Maßgeschneiderte Mörtel für die Instandsetzung des Aachener Doms

Bernd Winkels, Michael Raupach

Institut für Baustoffforschnung (ibac),
RWTH Aachen University,
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen, Germany

winkels@ibac.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Während der vergangenen rd. 25 Jahre wurden verschiedene maßgeschneiderte Mörtel für die Instandsetzung des historischen Natursteinmauerwerks des Aachener Doms entwickelt. Im Rahmen der Instandsetzung des karolingischen Mauerwerks des Oktogons sowie des Westbaus wurde ein Sichtmörtel nach optischen, denkmalpflegerischen sowie baustofflichen Gesichtspunkten konzipiert und seine Eignung im Labor sowie am historischen Bauwerk nachgewiesen. Der karolingische Sichtmörtel bildete die Basis für weitere Mörtelentwicklungen, welche unlängst bei Instandsetzungsmaßnahmen an den Fugen der Natursteinmauerwerke der Taufkapelle bzw. der gotischen Chorhalle des Aachener Doms zum Einsatz kamen. Dabei wurde das Bindemittelsystem beibehalten, die Gesteinskörnung, Pigmentierung sowie Oberflächengestaltung wurden dagegen individuell an das jeweilige Mauerwerk angepasst.

In diesem Beitrag sollen ausgewählte experimentelle Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften vorgestellt werden. Bei guter Vor- und Nachbehandlung in Verbindung mit einem Haftvermittler wurden gute Verbundeigenschaften zwischen Naturstein und Verfugmörtel erzielt. Beispielhaft soll auch das praktische Vorgehen bei der Instandsetzung der Fugen am Bauwerk gezeigt werden. Zukünftig soll die Bauwerkserhaltung am Aachener Dom digitalisiert werden. Dazu soll der Istzustand des Natursteinmauerwerks regelmäßig erfasst und Zustandsänderungen kontinuierlich bewertet und Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Keywords: Natursteinmauerwerk, Instandsetzung, Erhaltung, Verfugmörtel, Haftverbund

Abstract

Over the past 25 years, various customised mortars have been developed for the restoration of the historic natural stone masonry of Aachen Cathedral. As part of the restoration of the Carolingian masonry of the octagon and the west building, a pointing mortar was designed according to visual, conservation, and building material aspects and its suitability was proven in the laboratory and on the historic building. The Carolingian pointing mortar formed the basis for further mortar developments, which were recently used to repair the joints in the natural stone masonry of the baptistery and Gothic choir hall of Aachen Cathedral. Thereby, the binder system was retained, while the aggregates, pigmentation, and surface design were individually adapted to the masonry.

In this paper selected experimental investigations of the mechanical properties of the mortar are presented. With good pre- and post-treatment in combination with a bonding agent, good bond properties were achieved between natural stone and applied pointing mortar. As an example, the practical procedure for repairing the joints in the building is also shown. In the future, the conservation of Aachen Cathedral will be digitised. To this end, the actual state of the natural stone masonry will be regularly recorded, changes will be continuously assessed and the need for action will be derived.

Keywords: Natural stone masonry, restoration, conservation, pointing mortar, adhesive bonding

1 Einleitung

Als Pfalzkapelle Kaiser Karls des Großen entstand zwischen *793* und *813* einer der bedeutendsten Kirchenbauten seiner Zeit nördlich der Alpen: Der Aachener Dom. Bild 1 veranschaulicht die baugeschichtliche Entwicklung des Aachener Doms. An den zentralen Kuppelbau – das Oktogon – mit zweigeschossigem, sechzehneckigem Umgang grenzen der neugotische Westturm über dem karolingischen Westbau sowie die gotische Chorhalle an, vgl. Bild 1. Das Oktogon wird gesäumt von insgesamt fünf mit unregelmäßigen Grundrissen gestalteten Kapellenbauten, darunter die Anna- sowie Matthiaskapelle auf der Südseite, vgl. Bild 1 (*rechts*).

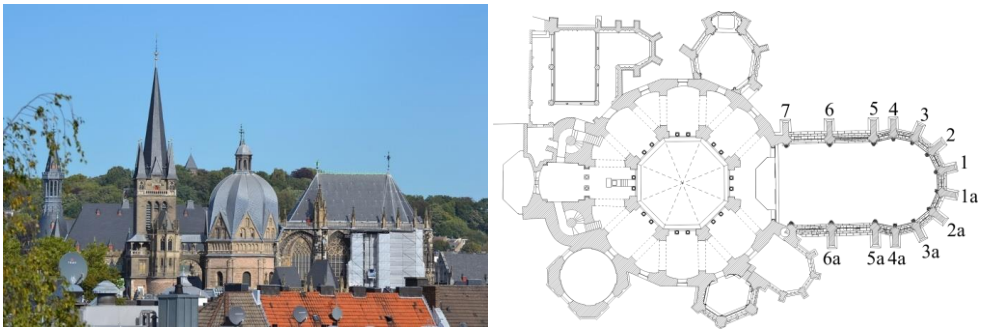


Bild 1 Links: Südansicht des Aachener Doms: (Aufnahme während der Instandsetzung des Mauerwerks der gotischen Chorhalle *2021*, Pfeiler 6a bis 3a); Rechts: Grundriss des Aachener Doms mit Nummerierung der Pfeiler der Chorhalle (Quelle: Dombauhütte Aachen)

Seit den 1980er Jahren finden umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen am Aachener Dom statt. Zwischen der Dombauhütte Aachen und dem Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (*ibac*) besteht seit langem eine gute und vertrauensvolle Kooperation. Während der vergangenen rd. 25 Jahre wurden für verschiedene Anwendungen maßgeschneiderte Mörtel für die Instandsetzung der verschiedenen historischen Natursteinmauerwerke des Aachener Doms entwickelt. So wurden beispielsweise für den Steinaustausch sowie die Instandsetzung des Herzogenrather Sandsteins, welcher hauptsächlich beim Bau der gotischen Chorhalle eingesetzt wurde, ein Vergussmörtel [1–5] sowie ein Steinergänzungsmörtel [6] entwickelt. Basierend auf den Untersuchungen in [7] wurde für das karolingische Mauerwerk des Oktogons bzw. Sechzehnecks sowie des Westbaus ein Sichtmörtel entwickelt, welcher das optische Erscheinungsbild des karolingischen Mauermörtels aufgreift, jedoch einen eigenständigen Charakter mit warmem Farbton ausbildet, siehe [8–11], vgl. Bilder 2 und 3.

Bild 2 Karolingischer Mauermörtel (*oberhalb*) und neuer „karolingischer“ Sichtmörtel (*unterhalb des Natursteins*) an der Südseite des Oktogons bzw. Sechzehnecks

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

Bild 3 Karolingisches Mauerwerk am Westbau mit neuem „karolingischen“ Sichtmörtel: Fern- (*oben*) und Nahansicht (*unten*), (Instandsetzung *2003*, Aufnahmen *2022*)

Der neue „karolingische“ Sichtmörtel wurde nicht nur nach optischen Gesichtspunkten entwickelt, sondern berücksichtigt auch denkmalpflegerische sowie baustofftechnologische Aspekte. Seine Eignung wurde im Labor sowie am historischen Bauwerk nachgewiesen. Der Verfugmörtel wurde auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Natursteinmauerwerks abgestimmt und erfüllt Anforderungen an die Dauerhaftigkeit, vgl. Abschnitt 2. In modifizierter Form kam der Sichtmörtel bei der Instandsetzung der Anna- bzw. Matthiaskapelle zum Einsatz, vgl. [12]. Die vorgestellten Mörtel bilden die Basis für die kürzlich abgeschlossenen bzw. aktuell laufenden Instandsetzungsmaßnahmen an den Fugen der Natursteinmauerwerke der Taufkapelle (*2020*) bzw. der Chorhalle des Aachener Doms (seit *2021*).

2 Anforderungen an Verfugmörtel für die Instandsetzung von historischem Natursteinmauerwerk

Allgemein sind die Eigenschaften von Verfugmörteln weitestmöglich auf die Eigenschaften des historischen Natursteinmauerwerks abzustimmen. Dabei ist insbesondere auf die (mechanische) Verträglichkeit mit den im Bauwerk eingesetzten Natursteinen und Mörteln zu achten. Die Druckfestigkeit des Mörtels darf möglichst hoch sein, wenn der Mörtel gleichzeitig eine ausreichend gute Verformbarkeit aufweist und somit das Mauerwerk in der Lage ist, Bauwerksbewegungen unbeschadet bzw. rissfrei zu folgen. Darüber hinaus sollte zu den angrenzenden Steinflanken bzw. zu dem (Alt-)Mörtel ein ausreichend guter Haftverbund sichergestellt sein. Neben den mechanischen Eigenschaften sollte der Mörtel ein auf den Naturstein bzw. (Alt-)Mörtel abgestimmtes Wasserrückhaltevermögen aufweisen, damit dem Mörtel während der Verarbeitung bzw. Erhärtung nicht in kritischem Maße Wasser entzogen wird. Idealerweise sollten ebenso die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Mörtels kompatibel zu dem Bestandsmauerwerk sein.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

Der Mörtel sollte zudem eine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen. Eine ausreichende und dauerhafte Widerstandsfähigkeit gegenüber baustoffschädlichen Stoffen wie z. B. Sulfat sind erforderlich, insbesondere bei erhöhten Konzentrationen solcher Stoffe im historischen Mauerwerk. Zudem sollte der Mörtel einen ausreichenden Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechselbeanspruchung (FTW) aufweisen. Ein niedriges Schwindmaß in Verbindung mit einer guten Flankenhaftung sind ebenso wichtig für ein rissfreies und witterungsbeständiges Mauerwerk. Zudem sollte der Mörtel nur geringe Eigenschaftsänderungen (Festigkeit und Schwinden) infolge Carbonatisierung aufweisen.

3 Entwickelte Verfugmörtel und deren Ausgangsstoffe

Die für die Taufkapelle sowie die Chorhalle des Aachener Doms entwickelten Verfugmörtel sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 Übersicht der seit dem Jahr *2020* entwickelten Verfugmörtel

Mörtel	Jahr	Bauwerk	Bauwerksabschnitt
VFM20	2020	Taufkapelle	Nord,- West- und Südseite[1)]
VFM21	2021	Gotische Chorhalle	Südseite (Pfeiler 6a bis 3a)[2)]
VFM22	2022		Nordseite (Pfeiler 7 bis 3)[2)]
VFM23a	2023		Süd-Ostseite/Apsis (Pfeiler 3a bis 1a)[2)]
VFM23b			Nord-Ostseite/Apsis (Pfeiler 3 bis 1)[2)]

[1)] Vollständig instandgesetztes Außenmauerwerk

[2)] Instandsetzung schadhafter Bereiche des Außenmauerwerks, Bauwerksabschnitt vgl. Bild 1

Das Bindemittelsystem des *2003* entwickelten karolingischen Sichtmörtels besteht aus Weißportlandzement, Kompositzement mit natürlichem Puzzolan sowie Calciumhydroxid und Silicastaub. Als Gesteinskörnung wurden neben Quarzsand bzw. -kies insbesondere Ziegel- und Kalksteinsplitt mit einer Korngröße bis rd. 8 mm sowie Ziegelmehl eingesetzt. Dadurch, sowie durch nachträgliche Oberflächenbehandlung mittels Sandstrahlen zum Entfernen des Bindemittelschleiers, erhielt der Sichtmörtel sein charakteristisches Erscheinungsbild, vgl. Bild 3. Für die Instandsetzung des Natursteinmauerwerks der Taufkapelle (VFM20) bzw. der Chorhalle (VFM21, VFM22 und VFM23a/b) wurde das Bindemittelsystem beibehalten. Dagegen wurden die Gesteinskörnung bzw. das Größtkorn, die Pigmentierung (vgl. Abschnitt 4) sowie die Oberflächengestaltung (vgl. Abschnitt 7) an das jeweilige Bauwerk bzw. nach individuell festgelegten Anforderungen angepasst. Die Ziegel- und Kalksteinfraktionen wurden dabei durch Quarzmehl, -sand und -kies mit einer maximalen Korngröße von rd. 5,6 mm ersetzt. Dem Mörtel wurden zudem verschiedene leichte Gesteinskörnungen wie Blähglasgranulat etc. zugegeben, um ein auf das Natursteinmauerwerk abgestimmtes Trag- und Verformungsverhalten zu erreichen. Darüber hinaus wurden dem Mörtel Cellulosefasern sowie in geringem Maße (< 1,0 M.-%) Zusatzmittel zugesetzt, um wesentliche Frisch- und Festmörteleigenschaften wie die Verarbeitbarkeit oder das Verbundverhalten anwendungsbezogen einzustellen.

4 Optisches Erscheinungsbild

Aufgrund des hellen Bindemittelsystems ist es möglich, das farbliche Erscheinungsbild individuell auf den jeweiligen Anwendungsfall abzustimmen. So wurden dem „karolingischen“ Sichtmörtel Ziegelmehl für einen warmen, rötlichen Grundton beigemengt. Für die Farbgestaltung der auf den „karolingischen“ Sichtmörtel basierenden Verfugmörtel kamen Pigmente (Eisenoxide) zum Einsatz, welche in basischem Milieu beständig sind. Im Fall der Taufkapelle wurde der Trockenmörtelmischung des Verfugmörtels lediglich Eisenoxidschwarz zugegeben. Die farbliche Anpassung des Verfugmörtels für die Chorhalle auf die Farbe des Herzogenrather Sandsteins – im frisch gebrochenen bzw. bearbeiteten Zustand – erfolgte anhand einer systematischen Gelb-Schwarz-Rotabstufung, zunächst in zwei Serien mit jeweils konstantem Gelbanteil und variierenden Schwarzanteilen, vgl. Bild 4. Nach Auswahl einer vielversprechenden Gelb-Schwarz-Kombination (*C3b*) erfolgte die Zugabe von Eisenoxidrot, wiederum in verschiedenen Anteilen, siehe Bild 4. Die Auswahl der gewünschten Pigmentkombination (*C5k*) erfolgte am historischen Mauerwerk der Chorhalle, siehe Bild 5.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

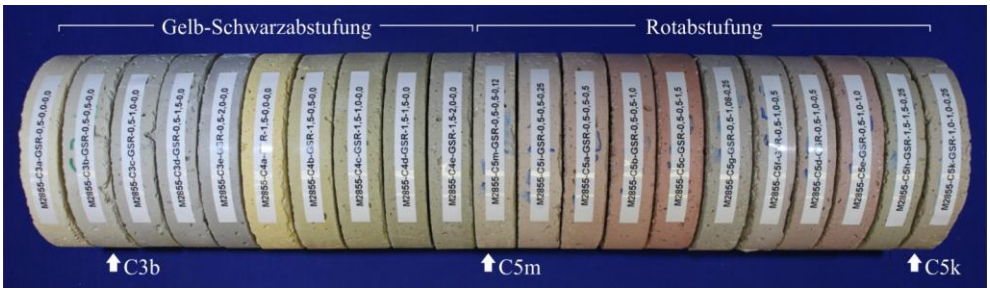


Bild 4 Systematische Variation der Pigmentzugabe beim Verfugmörtel VFM21 zur Abstimmung der Farbe auf den Herzogenrather Sandstein

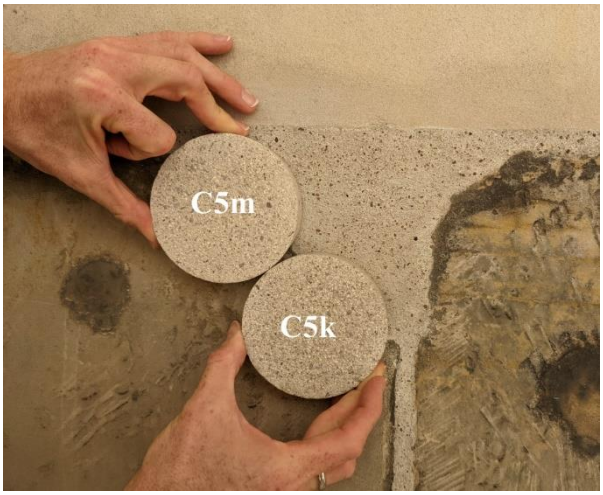


Bild 5 Auswahl der Farbe des Verfugmörtels VFM21 (*2021*) am historischen Mauerwerk

5 Eigenschaftswerte

Mit einer Druckfestigkeit von mind. rd. 5 N/mm² im Alter von 14 Tagen können die Verfugmörtel VFM20, VFM21, VFM22 sowie VFM23a/b in die Festigkeitsklasse M5 nach [13] eingeordnet werden. Die Mörtel weisen darüber hinaus eine Biegezugfestigkeit von rd. 2,0 N/mm², eine Zugfestigkeit von rd. 1,0 N/mm², einen statischen Elastizitätsmodul von rd. 3.750 N/mm² sowie eine Trockenrohdichte von rd. 1.300 kg/m³ – Mittelwerte aller Mörtel jeweils im Alter von 14 Tagen – auf.

Die kapillare Wasseraufnahme des Verfugmörtels VFM20 unter Atmosphärendruck beträgt rd. 19,9 M.-%. Bei einer Wasserbeaufschlagung bei rd. 150 bar beträgt die Wasseraufnahme rd. 30,2 M.-%. Der Verhältniswert aus kapillarer Wasseraufnahme zur Wasseraufnahme unter Druck – die theoretisch maximal mögliche Wasseraufnahme – entspricht dem Sättigungswert, vgl. [15]. Dieser beträgt rd. 0,66. Mörtel mit einem Sättigungswert < 0,70 gelten nach [8] als frostsicher. Bei der Beaufschlagung von (Verbund-)Prüfkörpern zeigten sich zudem keine sichtbaren Schädigungen an der Mörteloberfläche.

Wesentliche spezifische Eigenschaftswerte der für die Taufkapelle sowie die Chorhalle des Aachener Doms entwickelten Verfugmörtel sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

Tabelle 2 Eigenschaftswerte der entwickelten Verfugmörtel

Mörtel	Frischmörteleigenschaften				Festmörteleigenschaften					
	ρ_f	A	L	t	ρ_d	f_{fl}	f_t	f_d	E_{stat}	ε_S
	kg/dm³	mm	Vol.-%	d	kg/m³	N/mm²				‰
VFM20				14		2,1		5,5	3.890	-0,98
				28	1.340	2,0		6,3	3.980	-1,76
VFM21	1,52	121	14,0	14	1.300	1,5	1,0	5,0	3.480	-1,01
	1,54	122	13,2	28	1.300	2,7	1,3	6,4	4.260	-1,82
VFM22	1,42	122	14,5	14		1,8		5,4	3.390	-0,66
				28		3,0		6,4	3.590	-2,18
VFM23a	1,39	128	15,0	14		2,0		5,9	3.270	-1,17
				28	1.100	3,0	1,5	6,3	3.540	-2,29
VFM23b	1,33	119	25,0	14		2,7		5,7	4.730	-1,15
				28	1.200	2,5	1,5	6,6	5.010	-1,19

ρ_f Frischmörtelrohdichte in kg/dm³
A Ausbreitmaß in mm
L Luftporengehalt in Vol.-%
t Alter in d
ρ_d Festmörtelrohdichte in kg/m³
f_{fl} Biegezugfestigkeit in N/mm²
f_t Zugfestigkeit in N/mm²
f_d Druckfestigkeit in N/mm²
E_{stat} Statischer Elastizitätsmodul in N/mm²
ε_S Trocknungsschwindmaß in ‰ bzw. mm/m

6 Verbunduntersuchungen

Neben den in Abschnitt 5 zusammengestellten Eigenschaftswerten wurde ebenfalls der Haftverbund zwischen Verfugmörtel und Naturstein untersucht.

Der Verfugmörtel VFM20 erreicht in Kombination mit einem Haftvermittler im Verbund zu Grauwacke-Natursteinen Haftzugfestigkeitswerte von 0,35 N/mm² im Alter von 14 Tagen bzw. 0,41 N/mm² im Alter von 42 Tagen nach 28 Frost-Tau-Wärme-Zyklen nach [15], geprüft an Platten-Prüfkörpern.

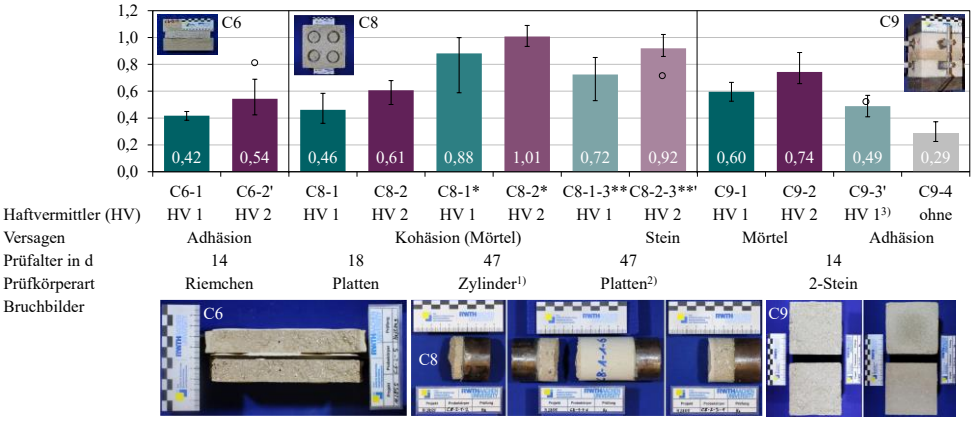
Der Verbund zwischen Herzogenrather Sandstein und dem Verfugmörtel VFM21 in Kombination mit zwei verschiedenen Haftvermittlern (HV 1 und HV 2) wurde in drei Serien an Verbundprüfkörpern verschiedener Geometrien untersucht. HV 2 beinhaltet gegenüber HV 1 mehr Kunststoffdispersionspulver (KDP). Wesentliche Merkmale der untersuchten Serien sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Nähere Erläuterungen werden im Rahmen des Forschungskolloquiums präsentiert.

Tabelle 3 Übersicht der durchgeführten Verbunduntersuchungen

Serie	Prüfkörperart	Geometrie
C6	Riemchen	Sandstein-Riemchen: jeweils 160 mm x 160 mm x 20 mm Mörtelfuge: 140 mm x 20 mm x 20 mm
C8	Platte	Sandstein-Platte: 200 mm x 200 mm x 60 mm Dicke der aufgetragenen Mörtelschicht: 20 mm
	Zylinder	Bohrkerne aus Platten C8-1 und C8-2 entnommen, Durchmesser 50 mm
C9	2-Stein	Sandstein-Platte: jeweils 100 mm x 100 mm x 40 mm Dicke der Mörtelfuge: 20 mm

Die Ergebnisse sind in Bild 6 veranschaulicht.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691



[1] Bohrkerne aus Platten C8-1 und C8-2 (*) [2] Nach 28 FTW-Zyklen nach DIN EN 13687-3:2002-05 (**) [3] Sandstein nicht vorgenässt
○ Prüfwert bei Mittelwert nicht berücksichtigt

Bild 6 Verbunduntersuchungen mit Herzogenrather Sandstein: (Haft-)Zugfestigkeitswerte der Serien C6 (Riemchen), C8 (Platte bzw. Zylinder) und C9 (2-Stein-Prüfkörper) in N/mm² sowie exemplarische Bruchbilder

Die Ergebnisse aller drei Serien zeigen, dass bei Verwendung des Haftvermittlers HV 2 sowohl höhere Haftzug- (vgl. Serie C6) als auch höhere Mörtelzugfestigkeiten gegenüber HV 1 erreicht werden, vgl. Serien C8 und C9. Der höhere Anteil KDP in HV 2 scheint neben der vernbesserten adhäsiven Wirkung des Haftvermittlers auch die Wasserretention des Mörtels zu begünstigen, sodass dieser höhere Festigkeiten ausbilden kann. Bei einem höheren Anteil an KDP wird vermutlich mehr Wasser inder Verbundzone zurückgehalten, welches dem Mörtel nachträglich zur Hydratation zur Verfügung steht. Es kann sich eine höhere Zugfestigkeit des Mörtels bzw. ein besserer Haftverbund zum Untergrund ausbilden.

Zugversuche am unbeeinflussten Mörtel, d. h. ohne Wasserabsaugen durch den Naturstein, an brikettförmigen Prüfkörpern nach ASTM C307-18 [16] haben gezeigt, dass die Zugfestigkeit im Alter von 14 Tagen bei 1,0 N/mm² liegt. Ein Vergleich mit Serie C9 zeigt, dass der Mörtel in Kontakt zum Sandstein den Wert von rd. 1,0 N/mm² nicht erreicht (0,60 N/mm² und 0,74 N/mm²) und somit nicht die volle Zugfestigkeit ausbildet. Durch den Naturstein wird dem Mörtel Wasser entzogen, das für die vollständige Hydratation benötigt wird.

Ein Vergleich der Serien C9-1 und C9-3‘ zeigt, dass der Verbund zwischen Sandstein und Verfugmörtel durch Vornässen deutlich verbessert werden kann. Es können rd. 20 % höhere (Haft-)Zugfestigkeitswerte erreicht werden. Während es bei Serie C9-3‘ (ohne Vornässen) überwiegend zu Adhäsionsversagen kam, konnte bei Verwendung eines Haftvermittlers eine im Vergleich zur Mörtelzugfestigkeit höhere Verbundfestigkeit erzielt werden. Ohne Haftvermittler (Serie C9-4) werden dagegen lediglich maximal halb so hohe Werte erreicht im Vergleich zu den Werten mit Haftvermittler und vorgenässten Sandsteinen.

7 Arbeitsablauf und Oberflächengestaltung

In Bild 7 sind schematisch die Arbeitsschritte bei der Instandsetzung von schadhaftem Mauerwerk dargestellt. Diese werden im Rahmen des Forschungskolloquiums am Beispiel der Taufkapelle und der Chorhalle näher erläutert. In Bild 8 sind die in diesem Beitrag beschriebenen Verfugmörtel gegenübergestellt.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

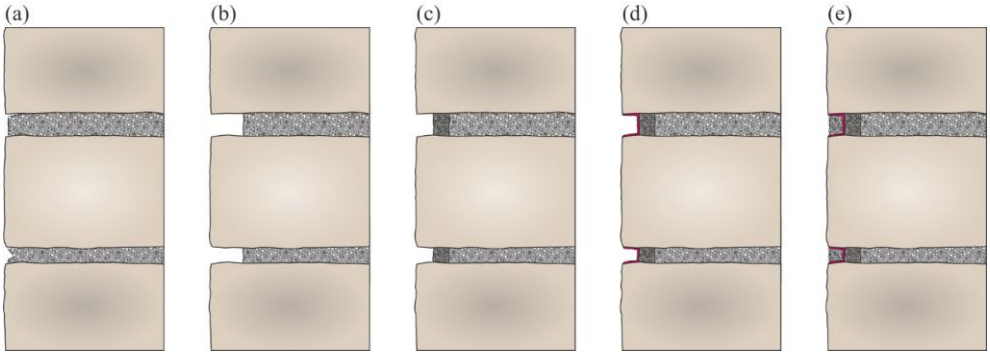


Bild 7 Schematischer Ablauf bei der Instandsetzung schadhafter Mauerwerkfugen: (a) Mauerwerk mit schadhaften Fugen (Flankenabrisse, Fehlstellen etc.), (b) ausgeräumte und gereinigte Fugen, (c) Einbringen der Unterfuge bis rd. 2 cm an die Vorderkante, (d) Auftragen des Haftvermittlers, (e) Einbringen des Verfugmörtels der Sichtfuge mit neuem Verfugmörtel und bei Bedarf Entfernen des Bindemittelschleiers z. B. mittels Wurzelhaarbürste, Sandstrahlen etc.

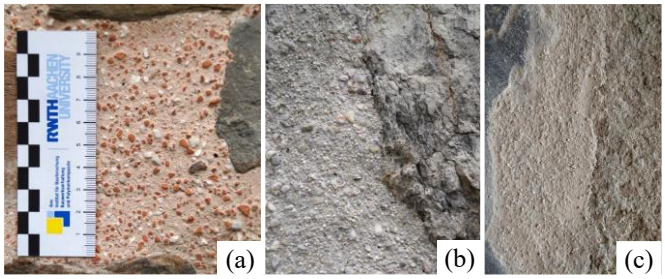


Bild 8 Vergleich der verschiedenen Verfugmörtel: (a) „Karolingischer“ Sichtmörtel (*2003*), (b) Verfugmörtel VFM20 Taufkapelle (*2020*) und (c) VFM21 Chorhalle Süd (*2021*)

Neben der unterschiedlichen Farbgestaltung wird ebenso der Effekt der unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen durch Sandstrahlen (a), Abreiben mittels Wurzelhaarbürste (b) bzw. Abreiben mit einem feuchten Schwamm (c) deutlich. Dabei richtet sich die gewählte Oberflächenbehandlung nach dem Bauwerk und den damit verbundenen Anforderungen. Das Karolingische Mauerwerk sowie das Mauerwerk der Taufkapelle sind teilweise frei zugänglich und somit von Nahem sichtbar. Diesen Mörteln wird durch die gewählte nachträgliche Oberflächengestaltung ein individuelles Erscheinungsbild verliehen. Dagegen ist das Fugenbild beim Mauerwerk der Chorhalle durch den vergleichsweise geringen Fugenanteil sowie die eingeschränkte Zugänglichkeit bzw. Lage von untergeordneter Rolle, weshalb auf aufwändigere Verfahren verzichtet wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden verschiedene Mörtel für die Instandsetzung des Aachener Doms und wesentliche Merkmale vorgestellt. Bei der Instandsetzung von historischem Mauerwerk gelten spezielle Anforderungen an (Fugen-)Mörtel und Ausführung. Dem Vornässen und der Nachbehandlung sind eine besondere Bedeutung beizumessen. Bei guter Vor- und Nachbehandlung in Verbindung mit einem geeigneten Haftvermittler werden gute Verbundeigenschaften zwischen bestehendem Natursteinmauerwerk und nachträglich eingebrachtem Verfugmörtel erzielt.

Neben weiteren Entwicklungen an den vorgestellten Verfugmörteln soll die Bauwerkserhaltung am Aachener Dom zukünftig digitalisiert werden. Mithilfe der Drohne des *ibacs*, welche mit einer programmierbaren Routenplanung für wiederkehrende, automatisierte Flüge ausgestattet ist, soll u. a. der Istzustand des Natursteinmauerwerks regelmäßig erfasst und der Zustand der Mörtelfugen und der Natursteine mithilfe eines zu entwickelnden Algorithmus kontinuierlich miteinander verglichen bzw. Veränderungen bewertet und Handlungsbedarf abgeleitet werden.

DOI: 10.18154/RWTH-2023-06691

9 Quellen

[1] *Engel, J.:* Eignungsversuche an Vergußmörtel für den Verbau von Naturstein. RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Aachen, Studienarbeit, 1996 (unveröffentlicht)

[2] *Engel, J.:* Vergußmörtel für den Steinaustausch in Natursteinmauerwerk, Rezeptierung und Eignungsnachweis. RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Aachen, Diplomarbeit, 1998 (unveröffentlicht)

[3] *Engel, J.; Rößler, G.:* Entwicklung eines Fugenvergussmörtels für den Natursteinaustausch am Dom zu Aachen. In: Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac), 1999, Nr. 9, Bauwerkserhaltung Festschrift Sasse, S. 327-338

[4] *Engel, J.; Rößler, G.:* Entwicklung eines Mörtels zur nachträglichen Verfugung beim Natursteinaustausch am Dom zu Aachen. Freiburg: AEDIFICATIO, 1999. - In: Werkstoffwissenschaft und Bauinstandsetzen. Berichtsband z. fünften Internationalen Kolloquium, Band II, Esslingen, Nov./Dec. 1999, (Wittmann, F.H.; Gerdes, A. (Ed.)), S. 915-926

[5] *Raupach, M.; Rößler, G.; Engel, J.:* Entwicklung eines Vergußmörtels für den Aachener Dom. Aachen: Institut für Bauforschung, 2001. - Forschungsbericht Nr. F 660

[6] *Blume, C.:* Entwicklung eines Steinergänzungsmörtels für Nievelsteiner Sandstein – Instandsetzung des Natursteins an der Matthias- und Anna-Kapelle des Aachener Doms. RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Aachen, Diplomarbeit, 2005 (unveröffentlicht)

[7] *Raupach, M; Rankers, R. Rößler, G Wolff, L.; Bruns, M.:* Dom zu Aachen – Untersuchungen des karolingischen Mauerwerks, Teil 1+2. Aachen, Institut für Bauforschung, 2002; Zwischenbericht Nr. F 6040

[8] *Gargoudi, M. E.:* Überprüfung der Eignung von zwei Verfugmörteln für die Instandsetzung des karolingischen Mauerwerks des Aachener Doms, RWTH Aachen University, Institut für Baustoffforschung (ibac), Aachen Diplomarbeit, 2003 (unveröffentlicht)

[9] *Raupach, M.; Rankers, R.; Gargoudi, M. E.:* Entwicklung eines Verfugmörtels für das karolingische Mauerwerk des Aachener Doms. Freiburg: AEDIFICATIO, 2003. - In: Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Proceedings of the Sixth International Conference, Karlsruhe, September 16-18, 2003, (Wittmann, F. H.; et al. (Ed.)), S. 613-622

[10] *Raupach, M.; Rankers, R.; Wolff, L.; Gargoudi, M. E.:* Entwicklung eines Verfugmörtels für den Aachener Dom. Weimar: Bauhaus-Universität 2003. - In: 15. Internationale Baustofftagung, - 24.-27. September 2003, Weimar, S. 1-1199-1-1211

[11] *Raupach, M.; Rankers, R.; Wolff, L.; Gargoudi, M. E.:* Analysis of the Existing Mortars and Development of a New Mortar for the Historic Masonry of the Carls Cathedral in Aachen. Stockholm: ICOMOS, 2004. - In: 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, June 27 - July 2, 2004, (Kwiatkowski, D.; et al (Ed.)), Vol. II, S. 1089-1096

[12] *Rankers, R.; Raupach, M.:* Die Sanierung des karolingischen Mauerwerks - Entwicklung und Anwendung eines Fugenmörtels. Worms: Werner, 2012. In: Die karolingische Pfalzkapelle in Aachen: Material - Bautechnik – Restaurierung, S. 263-270

[13] DIN EN 998-2:2017-02 Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 2: Mauermörtel; Deutsche Fassung EN 998-2:2016

[14] DIN EN 13687-3:2002-05 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren; Bestimmung der Temperaturwechselverträglichkeit - Teil 3: Temperaturwechselbeanspruchung ohne Tausalzangriff; Deutsche Fassung EN 13687-3:2002

[15] *Knöfel, D.; Schubert, P.:* Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege. Sonderheft aus der Publikationsreihe der MBFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Berlin, Ernst & Sohn, 1993

[16] ASTM C307-18. Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacings. ASTM International. West Conshohocken PA USA. 2018.