (Messtaster 2 und 5; Zug) nehmen insbesondere an der Pfeilerlängsseite (Messtaster 5) gegenüber des Pfeilerkopfes (Messtaster 2) mit der zunehmenden Belastung zu. Mit Abschluss der Lese und dem Abfüllen des Weins aus den Tanks in Flaschen (abnehmende Belastung aus Lagerhalle 1) nimmt die Formänderung am Mauerwerkpfeiler deutlich langsamer zu bzw. bleibt nahezu konstant. Beachtet werden muss, dass die lastbedingten Formänderungen von feuchtebedingten Prozessen (u. a. Schwinden) u. a. aus den Ertüchtigungsmaßnahmen und Kriechverformungen überlagert werden.

Insgesamt sind die an dem ertüchtigten Mauerwerkpfeiler gemessenen Formänderungen, auch unter Last (angabegemäß sind etwa 60 % der Tankkapazität im Herbst 2016 erreicht worden; damit ist die Verkehrslast gegenüber dem Zustand vor dem Umbau etwa verdoppelt worden), mit etwa 0,10 bis 0,33 mm/m in vertikaler und mit etwa -0,05 bis -0,20 mm/m in horizontaler Richtung gering. Im Vergleich zu der im Labor nachgestellten ertüchtigten Mauerwerkprüfwand 3, die im Mauerwerkaufbau etwa der vor Ort durchgeführten Mauerwerkertüchtigung entspricht, sind im Bereich der vertikalen Formänderung am Bauwerk theoretisch etwa 10 % der Verformung beim Erreichen der Bruchlast der Mauerwerkprüfwand 3 erreicht (siehe Bild 15).

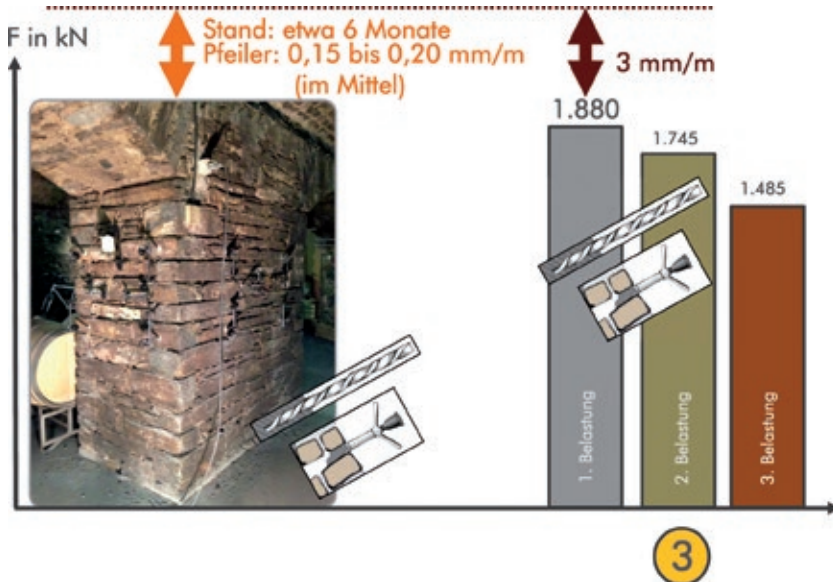


Bild 15: Formänderung der Mauerwerkprüfwand 3 im Vergleich zum ertüchtigten Mauerwerkpfeiler in mm/m
Grafik: Verfasser

4.2 Feuchtegehaltsmessungen

Die Auswertung der Daten der Feuchtegehaltsmessungen mittels Feuchtemesssensoren (siehe Bild 16) über einen Zeitraum von bisher etwa elf Monaten ist beispielhaft für den Mauerwerkpfeiler im Vergleich zur Mauerwerktrennwand (P und T, siehe Bild 17) in Bild 18 dargestellt.

Die Feuchtemesssensoren [11] sind in einer Länge von 50,0 cm einseitig in den Pfeiler (Pfeilerdicke: 1,00 m) bzw. die Museumswand (Wanddicke: 0,75 m) in Bohrlöcher mit Abstandhaltern eingelegt worden und im Zuge der Ertüchtigungsarbeiten am Mauerwerk mit einem speziellen Injektionsmörtel umhüllt worden (siehe Bilder 16 und 17). Die Messstelle R1 des Sensors liegt dabei nahe der Wandoberfläche (etwa 5 cm ab Wandoberfläche) und die Messstelle R6 liegt in etwa 45 cm Tiefe ab der Wandoberfläche (siehe dazu auch Bild 16).

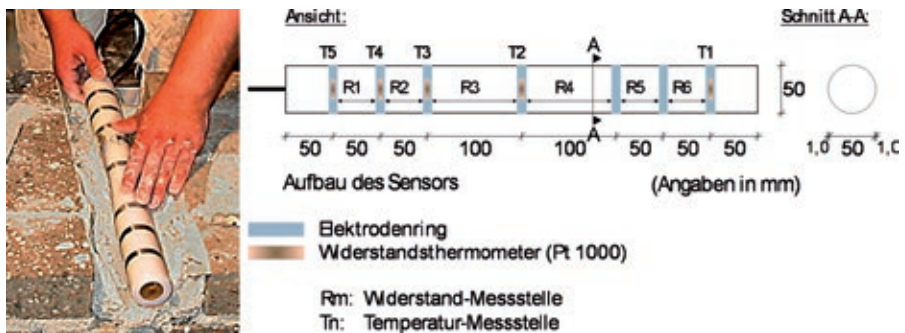


Bild 16: Aufbau der tiefengestaffelten Feuchtegehaltsmessungen mittels Feuchtemesssensoren Grafik: [11]



Bild 17: Ausgesuchte Stellen im Weinkeller zur Feuchtegehaltsmessung am Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk; links: Grundriss, P: Pfeiler; G: Gewölbe; T: Trennwand (a); rechts: Feuchtegehaltsmessung an Längsseite eines Mauerwerkpfeilers (P) mit dem Feuchtemesssensor 1 [11] Grundriss: [4], Fotos: [10]

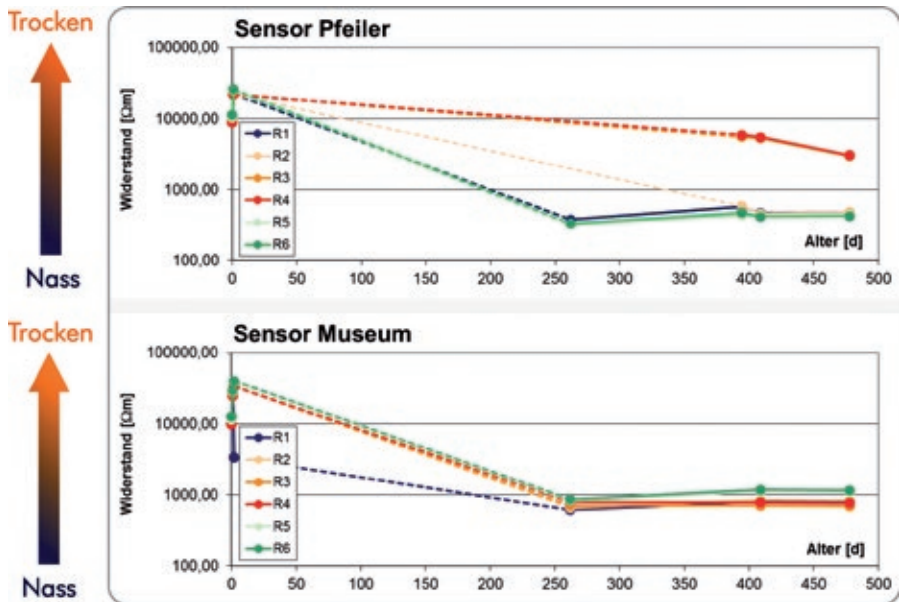


Bild 18: Feuchtegehaltsmessung des Mauerwerkpfilers (P) und der Mauerwerktrennwand (T, Sensor Museum) im Vergleich in Ωm Grafik: Verfasser

Unmittelbar nach der Mörtelinjektion des Bruchsteinmauerwerkes ist die erste Feuchte-messung erfolgt. Es zeigt sich ein sehr großer Widerstand, der einem trockenen Zustand des Mauerwerkes entsprechen würde, der aber definitiv so nicht gegeben ist (siehe Bild 18). Die Ursache für die zu Beginn gemessenen großen Widerstände ist den Autoren noch nicht bekannt. Sie kann ggf. auf die im Laufe der Erhärtungsprozesse des Mörtels stattfindenden Veränderungen im Mörtelsystem zurückgeführt werden, was noch geprüft werden muss. Es muss dabei beachtet werden, dass der Abbinde- und Erhärtungsprozess in einem Mörtel, der z. B. Puzzolane enthält, noch über Monate und Jahre zu Veränderungen (z. B. Menge der gelösten Alkalien im Porenwasser) im Mörtelsystem (Veränderung des Elektrolytwiderstands) führen kann. Im Rahmen von anderen Untersuchungen, die mittels dieser auch hier eingesetzten Sensoren durchgeführt worden sind, wurden diese Anfangseffekte (großer Anfangswiderstand) [12] nicht festgestellt, wobei in diesen Fällen nicht unmittelbar mit den Widerstandsmessungen begonnen worden ist, sondern erst später nach dem Abschluss der Baumaßnahme.

Die Widerstandsmessungen können nur dann näherungsweise in tatsächlich vorhandene Feuchtegehalte im Umgebungsmörtel umgerechnet werden, wenn der Mörtel von seinen Eigenschaften her auch im Verbund zum Umgebungsmaterial genau bekannt ist (siehe dazu auch [12]). Der Feuchtegehalt kann im vorliegenden Fall mittels der Feuchtemesssensoren eher qualitativ als quantitativ bestimmt werden. Je größer der Widerstand ist, umso trockener

ist die Umgebung des Feuchtemesssensors. Dabei muss beachtet werden, dass der Feuchtegehalt des Mörtels, der den Sensor umgibt, im Mauerwerk nicht dem Feuchtegehalt des Mauersteines oder des historischen Mörtels im Mauerwerk entsprechen muss (siehe dazu auch [13, 14]).

Anhand der Messwerte ab einem Prüfalter von 250 Tagen ist bei den **Messungen am Pfeiler** (siehe u. a. Messstellen R1 (wandoberflächennah) und R6 (Wandmitte)) zu erkennen, dass der Widerstand noch sehr gering ist. Der Widerstand nimmt sehr langsam zu (siehe Bild 18). Dies bedeutet, was auch aus anderen Untersuchungen und tatsächlichen Messungen des Feuchtegehaltes bekannt ist, dass die Feuchteabgabe bis zur „Trocknung“ eines solchen Bauteils über viele Jahre stattfindet. An der Messstelle R4 sind dagegen Messwerte ermittelt worden, die deutlich größere Widerstände ergeben haben, wobei die Tendenz hier auf eine Feuchtezunahme hindeutet (siehe Bild 18). Diese Messwerte sind derzeit noch nicht erklärbar, können aber evtl. damit zusammenhängen, dass beim Injizieren des sehr klüftigen Bruchsteinmauerwerkes Mauerwerkbestandteile (kalkhaltiger Mörtel und Ahrgrauwacke) in die unmittelbare Umgebung des Sensors gelangt sind und die Messwerte beeinflussen.

Die Messstelle R1 liegt bei der **Museumswand**, die etwa 75 cm dick ist, nahe der Wandoberfläche, die Messstelle R5 liegt etwa in der Wandmitte. Die Messwerte zeigen an dieser Wand nach etwa 1,5 Jahren Messdauer ein nahezu konstantes Feuchtegehaltsverhalten. Ein wesentliches Trocknungsverhalten ist noch nicht zu erkennen. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass in den Weinkellern, bis auf den Veranstaltungsraum (Raum im Bereich von Messstelle R6), eine sehr hohe relative Luftfeuchte gegeben ist.

5 Resümee

Die Winzergenossenschaft in Mayschoß sollte im Bereich von zwei Lagerhallen, die oberhalb eines „neuzeitlichen“ und eines historischen Weinkellers liegen, so umgenutzt werden, dass eine Zunahme der Verkehrslast für das im Weinkeller vorhandene Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk um etwa den Faktor 3 erfolgen würde.

Damit das Mauerwerk, eine Zweischalenkonstruktion aus Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk mit mittlerer Verfüllung, diese Lastzunahme aufnehmen kann, sind Ertüchtigungsmaßnahmen (Vernadelung/Injektion) durchgeführt worden. Diese Maßnahmen sind mittels Eignungsversuchen, Laboruntersuchungen (z. B. [6]) und baupraktischen Untersuchungen (Formänderungsmessungen) hinsichtlich ihrer Ausführbarkeit und Wirkung geprüft worden. Die Laboruntersuchungen und die baupraktischen Untersuchungen zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk, die nur einen Anfang bzw. Einstieg in die Thematik darstellen können, haben bisher gezeigt, dass die Ertüchtigung von hohlraumreichem Mauerwerk mittels Injektion und Vernadelung eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung ermöglicht.

Simulationsberechnungen zum Tragverhalten von Bruchsteinmauerwerk mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die im Labor erstellten Zwei-Stein-Verbundprüfkörper und Mauerwerkprüfwände haben mit den im Rahmen der Bachelorarbeit [6] eingesetzten Berechnungsprogrammen keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen den an den Prüfkörpern ermittelten Untersuchungsergebnissen und den Berechnungsergebnissen ergeben. Hier sind weitere rechnerische und labortechnische Vergleichsuntersuchungen notwendig.

Die an den Mauerwerkprüfwänden anhand der Druckprüfung ermittelten statischen E-Module sind aufgrund der Vergütung angestiegen, was sich auch in den reduzierten Formänderungen infolge Lastzunahme zeigt (siehe Bild 15). Der so bestimmte statische E-Modul der Prüfwände 1 und 2 ist damit allerdings geringer als der E-Modul des Baustellenrezeptmörtels M2,5. Hier wäre es interessant zu erforschen, wie diese deutlichen Unterschiede zusammenhängen und in einem Simulationsprogramm (z. B. FE-Programm) erfasst werden können.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Winzergenossenschaft Mayschoß-Altenahr e.G. für die Möglichkeit, die vorgestellten Messungen auch nach Abschluss der eigentlichen Baumaßnahme in den Weinkellern fortführen zu können, um Erkenntnisse über das Tragverhalten von Mauerwerk (Bruchsteinmauerwerk) zu erhalten.

Literatur

- [1] OE Planung + Beratung GmbH, Altena: Laserscanaufnahmen und Planerstellung. Unveröffentlicht, 2015.
- [2] H+P Ingenieure GmbH, Beratende Ingenieure im Bauwesen, Aachen: Statische Berechnungen. unveröffentlicht, 2015/2016.
- [3] Klinkner, J.; Baronesse von Kruedener, D.; Nocker, C.-M.: Ansätze zur rechnerischen Erfassung des Tragverhaltens von Bruchsteinmauerwerk unter Berücksichtigung der erforderlichen Messtechnik und der zu ermittelnden Baustoffkennwerte. Bachelorarbeit, TH Köln, 2016.
- [4] HOWI Fertigdecken Ingenieurgesellschaft mbH, Kelberg.
- [5] Prof. M. Gartz; A. Kraus, Institut für Angewandte Optik und Elektronik (AOE), TH Köln.
- [6] M. Hoscheid, Fototechnik.
- [7] Homepage Winzergenossenschaft Mayschoß: <http://wg-mayschoss.de/historie.html> (abgerufen am 12.6.2017).
- [8] Koch, S.: Zum Tragverhalten von historischem Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk im Bestand. Vortrag beim 5. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 24./25.1.2017 an der Technischen Akademie Esslingen.
- [9] Koch, S.; Dominik, A.; Klinkner, J.; Baronesse von Kruedener, D.; Nocker, C.-M.: Zum Tragverhalten von historischem Grauwacke-Bruchsteinmauerwerk im Bestand. In: Patitz, G.; Grassegger, G.; Wölbert, O. (Hrsg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2017. Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele (Tagungsband), 17.3.2017 in Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2017, S. 7–17.
- [10] Dominik, A.: Zur mörteltechnologischen Instandsetzung von Mauerwerkbauten im Bestand (Arbeitsittel), Diss. (in Bearbeitung).
- [11] S + R Sensortec GmbH, München.
- [12] Harnisch, J.: Entwicklung eines Sensorsystems für die tiefengestaffelte kontinuierliche Wassergehaltbestimmung in Mauerwerk. Vortrag beim 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 27.1.2009 an der Technischen Akademie Esslingen.

- [13] Dominik, A.; Koch, S.: Entwicklung eines Ankopplungsmörtels – Abschlussbericht: Messsystem für tiefengestaffelte, kontinuierliche Feuchtebestimmung von historischem und neuzeitlichem Mauerwerk. Forschungsprojekt F 1009, gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AIF), Dominik Ingenieurbüro, Bornheim | Aachen, 4/2008.
- [14] Grafische Darstellung: Gerd Sedelies, Berlin.