

## Ein Kalkeinpressmörtel für die Instandsetzung von Lehmbauten

Die Instandsetzung von Lehmbauwerken ist keine einfache Aufgabe. Der Baustoff Lehm hat vergleichsweise schwache mechanische Eigenschaften. Er ist außerdem anfällig gegenüber eindringendem Wasser, wobei er sehr schnell seinen Zusammenhalt verlieren kann, wenn gewisse Feuchtegehalte überschritten werden. Instandsetzungskonzepte für Bauwerke aus solchen Materialien stellen deshalb eine Herausforderung dar. Historische Lehmbauwerke zeigen oft Schäden in Form von starker Rissbildung, die durch statische oder dynamische Lasten hervorgerufen sein kann. Häufig werden solche Risse wegen mangelnder Fachkenntnis und/oder fehlender Techniken nur ungenügend instandgesetzt. Die Rissinstandsetzung mit Einpressmörteln birgt insbesondere für Lehmbaumaterialien eine Herausforderung und erfordert spezifische Anforderungen an den Einpressmörtel, wie z.B. niedriger Wassergehalt, gutes Wasserrückhaltevermögen, niedriges Schwindmaß, an das instandzusetzende Material angepasste Festigkeit und E-Modul sowie eine gute Haftung am Lehmuntergrund. Zusätzlich müssen Einpressmörtel eine ausreichende Fließfähigkeit aufweisen, um kleine Risse und Hohlräume ohne Entmischung zu füllen. Deshalb muss das rheologische Verhalten des Einpressmörtels gut untersucht und kontrolliert werden, um die gewünschte Wirkung zu erzielen [1].

Die Rissinstandsetzung bei Lehmbauwerken erfolgt traditionell durch manuelles Stopfen mit einem Mörtel. Natürlich können auf diese Weise nur Risse mit einer großen Breite verfüllt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass Risse, die durch dickere Wände verlaufen, nicht vollständig mit den für das Stopfen verwendeten Werkzeugen erreicht werden können. Kalkgebundene Einpressmörtel für Lehmbaumaterialien werden gewöhnlich für die Wiederbefestigung von Putzen und weniger aus statisch-konstruktiven Gründen eingesetzt [2] [3].

Aufgrund der Eigenschaften von Lehm, müssen Einpressmörtel auf Basis von hydraulischem Kalk nach EN 459-1 [4] wesentliche Anforderungen an eine Reihe von Eigenschaften erfüllen, die sich auf die Verträglichkeit, die Dauerhaftigkeit und insbesondere die Injektionsfähigkeit beziehen. Das Ziel der vorgestellten Untersuchungen war einen Einpressmörtel zu herzustellen, mit dem die strukturelle Kontinuität in Lehmmauerwerk oder anderen massiven Lehmwänden (Stampf- und Wellerlehm) durch Rissverpressung wiederhergestellt werden kann. Das Material bestand aus Kalkhydrat mit Zusätzen von Puzzolanen und Kalksteinfüller.

### Prüfverfahren und Ausgangsstoffe

#### Ansatz und Anforderungen

Gemäß den Anforderungen an eine Instandsetzungsmaßnahme müssen die Bestandteile eines Einpressmörtels dauerhaft sowie miteinander und mit dem Originalmaterial verträglich sein [5]. Der Einpressmörtel muss außerdem die erforderliche Festigkeit aufweisen, die im Falle der Instandsetzung von Lehmbauten regulierbar sein sollte. Das Entwicklungskonzept für einen geeigneten Einpressmörtel basierte deshalb auf Kalkhydrat mit Zusatz von Puzzolanen. Kalkbasierte Einpressmörtel weisen viele Vorteile auf:

- die Qualität der Ausgangsstoffe schwankt nicht (bei Verwendung industriell hergestellter Produkte),
- die Mörtelmischung kann an die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Lehms angepasst werden,
- die Dauerhaftigkeit ist wenigstens so hoch wie die des Lehms.

Von größter Wichtigkeit ist jedoch der Haftverbund zwischen Kalkmörtel und Lehm, der von mehreren Variablen abhängt, z.B. Zustand der Rissflanken, Porosität des Lehms, Wasserrückhaltevermögen des Einpressmörtels. Für die tatsächliche Entwicklung

Eigenschaft	Qualitative Beschreibung	Parameter
Setzfließmaß (Hägermann-Konus)	Hoch	$\geq 25$ cm
Wasserrückhaltevermögen	Hoch	$> 95\%$
Haftzugfestigkeit	Gut	$> 0.05$ N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	Kompatibel mit Lehmmauerwerk	$< 1500$ N/mm <sup>2</sup>
Druckfestigkeit	Kompatibel mit Lehmmauerwerk	$< 4$ N/mm <sup>2</sup>
Chemische und mechanische Verträglichkeit	Gut	Keine Salzausblühungen

Tabelle 1. Geforderte Leistungsparameter des Einpressmörtels für Lehmmauerwerk

wurden darum Zielwerte definiert. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die geforderten Eigenschaften des Einpressmörtels.

### Mischungsbestandteile

Es war wichtig, Ausgangsstoffe zu verwenden, die leicht erhältlich und preiswert sind und industriellen Qualitätsstandards entsprechen. Die folgenden Materialien wurden für die Entwicklung der Mörtelmischungen ausgewählt:

- industrielles Kalkhydrat (CH),
- Silikastaub (SF)
- Steinkohlenflugasche (FA),
- Kalksteinfüller (LS).

Um die geforderten Eigenschaften des Einpressmörtels zu erreichen wurden im Wesentlichen zwei Zusatzmittel eingesetzt:

- Fließmittel (SP) auf Polycarboxylathether-Basis (PCE) zur Verbesserung der Fließfähigkeit,
- gemahlenes Kaolin zur Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens.

Flachsfasern wurden als Bewehrung eingesetzt, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern und um Rissbildung zu begrenzen. Die Zielwerte für die mechanischen Eigenschaften des Einpressmörtels wurden entsprechend der niedrigen Festigkeiten von Lehmstoffen eingestellt, insbesondere der E-Modul.

### Prüfverfahren

Tabelle 2 zeigt die Prüfverfahren für die Charakterisierung der Frisch- und Festmörteleigenschaften. Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden in dieser Phase nicht durchgeführt. Der Widerstand von Lehm gegenüber wechselnder Befeuchtung/Trocknung, Frost-

Tabelle 2. Prüfverfahren

Eigenschaft	Prüfverfahren, Norm
Dichte des Ausgangsstoffs	He-Pyknometrie, DIN 66137-2 [8]
Phasenzusammensetzung des Ausgangsstoffs	Pulverröntgenbeugungsanalyse (XRD)
Chemische Zusammensetzung des Ausgangsstoffs	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
Partikelgrößenanalyse des Ausgangsstoffs	Lasergranulometrie
Reaktivität der puzzolanischen Ausgangsstoffe	Isotherme Wärmeflusskalorimetrie
Packungsdichte und Wasseranspruch der Mischungen	Puntkeversuch [9]
Erstarrungszeiten	Vicat-Nadelpenetration (EN 196-3) [10]
Trocknungsschwinden des Mörtels	DIN 52450 [11]
Setzfließmaß des Frischmörtels	EN 1015-3 [12]
Druck- und Biegezugfestigkeit des erhärteten Mörtels	EN 1015-11 [13]
Festmörteldichte	EN 1015-10 [14]
Haftzugfestigkeit (auf Lehmstein)	EN 1015-12 (modifiziert) [15]
Wasserrückhaltevermögen	EN 413-2 [16]

Material	Eigenschaften
Calciumhydroxid (industrielle Güte)	Hauptbestandteil: Ca(OH) <sub>2</sub> , Spuren: Kalzit
Silikastaub (SF)	Hauptbestandteil: amorphes SiO <sub>2</sub> ; Spuren: Kohlenstoff
Flugasche (FA)	Nach EN 450-1 [17]; Hauptbestandteile: Glass, Nebenbestandteile: Quarz, Mullit, Maghemit
Limestone filler (LS)	Hauptbestandteil: Kalzit, Spuren: Quarz, Feldspat
Fließmittel (SP)	Auf Basis von Polycarboxylatether (PCE)
Kaolin (gemahlen)	Erhöhung des Wasserrückhaltevermögens; Hauptbestandteil: Kaolinit, Nebenbestandteile: Quarz, Feldspat, Glimmer
Fasern	Maximale Faserlänge: 5 mm; Faserart: Flachs

Tabelle 3 Eigenschaften der Mörtelkomponenten

Mischung	Calciumhydroxid (CH)	Silikastaub (SF)	Flugasche (FA)	Klksteinfüller (LS)	Wasser/Feststoff-Verhältnis (massbezogen)
4	22.5	7.5	20	50	0.30
5	13.5	4.5	12	70	0.30
6	12.0	3.0	15	70	0.30

Tabelle 4 Zusammensetzung der Einpressmörtelmischungen 4, 5 und 6 in M.-%.

Tau oder Salzkristallisation/-lösung ist sehr gering und bei direkter Einwirkung dieser Einflüsse wird bei den meisten nicht-stabilisierten Lehmbaustoffen ein Versagen bereits nach wenigen Wechselbeanspruchungen auftreten. Der Fokus der Untersuchungen wurde deshalb auf die Prüfung der mechanischen Eigenschaften des Einpressmörtels und der damit verpressten Lehmbaustoffe gelegt. Die chemische Verträglichkeit wurde gewährleistet durch die Verwendung von Mörtelbestandteilen, die keine oder nur geringe Mengen an löslichen Ionen (z.B. Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

enthielten. Einzelheiten über die Mörtelprüfungen können [6] entnommen werden. Die Wirksamkeit der Rissverpressung wurde anhand von Diagonal-Druckversuchen vor und nach dem Verpressen überprüft. Details hierüber finden sich in [7].

### Ergebnisse und diskussion

#### Ausgangsstoffe und Mörtelentwicklung

In Tabelle 3 sind die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Mörtelkomponenten aufgelistet.

Abb. 1 Setzfließmaße des Einpressmörtels (Mischung 6) in Abhängigkeit des Fließmittelgehalts für zwei verschiedene Wasser/Feststoff-Verhältnisse (w/s) und für w/s = 0,30 mit und ohne Flachsfasern.

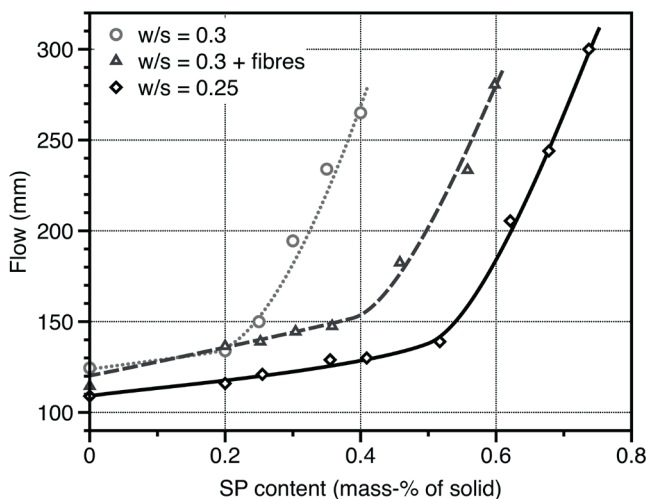
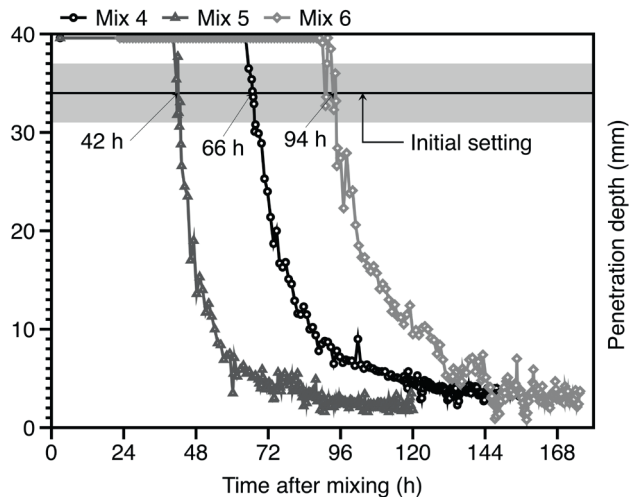


Abb. 2 Ergebnisse der Erstarrungsprüfungen für die Mischungen 4 bis 6 (w/s = 0,30)



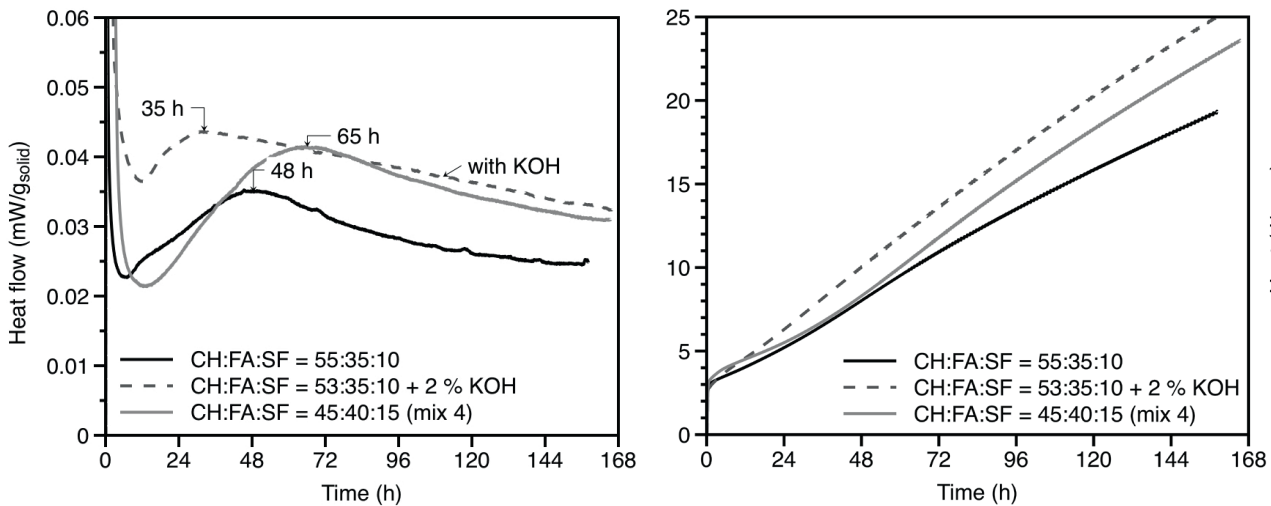


Abb. 3 Wärmefluss (a) and Wärmefreisetzung (b) in der isothermen Wärmeflusskalorimetrie

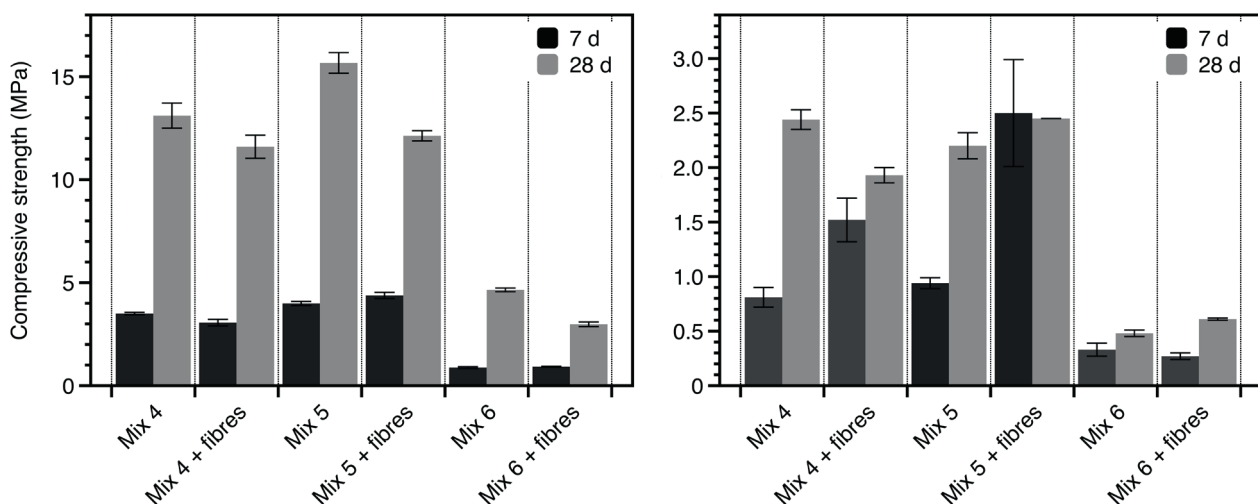
Für die Entwicklung einer Mörtelzusammensetzung mussten gut abgestimmte Anteile der vier grundlegenden Mischungsbestandteile definiert werden. Dafür wurde der Ansatz verfolgt, eine Zusammensetzung mit einem möglichst kleinen Wasseranspruch zu finden. Das Punkte-Verfahren [9] stellt hierfür ein schnelles und einfaches Werkzeug dar, mit dem die Bestimmung des Wassergehalts eines Partikelgemisches beim Übergang in den plastischen Zustand erfolgt. Auf diese Weise wurden sechs verschiedene Mischungszusammensetzungen festgelegt. Von diesen sechs Mischungen wurden wiederum drei Zusammensetzungen mit dem niedrigsten Wasseranspruch für die weiteren, in die Tiefe gehenden Untersuchungen ausgewählt (Tabelle 4). Mischung 6 wies den niedrigsten Wasseranspruch auf.

Die Fließeigenschaften der Einpressmörtel wurden im Wesentlichen über das Wasser/Feststoff-Verhältnis (w/s-Wert) und die Zugabemenge des Fließmittels

(SP) geregelt. In Abbildung 1 sind die Setzfließmaße der Mischung 6 für zwei verschiedene w/s-Werte (mit und ohne Fasern) in Abhängigkeit des SP-Gehalts dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bis zu einem bestimmten Fließmittelgehalt die Veränderungen des Fließverhaltens minimal sind. Ab diesem Fließmittelgehalt erhöht sich das Setzfließmaß der Mörtelmischen drastisch. Ein niedriger w/s-Wert führte zu einem verringerten Setzfließmaß und einem höheren Fließmittelanpruch. Fasern erhöhten die für die Fließfähigkeit erforderliche Fließmittelmenge. Ausgehend von den Ergebnissen der Fließversuche wurde der Fließmittelgehalt auf 0,4 bis 0,7 M.-% bezogen auf die Trockenmasse des Mörtels mit einem w/s-Wert von 0,30 festgelegt, was eine gute Kontrolle von Fließ- und Einpressfähigkeit innerhalb des gewünschten Konsistenzbereichs ermöglichte. Fließversuche mit verschiedenen Faser-

Abb. 5 Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mischungen 4 bis 6



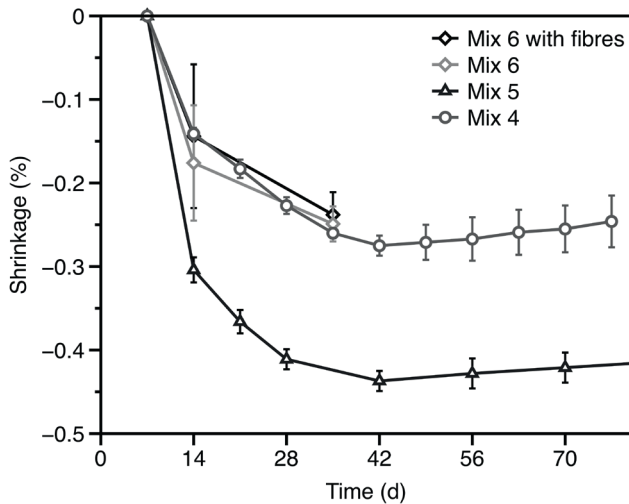


Abb. 4 Trocknungsschwinden der Mischungen 4, 5 und 6 (Mittelwert aus 6 Proben, Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen)

mengen resultierten in einem optimalen Fasergehalt von 0,2 M.-% bezogen auf die Feststoffe.

### Grundlegende Kenngrößen

#### – Erstarrungszeiten

Bei allen Mischungen betrug der w/s-Wert auf 0,30 und die Konsistenz wurde durch entsprechende Fließmitteldosierung auf ein Setzfließmaß von 25 cm eingestellt. Abbildung 2 illustriert die Ergebnisse der Erstarrungsprüfungen für die Mischungen 4, 5 und 6.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Erstarrungsbeginn nach 42, 66 bzw. 94 Stunden eintrat. Diese recht langen Erstarrungszeiten wurden nicht als problematisch für den Einpressmörtel angesehen. Die unterschiedlichen Erstarrungszeiten der einzelnen Mischungen wurden durch die verschiedenen Zuga-

bemengen an Silikastaub (SF), Kalkhydrat (CH) und Flugasche (FA) beeinflusst. Mischung 6 mit dem niedrigsten SF- und mittlerem FA-Gehalt (Tabelle 4) zeigte deshalb die langsamste Erstarrung. Mischungen 4 und 5 hatten das gleiche SF/CH-Verhältnis (= 0,33), aber Mischung 5 erstarrte am schnellsten aufgrund ihres niedrigen FA-Gehalts.

Um die Reaktivität der Puzzolane Silikastaub (SF) und Flugasche (FA) zu beurteilen, wurde die Reaktionswärme von Gemischen mit Kalkhydrat (CH) mit der isothermen Wärmeflusskalorimetrie gemessen. Dabei wurden drei Proben mit den folgenden Mischungsanteilen (in M.-%) untersucht:

- CH:FA:SF = 55:35:10,
- CH:FA:SF = 53:35:10 und 2% Kaliumhydroxid (KOH),
- CH:FA:SF = 45:40:15 (Mischung 4).

Abbildung 3 zeigt den Wärmefluss (a) und die freigesetzte Wärmemenge (b) der drei Gemische. Das Bindemittelgemisch mit niedrigem CH- und hohem SF- und FA-Gehalt (Mischung 4) zeigte eine stärker ausgeprägte Ruheperiode und einen steileren Anstieg des Wärmeflusses (Beschleunigungsperiode), auch wenn die insgesamt freigesetzte Hydratationswärme höher war als bei der Mischung mit niedrigerem SF-Gehalt. Der Maximalwert der Wärmefreisetzung tritt bei der Mischung 4 annähernd gleichzeitig mit dem Erstarrungsbeginn auf (Abbildung 2). Dies deutet darauf hin, dass höhere Zugabemengen an SF und FA insgesamt die hydraulischen Reaktionen verstärken, sie aber nicht unbedingt beschleunigen.

Abb. 6 Beispiel für eine Spannungs-Dehnungskurve (Mischung 6 mit und ohne Fasern)

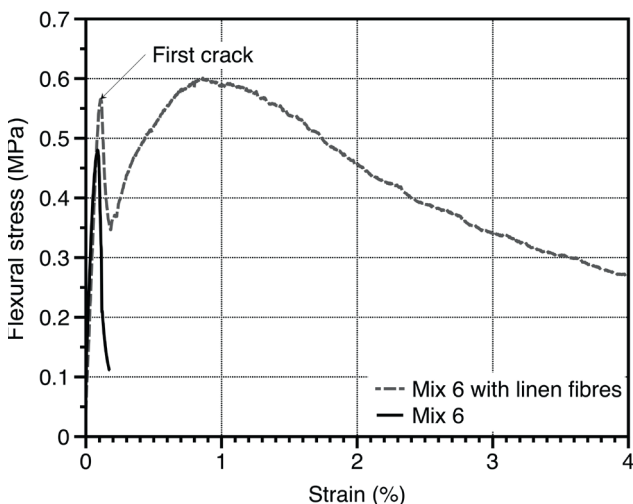
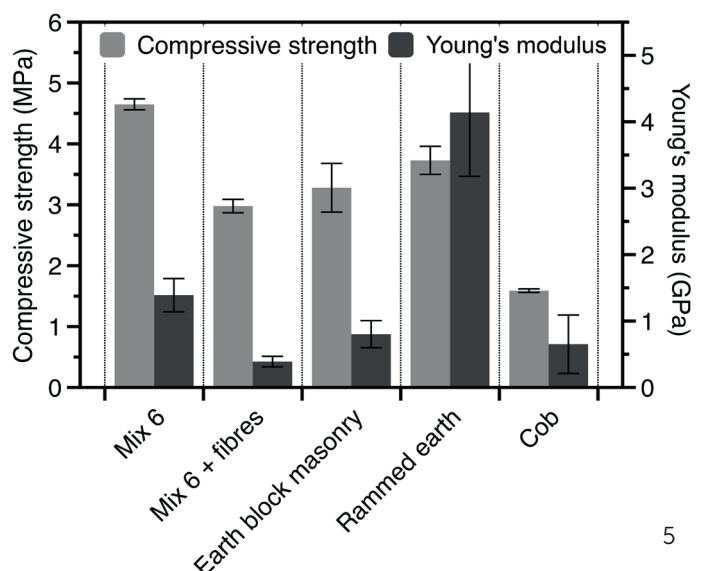


Abb. 7 Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Einpressmörtel Mischung 6 mit verschiedenen Lehmbauweisen.



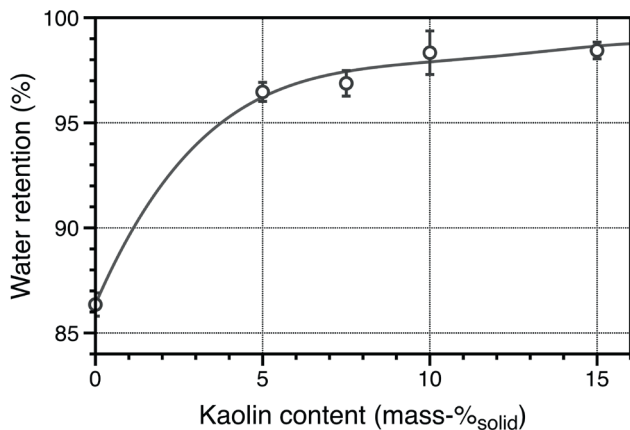


Abb. 8 Anstieg des Wasserrückhaltevermögens der Mörtelmischung 6 (ohne Fasern) durch Zusatz von Kaolin

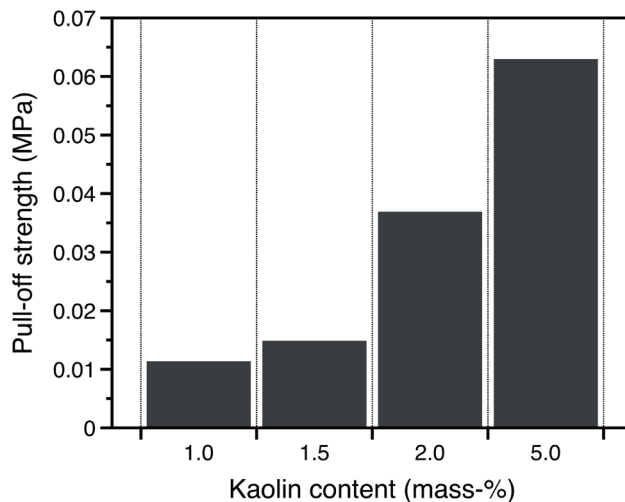


Abb. 9 Haftzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Kaolingehalt (bez. auf die Trockenmasse)

**– Trocknungsschwinden**

Die Schwindkurven in Abbildung 4 zeigen die höchsten Werte für die Mischung 5. Mischungen 4 und 5 zeigten in etwa das gleiche Schwindverhalten.

Nach 28 Tagen betrug das Trocknungsschwindmaß bei allen Mischungen weniger als 0,5%. Fasern in Mischung 6 trugen nur zu einer Schwindreduzierung von etwa 5% im Vergleich zur gleichen Mischung ohne Faserzugabe bei. Die Ergebnisse belegen, dass ungeachtet der feinen Bestandteile des Einpressmörtels das Trocknungsschwinden nicht so hoch ist wie bei Lehmörteln. Zum Vergleich: ein reiner Lehmörtel hätte ein viel höheres Schwindmaß. Bei Lehmputzen ist bekannt, dass das Schwindmaß eines Putzes mit hohem Feinanteil im Bereich von 1 bis 5% liegt [18].

Tabelle 5 Mischungszusammensetzung des Einpressmörtels

Komponent	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Gehalt g/kg	Gehalt kg/m <sup>3</sup>
Calciumhydroxid	2240	106	196
Silikastaub	2000	46	85
Flugasche	2220	106	196
Kalksteinfüller	2750	458	846
Kaolin	2370	46	85
Wasser	1000	230	425
Fließmittel	1050	8	15
Gesamt	-	1000	1846

**– Mechanische Eigenschaften**

Biegezug- und Druckfestigkeiten der Mischungen 4, 5 und 6 sind in Abbildung 5 wiedergegeben. Die Prüfungen wurden an Proben mit und ohne Flachfasern durchgeführt. Die Entwicklung der Druckfestigkeit zeigte hohe Werte bei den Mischungen 4 und 5 nach 28 Tagen. Mischung 6, die einen niedrigeren Silikastaubgehalt aufwies, hatte jedoch eine deutlich geringere Festigkeit. Fasern reduzierten die Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei allen Mischungen. Die Biegezugfestigkeit war bei den Mischungen 5 und 6 nach 28 Tagen nur leicht erhöht. Bei der Mischung 4 war sie im Vergleich zu den Proben ohne Fasern verringert. Die Fasern verbesserten jedoch deutlich

Tabelle 6 Frisch- und Festmörteleneigenschaften des Einpressmörtels (Zahlen in Klammer geben die Standardabweichung wieder)

Eigenschaft	Nachbehandlungsdauer Tage	Wert
Setzfließmaß	cm	25
Rohdichte	7	1863 (20)
	28	1657 (16)
Druckfestigkeit	7	0.88 (0.04)
	28	4.65 (0.09)
Biegezugfestigkeit	7	0.33 (0.06)
	28	0.48 (0.03)
E-modul	7	60 (10)
	28	1390 (250)
Haftzugfestigkeit	MPa	0.06
Trocknungsschwinden %	7	0.18
	28	0.25

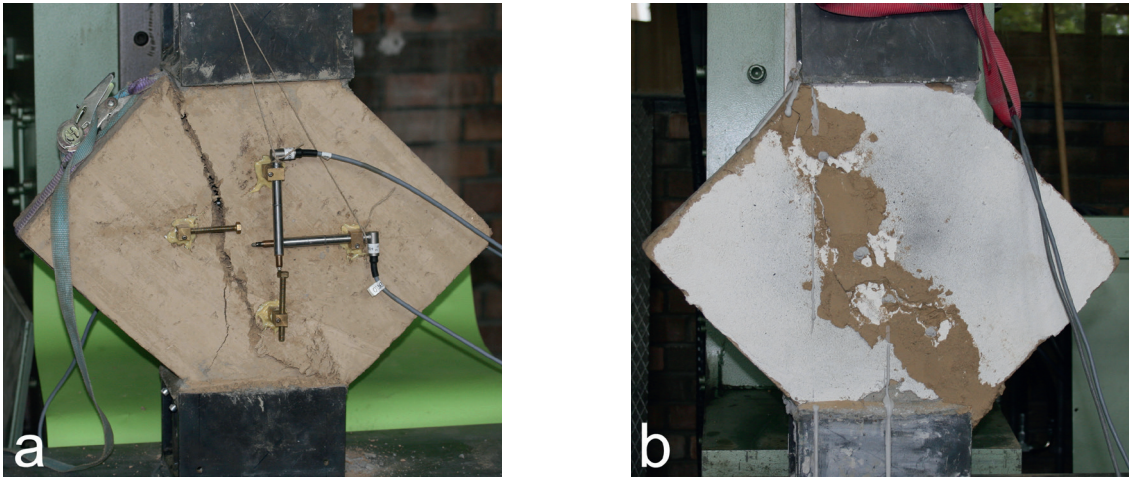


Abb. 10 Wellerlehm-Wandprüfkörper nach Diagonaldruckbelastung (a) und nach dem Verpressen (b)

die Nachbruchbiegezugverhalten (Duktilität) der Einpressmörtel (Abbildung 6).

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Lehmmauerwerk, Stampflehm und Wellerlehm [7] mit denen von Mischung 6. Daraus ist ersichtlich, dass die Mischung 6 sowohl mit als auch ohne Zugabe von Fasern in den Festigkeitsbereich aller drei typischen Lehmbauweisen fällt. Aus diesem Grund wurde lediglich Mischung 6 als mechanisch verträglich mit Lehmstoffen angesehen.

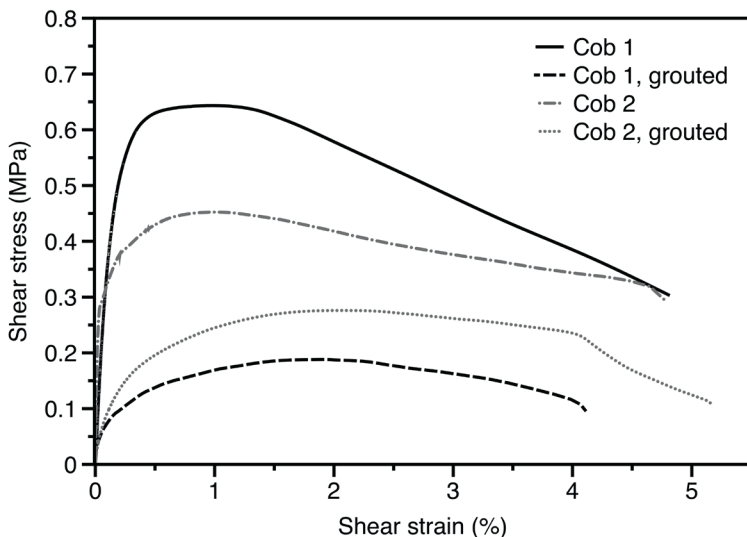
**– Wasserrückhaltevermögen und Haftzugfestigkeit**

Das Wasserrückhaltevermögen des Einpressmörtels ist entscheidend für das Verbundverhalten mit dem Lehm. Ist es niedrig, wird dem Mörtel Wasser entzogen, was zu hohem Schwinden und Rissbildung

in der Grenzfläche zwischen Mörtel und Untergrund und somit zu Verbundverlust führt. Dem hydraulischen Kalkmörtel würde außerdem nicht genügend Wasser für die puzzolanische Reaktion zur Verfügung stehen, was zu einer unvollständigen Hydratation und niedriger Festigkeit führen würde.

Zur Kontrolle des Wasserrückhaltevermögens im Mörtel wurde ein Zusatz in Form von gemahlenem Kaolin eingesetzt. Die Ergebnisse der Prüfungen mit der Mischung 6 zeigten, dass nur 86% des Wassers im Mörtel zurückgehalten werden, wenn kein Kaolin zugesetzt wird (Abbildung 8). Mit 10 M.-% Kaolin steigt das Wasserrückhaltevermögen auf 98 M.-%. Mit Zunahme des Wasserrückhaltevermögens wurde auch die Haftverbund verbessert, wie die Ergebnisse der Haftzugprüfungen zeigten (Abbildung 9).

Abb. 11 Spannungs-Dehnungskurven von ungeschädigten und verpressten Wandprüfkörpern aus Wellerlehm unter Diagonaldruckbelastung.  $\tau_u$  = Schubfestigkeit,  $G_{1/3}$  = Schubmodul, und  $\gamma_{1/3}$  = Schubdehnung, gemessen bei 1/3 der Maximalbelastung



Original cob panels:  
 $T_u = 0.49$  (0.09) MPa  
 $G_{1/3} = 552$  (396) MPa  
 $\gamma_{1/3} = 0.036$  (0.013) MPa  
 Results from 4 panels

Grouted cob panels:  
 $T_u = 0.23$  (0.06) MPa  
 $G_{1/3} = 94$  (2) MPa  
 $\gamma_{1/3} = 0.083$  (0.024) MPa  
 Results from 2 panels

## Mörtelzusammensetzung

Die endgültige Zusammensetzung des Einpressmörtels basierte auf den vorangehend beschriebenen Versuchsergebnisse und ist in Tabelle 5 dargestellt.

Gemäß EN 459-1 [4] kann der Einpressmörtel als hydraulischer Kalk HL2 bezeichnet werden. Die Fasern kontrollieren die Rissbildung im Einpressmörtel und können optional für das Verpressen von Rissen größer als 5 mm zugesetzt werden. Da sie üblicherweise das Fließvermögen des Mörtels verringern, kann eine Anpassung der Fließmittelmenge erforderlich sein, ohne dass der Wassergehalt erhöht wird. Die Frisch- und Festmörteleigenschaften des Einpressmörtels sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

## Rissverpressung in Lehmprüfkörpern

Die entwickelte Zusammensetzung des Einpressmörtels wurde an Wandprüfkörpern aus Wellerlehm überprüft. Der Wellerlehm wurde durch Vermengen von Lehm mit Stroh zu einer plastischen Masse hergestellt. Risse in den Wandprüfkörpern wurden durch Diagonaldruckbelastung gemäß ASTM E 519-10 [19] induziert. Die Risse bestanden zumeist aus einem Hauptriss mit einigen kleineren Verzweigungen (Abbildung 10a). Im nächsten Schritt wurden alle Risse an der Oberfläche mit Gips und Lehmputz verschlossen (Abbildung 10b) um das Auslaufen des Einpressmörtels beim Verpressen zu verhindern. Einzelheiten zur Vorgehensweise werden in [6] berichtet.

Um festzustellen, in welchem Maß die Schubfestigkeit  $\tau$  der Wellerlehm-Wandprüfkörper durch das Verpressen im Vergleich zur ursprünglichen Schubfestigkeit wiederhergestellt werden konnte, wurden die Prüfkörper erneut einer Diagonaldruckprüfung unterzogen. Nach dem Verpressen wurden die Wandprüfkörper für mindestens 28 Tage bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchte gelagert. Insgesamt wurden vier ungeschädigte und zwei verpresste Wellerlehm-Wandprüfkörper geprüft.

Die Prüfung der verpressten Wandprüfkörper zeigte, dass das Versagen in den verpressten Rissen auftrat, aber auch neue Risse gebildet wurden. Die Flanken der verpressten Risse waren mit einer dünnen Schicht von Mörtel bedeckt, was auf eine gute Verteilung des Mörtels im Rissystem hindeutet.

Ergebnisse der Diagonaldruckversuche an ungeschädigten und verpressten Wandprüfkörpern sind

in Abbildung 11 dargestellt. Die Schubfestigkeit der verpressten Wandprüfkörper lag deutlich unter der der ungeschädigten. In einem Fall wurden 20%, im zweiten Fall 45% der Schubfestigkeit der ungeschädigten Wandprüfkörper erreicht. Die Wandprüfkörper wurden mit einem Mörtel verpresst, der keine Fasern enthielt. Der Zusatz von Fasern kann die Schubfestigkeit des Einpressmörtels erhöhen. Weitere Untersuchungen müssten hierzu aber noch durchgeführt werden..

## Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen zeigten gute Eigenschaften des entwickelten Einpressmörtels auf Basis von Kalkhydrat. Kritische Parameter waren Festigkeitsentwicklung, Schwinden Wasserrückhaltevermögen und Verbundverhalten des Einpressmörtels, die ausreichend an die meisten Lehmbaumstoffe angepasst werden können. Anforderungen an die Festigkeit des Einpressmörtels können durch Veränderung der Zugabemenge von Silikastaub erfüllt werden (in diesem Fall müssen Festigkeitsprüfungen zur Kontrolle durchgeführt werden). Die Fließeigenschaften des Einpressmörtels können stark variieren, wenn die Ausgangsstoffe von unterschiedlichen Quellen bezogen werden. Diese Unterschiede betreffen vor allem die Steinkohlenflugasche und den Kalksteinfüller, die eine eher große Bandbreite der Korngrößenverteilung und somit des Wasseranspruchs haben können. In jedem Fall muss die Fließfähigkeit durch die Fließmittelmenge mit Hilfe von Fließversuchen, z.B. mit dem Hägermann-Konus, eingestellt werden, was sogar auf der Baustelle geschehen kann. Injektionsversuche belegten die gute Verarbeitbarkeit des Einpressmörtels. Große Risse wurden vollständig, Risse mit einer Breite < 0,5 mm wurden zumindest teilweise verfüllt.

Anhand der mechanischen Prüfungen wurden deutlich, dass das Verpressen von Rissen alleine keine ausreichende Instandsetzungsmaßnahme darstellt, wenn ein Bauwerk Schub- und Zugbelastungen ausgesetzt ist. In diesem Fall müssen zusätzliche Ertüchtigungen vorgenommen werden, wie z.B. Polymergitterbewehrungen [20], glasfaserverstärkte Kunststoffbänder [21] oder Eckverbindungen [22]. Das Verpressen der Risse dient dann dazu, die Lasten gleichmäßig auf alle Bereiche eines Bauteils zu verteilen.



## Danksagung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des von der EU finanzierten Projekts NIKER (grant agreement No. 244123, [www.niker.eu](http://www.niker.eu)) durchgeführt. Die Autoren danken Herrn André Gardei, Herrn Christian Braasch und Frau Dr Gabriela Helena Marcano Romero für ihre wichtige Unterstützung in Versuchsaufbau und -durchführung.

## Referenzen

- [1] Bras AMA, Henriques F, Cidade MT. Effect of environmental temperature and fly ash addition in hydraulic lime grout behaviour. *Constr Build Mater* 2010;24:1511–17.
- [2] Matero FG. A programme for the conservation of architectural plasters in earthen ruins in the American Southwest: Fort Union National Monument, New Mexico, U.S.A. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 1995;1:5–24.
- [3] Matero, FG, Bass A. Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the reattachment of lime plasters on earthen walls. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 1995;1:97–108.
- [4] EN 459-1. Building lime – Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, 2015.
- [5] ICOMOS: Charter – Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, 2003.
- [6] Müller U, Miccoli L, Fontana P. Development of a lime based grout for cracks repair in earthen constructions. *Constr Build Mater* 2016;110:323–332.
- [7] Miccoli L, Müller U, Fontana P. Mechanical behaviour of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Constr Build Mater* 2014;61:327–39.
- [8] DIN 66137-2. Determination of solid state density–Part 2: Gas pycnometry, 2004.
- [9] Puntke W. Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken (Water demand of fine granular materials). *Beton* 2002;52:242–48.
- [10] EN 196-3. Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, 2009.
- [11] DIN 52450. Testing of inorganic non-metallic building materials; determination of shrinkage and expansion on small specimens, 1985.
- [12] EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2007.
- [13] EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 2007.
- [14] EN 1015-10. Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, 2007.
- [15] EN 1015-12. Methods of test for mortar for masonry - Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, 2007.
- [16] EN 413-2. Masonry cement–Part 2: Test methods, 2005.
- [17] EN 450-1. Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, 2002;
- [18] Müller U, Ziegert C, Kaiser C, Röhlen U. Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk (Properties of industrially produced earthen building). *Mauerwerk* 2012;16:17–28.
- [19] ASTM E 519–10. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages, 2010.
- [20] Illampas R, Ioannou I, Charmpis DC. Overview of the pathology, repair and strengthening of adobe structures. *Int J Archit Herit* 2013;7(2):165–188.
- [21] Bhattacharya S, Nayak S, Dutta SC. A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 2014;7:51–67.
- [22] Michiels TLG. Seismic retrofitting techniques for historic adobe buildings. *Int J Archit Herit* 2014, DOI: 10.1080/15583058.2014.924604.

