

## Bewertung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Lehmputzen mit Kuhdung – eine traditionelle Lösung für den Lehmbau in Brasilien

In verschiedenen Teilen Südamerikas gibt es Belege für Bauwerke, die von alten Kulturen mit Lehmbautechniken errichtet wurden und Jahrtausende zurückreichen. In Brasilien geht man jedoch davon aus, dass Lehmbautechniken während der Kolonialzeit (ab dem frühen 6. Jahrhundert) eingeführt wurden, da es keine Beweise dafür gibt, dass die indigene Bevölkerung Brasiliens Lehm als Baumaterial verwendete (Rezende et al., 2013).

Seit jener Zeit hat sich der Lehmbau im ganzen Land verbreitet und wird auch heute noch praktiziert. Im Laufe der Entwicklung wurden verschiedene Zusätze und Zuschläge genutzt, um Lehmbauten beständiger zu machen, wobei lufthärtender Kalk als einer der geeignetsten Stabilisatoren für Lehmbauten gilt.

Lehmputzmörtel werden entweder aus einer vorgefertigten Mörtelmischung oder aus gesiebter, mit Wasser vermischter Erde hergestellt. Die aus dem Boden gewonnene Erde besteht aus Lehm, Schluff, Sand und groben Agglomeraten. Die groben Agglomerate werden durch das Sieben entfernt, und die verbleibenden feineren Körnungen sind mit der Putzstärke kompatibel. Wenn der Tonanteil vergleichsweise hoch ist, kann zusätzlich Sand hinzugefügt werden, um die Mischung magerer zu machen. Die Eigenschaften von Lehmmörteln hängen stark von der Art und dem Gehalt des enthaltenen Tons ab (Lima et al., 2020).

Faria (2004) führt aus, dass Kalziumhydroxid ( $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ), der Hauptbestandteil des Luftkalks, kovalente Bindungen mit den Hydroxygruppen (OH) der Tone bildet und die Bindungsfähigkeit fördert. Da Ton durch ionische Bindungen Wasser zurückhält, behindert Kalk in einem Mörtel das Wasserrückhaltevermögen des Tons, indem er die Tonelektronen besetzt.

Wenn ein mit Kalk stabilisierter Lehmmörtel trocknet, kommt es außerdem zu einer Karbonisierung des Kalks, bei der das in der Luft vorhandene  $\text{CO}_2$  vom Kalk aufgenommen wird und der Kalk zu seiner ursprünglichen chemischen Zusammensetzung zurückkehrt. In Abhängigkeit vom Luftkalkgehalt verfestigt dieser Prozess den Mörtel zu einer starren und porösen Struktur, wodurch er einerseits wasserfester wird, und gleichzeitig die Durchlässigkeit des Putzes erhalten bleibt, so dass das Mauerwerk Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben kann, ohne den Untergrund zu beschädigen (Santos et al., 2017).

Da die Herstellung von Kalk jedoch die Kalzinierung von Kalkstein in Hochtemperatur-Brennöfen ( $900^\circ\text{C}$ ) erfordert, ist er ein wesentlicher Verursacher von Schadstoffen und Emissionen (Cunha, 2015).

In Brasilien und vielen anderen Regionen der Welt (Bamogo et al., 2020) ist Kuhdung in der traditionellen Architektur ein weiteres Mittel zur Stabilisierung von Erdarbeiten und Lehmbauten vom Straßenbelag bis zum Putz. Diese Methode wird bis heute von der einheimischen Bevölkerung genutzt, anerkannt und mündlich weitergegeben (Pachamama, 2018).

Neuere wissenschaftliche Untersuchungen (Millogo et al., 2016, Bamogo et al., 2020) haben gezeigt, dass Kuhdung reich an Stickstoff, Phosphor, Phosphorsäure und Kalium ist. Wenn Kuhdung Lehmmörteln zugemischt wird, reagieren diese Bestandteile mit Kaolin und Quarz, die im Ton vorhanden sind, und bilden unlösliche silikatische Amine.

Diese Verbindungen verfestigen die Bestandteile der Lehmmischung und bieten ein gewisses Maß an Wasserfestigkeit und Härte. Darüber hinaus hemmen die im Kuhdung enthaltenen Fasern auch das Trocken-



01 "Aufbereiteter" Kuhdung, getrocknet und gesiebt

schwinden und die Rissbildung, was zu einer erhöhten mechanischen Festigkeit und Haftung beiträgt.

Im brasilianischen Kontext und in anderen Ländern mit einer Viehzuchttradition kann Kuhdung eine geeignete Wahl für die Stabilisierung von Lehmörteln sein, sowohl im traditionellen Bauen als auch bei gewerblichen Projekten. Die Viehzucht kam während der Kolonialzeit nach Brasilien und erzeugt täglich eine beträchtliche Menge an Kuhdung. Wird er unsachgemäß entsorgt, birgt er ein hohes Potenzial für Wasserverschmutzung, wie von der Welternährungsorganisation der Vereinten Nationen festgestellt wurde (FAO, 2006).

In diesem Sinne ist Kuhdung ein jederzeit verfügbares Abfallprodukt, das geeignete strukturelle Eigenschaften zur Stabilisierung von Lehmörteln aufweist und daher eine ökologisch effizientere Alternative zur Verwendung von Luftkalk sein kann.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist es daher, die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Lehmörteln, die mit kaolinitischen Tonen und unter Einsatz von zwei unterschiedlichen Stabilisatoren hergestellt wurden, zu bewerten und zu vergleichen.

Zur Beurteilung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Lehmörtel wurden Prüf-

2: Vorläufige Schwindprüfung mit verschiedenen Sandanteilen (KCE:Sandverhältnis)



KCE:Sand = 1:1



KCE:Sand = 1:2



KCE:Sand = 1:3



KCE:Sand = 1:4

Tabelle 1 Mörtelbezeichnungen, Zusammensetzung in Masse, einschließlich Wasser, das zum Erreichen eines Ausbreitmaßes von 175 mm erforderlich ist, und Nassdichte.

Mörtelprobe	Lehm:Sand		Stabilisator-beigabe		Wasser-beigabe	Mörtel Nassrohddichte	
	Lehm (%)	Sand (%)	Luftkalk (%)	Kuhdung (%)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	
KCE:Sand (1:4)	KCE-REF	20	80	0	0	15	1,88
	KCE-5CL	20	80	5	0	16	1,81
	KCE-5CL+10CD	20	80	5	10	24	1,74
	KCE-10CD	20	80	0	10	24	1,59
	KCE-20CD	20	80	0	20	30	1,47

verfahren und Parameter verwendet, die in der deutschen Norm DIN 18947 (DIN, 2018) für Lehmputze festgelegt sind. Diese Norm verweist wiederum auf mehrere Abschnitte der EN 1015 (CEN, 1999).

### Materialien und Verfahren

#### Materialien

Für die Zusammensetzung der Mörtel wurde eine kaolinitische Tonerde (KCE) gewählt, die aus der ländlichen Gegend bei Itabirito im Bundesstaat Minas Gerais, Brasilien, stammt. Die Erde wurde im Gelände mit einem grobmaschigen Sieb (Maschenweite 2,79 mm) gesiebt. Nach der Lufttrocknung wurde die gesiebte Erde ins Labor gebracht, wo sie erneut entsprechend den Anforderungen jeder Stufe der mineralogischen und granulometrischen Charakterisierung des Bodens gesiebt wurde.

Es wurde ein Waschsand mittlerer Korngröße mit einem Korndurchmesser zwischen 0,2 mm und 0,6 mm verwendet. Der Sand ist kieselhaltig und besteht überwiegend aus Quarz (SiO<sub>2</sub>).

Für diese Untersuchung wurde ein kalzitischer, hydratisierter Luftkalk mit der Bezeichnung CL verwendet. In Brasilien werden Kalke für Bauzwecke nach verschiedenen Reinheitsgraden klassifiziert, und dieser Kalk wird als CH-I eingestuft (ABNT, 2003). Nach Angaben des Herstellers (ICAL) enthält diese Kalkmischung in ihrer Zusammensetzung keine unhydratisierten Oxide. Aufgrund seiner hohen Konzentration an Calcium- und Magnesiumhydroxiden hat CH-I-Kalkhydrat ein hohes Bindevermögen und ein geringes Wasserrückhaltevermögen.

Der verwendete Kuhdung mit der Bezeichnung CD stammte ebenfalls aus dem ländlichen Gebiet Itabirito, Minas Gerais. Die Kühe grasen auf Weideland und

haben daher genügend Pflanzenfasern in ihren Exkrementen.

Traditionsgemäß sammeln die Bewohner der Region den frischen Dung im Viehstall und schichten ihn im Schatten auf, um ihn „aufzubereiten“. Bei diesem Prozess werden Wärme, Wasser, Methan, Kohlendioxid und Ammoniak freigesetzt (Bamogo et al., 2013). Der Dung wird zwei Wochen lang täglich gewendet, um den Stapel zu belüften und zu kühlen, bis nach zwei bis drei Wochen ein trockenes Material mit nur leichtem Geruch und wenigen Klumpen zurückbleibt.

Nach Millogo et al. (2016) enthält der Kuhdung im frischen Zustand 80 bis 90 Massenprozent Wasser. Nach dem Trocknen sind die Hauptbestandteile pflanzliche Fasern (im Wesentlichen bestehend aus Zellulose, Hemicellulosen und Lignin) und organische Aminverbindungen (aus der Verdampfung von Ammoniak beim Trocknen im Schatten). Hinzu kommen Kalium, Phosphorsäure und Spuren von Quarz und Ton, die das Tier zusammen mit dem Gras aufgenommen hat.

Im Labor wurde der Kuhdung manuell zerkleinert und durch ein 2,79-mm-Sieb gegeben, um alle verbliebenen dünnen Äste, Blätter und Tierhaare zu entfernen. Das resultierende Material ist nach dem Sieben sehr homogen und enthält reichlich pflanzliche Fasern, deren Länge 2 cm nicht überschreitet (Abbildung 1).

Die mineralogische Charakterisierung der Erde wurde mit einem Röntgendiffraktometer (XRD) für Pulverproben (Philips/PANalytical X'Pert Pro-APD mit PW 3710/31 Regler, PW 1830/40 Generator und PW 3020/00 Goniometer) durchgeführt. Außerdem wurde eine semi-quantitative chemische Analyse mit einem sequentiellen Röntgenfluoreszenz-Spektrometer (XRF) durchgeführt (Philips/PANalytical PW-2400).



03 Prismatische Proben und Putzproben auf Lehmsteinen und Ziegelsteinen im Labor

Die Korngrößenverteilung von KCE wurde durch Trockensiebung und Sedimentation gemäß den Normen EN 1015-1 (CEN, 1998a) und NBR 7181 (ABNT, 2016b) analysiert. Für den Sand wurde keine Prüfung der Korngrößenverteilung durchgeführt, da diese bereits vom Hersteller auf der Verpackung (PURA SÍLICA) angegeben wurde.

Die Flüssigkeitsgrenze, der Plastizitätsindex und die hygroskopische Feuchte der kaolinitischen Erde wurden ebenfalls nach den Normen NBR 6459 (ABNT, 2017) und NBR 7180 (ABNT, 2016a) bestimmt.

### Mörtel und Proben

Zum Erreichen des Forschungsziels wurden fünf Mörtel hergestellt. Einer davon ist ein Referenzmörtel und die anderen vier haben die folgenden Zusätze: 5% Luftkalk, gekennzeichnet mit KCE-5CL; 10% Kuhdung, gekennzeichnet mit KCE-10CD; 20% Kuhdung, gekennzeichnet mit KCE-20CD; und eine Mischung aus 5% Luftkalk mit 10% Kuhdung, gekennzeichnet mit KCE-5CL+10CD.

Zur Festlegung der Mörtelrezepturen und der notwendigen Sandzugabe zur Herstellung von Mörteln mit begrenztem Schwinden wurde eine vorläufiger Schwindprüfung durchgeführt, indem das Auftreten von Rissen an der Oberfläche eines verputzten Mauersteins beobachtet wurde (Abbildung 2).

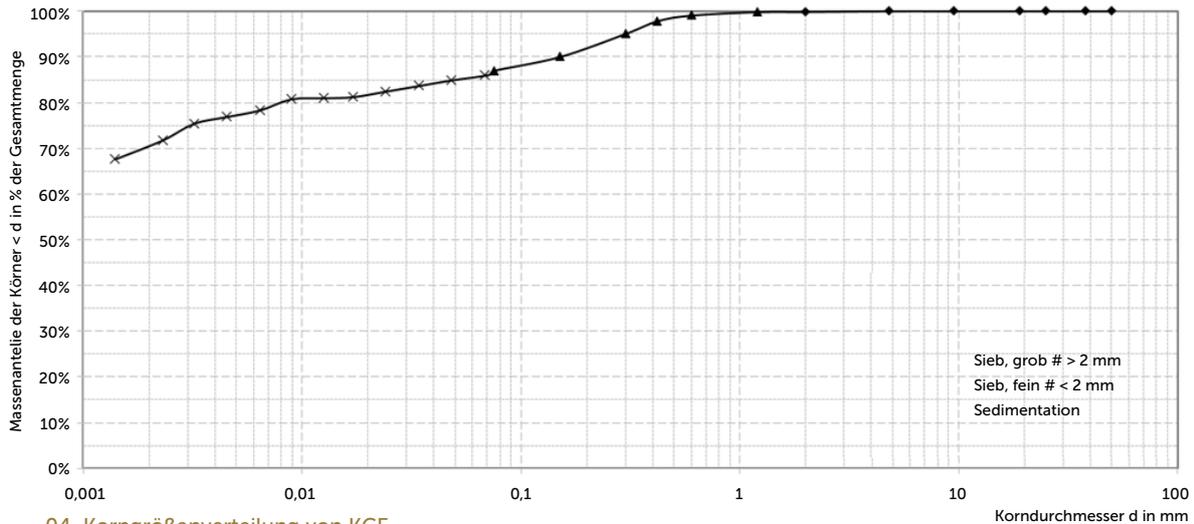
Die vorläufige Schwindprüfung zeigte, dass es notwendig ist, 4 Teile Sand zu 1 Teil Erde beizumischen. Folglich haben alle fünf nachfolgenden Mörtelrezepturen in ihrer Zusammensetzung das gleiche 1:4-Verhältnis von KCE:Sand (Tabelle 1). Die Mörtel wurden

mit einem elektromechanischen Mischer nach den Vorgaben der DIN 18947 (DIN, 2018) hergestellt, und die Frischmörtel wurden nach den in EN 1015-3 (CEN, 1999a) beschriebenen Prüfverfahren durch das Ausbreitmaß und nach EN 1015-6 (CEN, 1998b) durch die Nassdichte charakterisiert.

Jeder Mörtelrezeptur wurde ein anderes Stabilisierungsmaterial und eine andere Wassermenge zugesetzt, um ein Ausbreitmaß von 175 mm zu erhalten (DIN, 2018). Darüber hinaus hatten alle Frischmörtel eine Dichte  $> 1,2 \text{ kg/dm}^3$  (Tabelle 1), wie von der DIN-Norm vorgeschrieben.

Zur Durchführung der Prüfungen wurden mit jeder Mörtelmischung zwei verschiedene Proben hergestellt: vier  $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$  große prismatische Proben für Prüfungen des linearen Schwindmaßes, der Trockendichte und der Biege- und Druckfestigkeit. Weiterhin wurden für die Haftfestigkeitsprüfung zwei Putzproben auf unterschiedlichen Untergründen hergestellt, eine auf Lehmsteinen und eine auf Ziegelsteinen, um den Einfluss des Untergrunds beurteilen zu können. Diese Untergründe wurden auf ihrer größten Seite ( $30 \times 20 \text{ cm}$ ) bis zu einer Dicke von 1,5 cm verputzt.

Die Proben wurden im Labor bei 63% relativer Luftfeuchtigkeit (RH) und  $26^\circ\text{C}$  hergestellt und gelagert (Abbildung 3) und verblieben von ihrer Herstellung bis zur Durchführung der Prüfungen in der Laborumgebung. Alle Proben wurde nach 50 bis 60 Tagen getestet, nachdem sie eine konstante Masse erreicht hatten und genügend Zeit für den Karbonatisierungsprozess des hydratisierten Kalks gewährleistet war.



04 Korngrößenverteilung von KCE

Mörtelprüfverfahren

Zur Beurteilung des linearen Trocknungsschwindmaßes wurden drei prismatische Proben nach den Richtlinien der Norm DIN 18947 (DIN, 2018) verwendet. Die selben drei prismatischen Proben wurden zur Beurteilung der Trockenrohddichte nach EN 1015-10 (CEN, 1999b) verwendet.

Die Haftfestigkeit der Putzproben auf den Lehmsteinen und Ziegelsteinen wurde gemäß EN 1015-12 (CEN, 2000) bestimmt. Zur Durchführung des Tests wurden ein DYNA Z16 Pull-off Tester (PROCEQ) und ein Strukturkleber auf Epoxidharzbasis verwendet.

Zur Bestimmung der Biege- und Druckfestigkeit wurde die Norm EN 1015-11 (CEN, 1999c) befolgt. Zuerst wurde der Biegetest durchgeführt, bei dem drei Proben pro Mischung gebrochen wurden. Dann wurde der axiale Drucktest an den resultierenden sechs

Hälften durchgeführt. Für beide Tests wurde eine Shimadzu-Universalprüfmaschine (Modell AGS-X 300 kN) verwendet.

Für den Biegeversuch wurde eine 5 kN-Kraftmesszelle gekoppelt und mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,2 mm/min bei einer vertikalen Lasteinleitung konfiguriert. Für den Druckversuch wurde die 5 kN-Kraftmesszelle beibehalten und die Geschwindigkeit auf 0,7 mm/min eingestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Material-Charakterisierung

Die Ergebnisse der mineralogischen Charakterisierung werden in Tabelle 2 gezeigt. Man kann eine Häufigkeit von Kaolinit  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ , erkennen, gefolgt von Quarz  $SiO_2$  in der KCE-Probe, gefolgt von einem geringeren Anteil an Goethit:  $FeO(OH)$ , Muskovit:  $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$  und Mikroklin:  $KAlSi_3O_8$ .

Die Korngrößenverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Ergebnisse der granulometrischen Charakterisierung zeigen eine Zusammensetzung aus 70% Tonanteil, 15% Sandanteil und 15% Schluffanteil.

Diese Ergebnisse führen auch zu der Behauptung, dass nach Zugabe von vier Teilen Sand zu einem Teil der KCE-Erde die endgültige granulometrische Zusammensetzung aller fünf Mörtelmischungen 14% kaolinitischer Ton, 3% Schluff und 83% Sand beträgt.

Es wurde auch festgestellt, dass KCE eine Flüssigkeitsgrenze  $LL = 54\%$ , den Plastizitätsindex  $PI = 23\%$  und eine hygroskopische Feuchte von 14% hat. Die Dichte des KCE ist  $d = 1,06 \text{ g/cm}^3$ , die mittlere Sanddichte

Tabelle 2 Mineralogische Charakterisierung von KCE

kaolinitische Tonerde KCE

XRF (Am20-020) – Elementen vorhanden:

Al, Si, Fe, O (häufig)

Ti, Mn, Cr, P (gering)

K, S, Mg, Cl, Ni, Zr, Cu (spuren)

XRD (Am19-4220) – Mineralien(phasen) vorhanden:

Kaolinit (häufig)

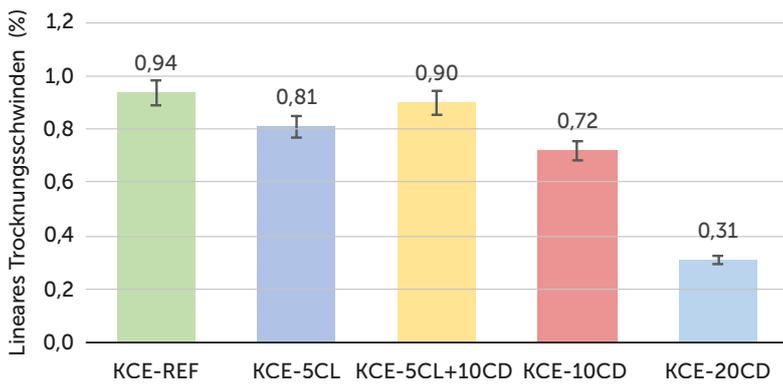
Quarz (häufig)

Muskovit (gering)

Mikroklin (gering)

Goethit (gering)

Rutil (spuren)



05 Lineares Trocknungsschwinden von kaolinischen Lehmörteln unter Zugabe von Luftkalk (CL) und Kuhdung (CD): Mittelwert und Standardabweichung

ist  $d = 1,38 \text{ g/cm}^3$ , die CH-I-Dichte ist  $d = 0,56 \text{ g/cm}^3$  und die Kuhdung-CD-Dichte ist  $d = 0,38 \text{ g/cm}^2$ .

enter zu reduzieren scheint als die Zugabe von Luftkalk zusammen mit Kuhdung.

**Ausbreitmaß und Nassdichte**

Um ein Ausbreitmaß von 175 cm zu erreichen, war bei der Zugabe von Stabilisatoren in der Regel die Zugabe von Wasser erforderlich. Mit der Zugabe von Stabilisatoren nimmt die Nassdichte ab (Tabelle 1).

**Scheinbare Trockenrohndichte**

Die Trockenrohndichten aller Mörtel weisen klassifizierbare Werte hinsichtlich der in DIN 18947 (DIN, 2018) angegebenen Parameter auf (Abbildung 6). Der Referenzmörtel KCE-REF und der Mörtel mit 5% Luftkalk (KCE-5CL) haben eine Rohdichteklasse von 1,6; die Mörtel sowohl mit Kalk als auch mit Kuhdung (KCE-5CL+10CD) von 1,4; die Mörtel mit 10% und 20% Kuhdung (KCE-10CD und KCE-20CD) von 1,2 bzw. 1,0.

**Lineares Trocknungsschwindmaß**

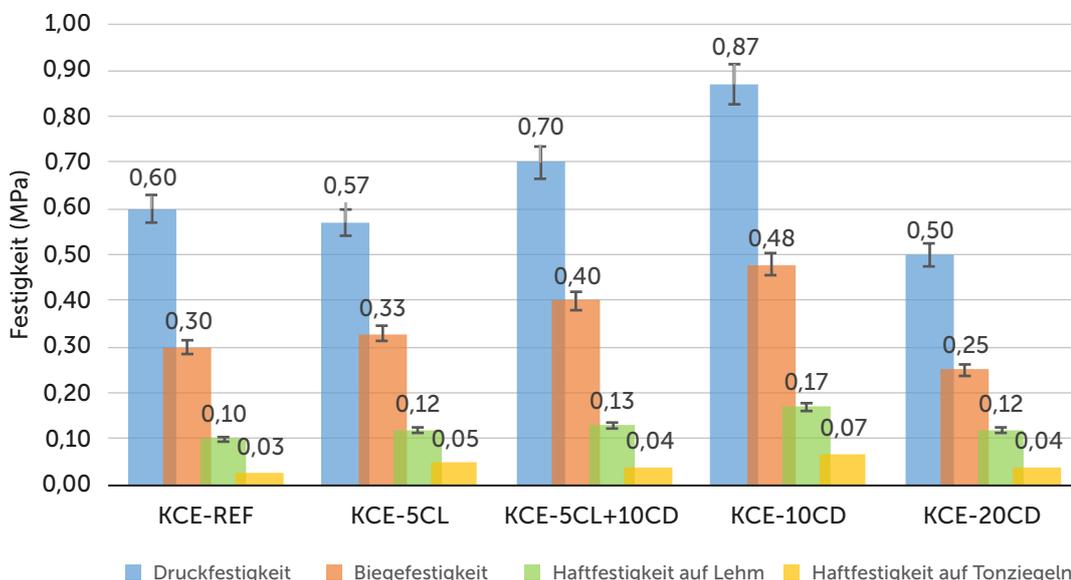
Bei der Prüfung des linearen Schwindmaßes erfüllen alle Mörtel die Anforderungen nach DIN 18947 (DIN, 2018) und weisen einen Schrumpfindex  $< 2\%$  auf (Abbildung. 5).

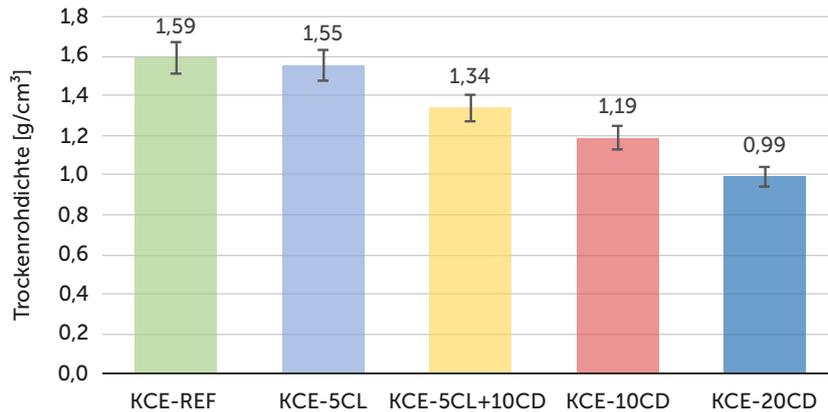
**Biege-, Druck- und Haftfestigkeit**

Man kann auch erkennen, dass die alleinige Zugabe von Kuhdung das Schwinden des Lehmörtels effizien-

Die Ergebnisse der mechanischen Festigkeitsprüfungen (Abbildung 7) zeigen, dass der Referenzmörtel

07 Druck-, Biege- und Haftfestigkeiten auf Lehm- und Ziegelsteinen von Lehmörteln mit Luftkalk- (CL) und Kuhdung- (CD) Zusätzen: Mittelwert und Standardabweichung





06 Trockenrohndichte von Lehmörteln mit Luftkalk-(CL) und Kuhdung-(CD) Zusätzen: Mittelwert u. Standardabweichung

(KCE-REF) ohne Stabilisatoren den nach DIN-Norm klassifizierbaren Mindestwert der Biegefestigkeit ( $F_s$ ) aufweist,  $F_s = 0,3$  MPa. Die Zugabe von Kalk erhöht die  $F_s$  um 10% und die Zugabe von 10% Kuhdung erhöht sie um 60%. Die gleichzeitige Zugabe beider Zusätze führte zu einer Erhöhung um 33%, während die Zugabe von 20% Kuhdung die Biegefestigkeit des Referenzmörtels um 17% verringerte.

Bei der Prüfung der Druckfestigkeit ( $C_s$ ) erreichte keiner der Mörtel  $C_s = 1,0$  MPa, was bedeutet, dass keiner nach der DIN-Norm klassifizierbar ist. Alle Mörtel konnten jedoch als allgemeine Putzmörtel nach EN 998-1 (CEN, 2016) klassifiziert werden, da sie alle die Mindestgrenze von 0,4 MPa erreichen. Nach Röhlen und Ziegert (2011) weisen Lehmörtel im Allgemeinen Werte für die Druckfestigkeit zwischen 0,6 und 3 MPa auf. Nur der Mörtel mit 20% Kuhdung wies einen niedrigeren Wert auf.

Der Referenzmörtel wies einen  $C_s = 0,6$  MPa auf. Der Zusatz von 5% Luftkalkhydrat vermindert die Druckfestigkeit um 5%, aber der Zusatz von 10% Kuhdung erhöht sie um 45%. Die kombinierte Zugabe von Kalk und Kuhdung erhöhte den  $C_s$  um 17% und die Zugabe von 20% Kuhdung verringerte ihn um 17%.

Die Haftfestigkeit ( $A_s$ ) wurde auf zwei Untergründen getestet: Lehmsteine und Ziegelsteine. Bei Ziegelsteinen erreichten nur KCE-5CL und KCE-10CD den in der DIN (2018) vorgeschriebenen Mindestwert von  $A_s = 0,05$  MPa. In Bezug auf KCE-REF ( $A_s = 0,03$  MPa) erhöhte KCE-5CL die Haftfestigkeit um 67% und KCE-10CD um 133%.

Die auf den Lehmsteinen aufgetragenen Lehmörtel-Mischungen entsprachen alle den in der DIN

(2018) angegebenen klassifizierbaren Werten. In Bezug auf KCE-REF ( $A_s = 0,10$  MPa) erhöhen KCE-10CD die Haftfestigkeit um 70%, während KCE-5CL und KCE-20CD sie um 20% und KCE-5CL+10CD um 30% erhöhen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von 5% Luftkalk die Druckfestigkeit gegenüber dem Referenzmörtel KCE-REF leicht reduziert, die Biege- und Haftfestigkeit auf beiden Untergründen jedoch leicht erhöht. Wie in Gomes et al. (2018) für eine andere kaolinitische Erde beobachtet, geschieht dies, weil die durch das Kalziumkarbonat erzeugte schwache Strukturmatrix die Verbindungen zwischen den Tonplättchen beeinträchtigt und die Strukturmatrix des Tons beschädigt. Da der Anteil des zugesetzten Kalks jedoch gering ist (5%), bildet der Kalk keine ausreichend starke Strukturmatrix, was insgesamt zu einer Verringerung der Druckfestigkeit des Mörtels führt.

Faria (2018) hat jedoch in Versuchen gezeigt, dass Lehmörtel mit mehr als 20% Luftkalk die mechanische Festigkeit von Mörteln erhöhen können.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass im Vergleich zur Zugabe von 5% Kalk die Zugabe von 10% Kuhdung und die kombinierte Zugabe (KCE-5CL+10CD) in allen ausgewerteten Versuchen eine überragende Leistung zeigt.

Nach Bamogo et al. (2020) sind die im Kuhdung vorhandenen Pflanzenfasern und die gebildeten unlöslichen silikatischen Amine für die Effekte verantwortlich, die in den Lehmörtel-Mischungen mit diesem Zusatzstoff auftreten. Die Forscher vermuten, dass die unlöslichen silikatischen Amine ( $(\text{Si}(\text{OH})_4\text{NH}_3)$ ) bei der Reaktion der im Kuhdung vorhandenen Ammo-

niakverbindungen mit dem im Boden vorhandenen feinen Quarz ( $\text{SiO}_2$ ) und Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) gebildet werden.

Bamogo et al. (2020) untersuchten die Zugabe von 2, 4 und 6 Gewichtsprozent Kuhdung zu den Lehmörtelmischungen und zeigten, dass die positiven Effekte mit dem Anteil des zugegebenen Kuhdungs zunehmen.

Vilane (2010) bewertete die Zugabe größerer Anteile von Kuhdung–5, 10, 15 und 20%–zur Masse für die Herstellung von Lehmsteinen (Adobe). Die Ergebnisse zeigten, dass die Zugabe von 10% Kuhdung die beste Wirkung in Bezug auf mechanische Festigkeit und Wasseraufnahmefähigkeit erzielte. Die Ergebnisse unserer Untersuchung scheinen die Ergebnisse von Vilane zu bestätigen: Die volumetrische Zugabe von 10% Kuhdung hatte eine positivere Wirkung auf die KCE-Lehmörtel als eine Zugabe von 20%.

Andererseits verbesserte die gleichzeitige Zugabe von 10% Kuhdung und 5% Kalk die Eigenschaften des Referenzmörtels in allen Versuchen, war aber nicht so effektiv wie die separate Zugabe der gleichen Zusätze.

Es ist interessant zu beobachten, dass das Schwinden von KCE-Mörteln in direktem Zusammenhang mit der mechanischen Festigkeit und Haftung von Mörteln steht. Obwohl für das menschliche Auge nicht sichtbar, wird davon ausgegangen, dass der Mörtel mit dem geringsten Schwund weniger Mikrorisse im Putz erzeugt und eine verbesserte Kontaktfläche und damit eine bessere Haftung am Untergrund sowie eine höhere mechanische Festigkeit bietet..

### **Schlussfolgerungen**

Der kaolinitische Referenzmörtel, ohne stabilisierende Zusätze, ist ein Mörtel, der in allen Versuchen eine zufriedenstellende Leistungsfähigkeit zeigt. Die Zugabe der getesteten stabilisierenden Materialien brachte einige Verbesserungen.

Der Zusatz von 5% Luftkalk reduzierte das lineare Schwindmaß um 14%, reduzierte die Druckfestigkeit um 5%, erhöhte die Biegefestigkeit um 10% und erhöhte die Haftfestigkeit auf einem Lehmstein-Untergrund um 20%.

Die Zugabe von 10% Kuhdung übertrifft in allen Versuchen die Ergebnisse der Kalkzugabe und ist ein Beleg für die Qualität dieser traditionellen Methode zur Stabilisierung von Lehmörteln. Tatsächlich erhöhte der Mörtel mit 10% Kuhdung die Druckfestigkeit um 45%, die Biegefestigkeit um 60% und die Haftfestigkeit um 133%, was ihn zu einem sehr effizienten Zusatz zu Lehmputzen macht. Dieser Mörtel wies bessere Eigenschaften auf als der Mörtel mit sowohl Luftkalk und Kuhdung.

Die Wirkung der Zugabe von Kuhdung als Stabilisator zu Lehmörteln wurde auch von anderen Forschern untersucht. Diese Untersuchungen kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass die Zugabe von Kuhdung das Schwinden verringert und die mechanische Festigkeit erhöht. Es wurde jedoch keine frühere Studie gefunden, die die Auswirkungen der Zugabe von Kuhdung mit der Zugabe von Kalk verglich, oder die Auswirkungen der Zugabe einer Mischung aus Luftkalk und Kuhdung zum gleichen Basis-Lehmmörtel. Dadurch können wir uns jetzt ein Bild von der Leistungsfähigkeit dieser Zusatzstoffe im Vergleich zu anderen bereits in der Literatur dokumentierten stabilisierenden Bindemitteln machen.

Die hier vorgestellte Untersuchung trägt zum Forschungsgebiet der Verwendung von Kuhdung im Bauwesen bei und zeigt, dass er ein grosses Potenzial für die Stabilisierung von Lehmörteln birgt. Zukünftige Forschungsarbeiten werden die Wirkung dieser Stabilisatoren auf die Beständigkeit von Lehmörteln analysieren.

### **Danksagung**

Die Autoren danken der Coordinating Agency for Advanced Training of Graduate Personnel (CAPES) für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsprojekts.

## Referenzen

- ABNT (2003). NBR 7175 – *Cal hidratada para argamassas – Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2005a). NBR 13281 – *Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016a). NBR 7180 – *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2016b). NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2017). NBR 6459 – *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- CEN (2016). EN 998-1 – *Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (1998a). EN 1015-1 – *Methods of test for mortars for masonry. Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (1998b). EN 1015-6: *Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (1999a). EN 1015-3 *Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (1999b). EN 1015-10:1999 – *methods of test for masonry; part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (1999c). EN 1015-11:1999 – *methods of test for masonry; part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- CEN (2000). EN 1015-12: *Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. European Committee for Standardisation, Brussels.
- DIN (2018). DIN 18947 – *Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods* (in German). Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Bamogo H, Ouedraogo M, Sanou I, Ouedraogo KAJ, Dao K, Aubert J-E, Millogo Y (2020). *Improvement of water resistance and thermal comfort of earth renders by cow dung: an ancestral practice of Burkina Faso*. J Cult Herit, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.04.009>
- Cunha MVH (2015). *Novo material a partir da composição dos resíduos da fabricação de revestimento cerâmico e da produção da cal*. MSc thesis. Universidade Federal do Paraná, Brazil.
- FAO (2006). *Livestock a major threat to environment. Remedies urgently needed*. Accessed July 2019 at: <http://www.fao.org/newsroom/en/news/2006/1000448/index.html>
- Faria P (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contributo para o estudo da influência dos ligantes*. PhD thesis, NOVA University of Lisbon, Portugal.
- Faria P (2018). *Argamassas de cal e terra: características e possibilidades de aplicação*. Ambiente Construído 18: 49-62 <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400292>
- Gomes MI, Faria P, Gonçalves TD (2018). *Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilisation with mineral binders and fibres*. J Clean Prod 172: 2401-2414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>
- Lima J, Faria P, Santos Silva A (2020). *Earth plasters: the influence of clay mineralogy in the plasters' properties*. Int J Archit Herit 14 (7): 948-963. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1727064>
- Milogo Y, Aubert J-E, Séré AD, Fabbri A, Morel J-C (2016). *Earth blocks stabilised by cow-dung*. Mater Struct 49: 4583-4594. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>.
- Pachamama RAVCN (2018). *Guia para autoconstrução em bambu e terra: adobe e taipa de mão*. In: Congresso Brasileiro de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, 7. Anais... pp. 476-485. Rio de Janeiro, Brasil.
- Rezende MAP, Lopes R, Gomes W, Carvalho RM, Vale J (2013). *Técnicas construtivas vernaculares no Brasil*, Red Avi: Colección textos, pp. 102-115.
- Röhlen U, Ziegert C (2011). *Earth Building Practice*, Bauwerk, Beuth Verlag GmbH. ISBN: 978-3-410-21737-4.
- Santos T, Nunes L, Faria P (2017). *Production of eco-efficient earth-based plasters: influence of composition on physical performance and bio-susceptibility*. J Clean Prod 167: 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.131>
- Santos T, Faria P, Santos Silva A (2020). *Eco efficient earth plasters: the effect of sand grading and additions*. J Build Eng: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101591>
- Vilane BRT (2010). *Assessment of stabilisation of adobes by confined compression tests*. Biosyst Eng 106(4): pp.551-558. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2010.06.008>

