

Mörtel für dünne Wände aus ungebrannten Lehmsteinen

Traditionelle Lehmbautechniken, wie Wellerlehm, Lehmblock, Flechtwerk und Bewurf sowie Stampflehm haben eine lange und erfolgreiche Geschichte im Vereinigten Königreich [Pearson, 1992]. Man nimmt an, dass es 500.000 bewohnte Lehmbauten im Vereinigten Königreich gibt, wovon die meisten vor dem zwanzigsten Jahrhundert erbaut wurden [Little und Morton, 2001]. Obwohl die Lehmbauten im ganzen Land in vielen regionalen Variationen verbreitet sind, gibt es regionale Konzentrationen, wie Wellerlehm im Südwesten und Lehmblöcke in Ostengland. Der Lehm wird vorrangig für Wände und in einzelnen Fällen für die Deckenkonstruktion verwendet. Die Wände sind dick und massiv, im Kontrast zu den modernen Mauerwerkswänden, welche üblicherweise aus zwei dünnen Schalen mit innenliegender Dämmung bestehen. Die Wärmedämmeigenschaften traditioneller Lehmwände erfüllen grundsätzlich nicht die Anforderungen der modernen Bauvorschriften im Vereinigten Königreich, obwohl die schlechten Dämmeigenschaften annähernd durch ihre hohe Speichermasse und hygrothermischen Eigenschaften ausgeglichen werden.

Ungebrannte Lehmbaustoffe stellen eine nachhaltige und gesunde Alternative gegenüber konventionellen Mauerwerksmaterialien, wie gebrannten Ziegeln oder Betonsteinen, dar, sowohl in der lastabtragenden als auch in der nicht-lastabtragenden Anwendung. Die Vorteile für die Umwelt umfassen deutlich reduzierten Energiebedarf, Speichermasse und Feuchtigkeitsregulierung. Die Baustoffe können von umweltverträglichen Quellen stammen (einfacher Lehm und Aushub) und sind leicht wiederzuverwenden, recyclebar sowie unbedenklich nach der Nutzung abzugeben. Diese Baustoffe sind ebenso grundsätzlich ungefährlich. Ungebrannte Lehmbaustoffe bieten gesundheitliche Vorteile für die Innenraumgestaltung, vorrangig durch die passive Regulierung der relativen Luftfeuchtigkeit. Obwohl traditionelle Lehmbaustoffe für Mauerwerk, wie Lehmsteine, Lehmblöcke und Wellerlehm ebenso wie die in letzter Zeit entwickelten verdichteten Lehmsteine, erfolgreich in einer Vielzahl von Projekten angewendet werden konnten, wurde immer mehr Interesse daran gezeigt, ungebrannte Steine aus der Massenproduktion industrieller Ziegelhersteller zu verwenden. Die Zugfestigkeit von ungebrannten Lehmsteinen ist gering und der Verbund zwischen ungebrannten Lehmteilen und traditionellen Lehmmörteln ist schwach, weshalb man bei Wänden auf deren Masse vertraute, um die Lastabtragung und Belast-

barkeit zu sichern. Konsequenterweise sind massive Wände daher traditionell mindestens zwischen 225 und 300 mm dick. Die Standardgröße gebrannter Ziegel im Vereinigten Königreich ist $215 \times 102,5 \times 65$ mm. Obwohl die Abmaße ungebrannter Steine etwas größer sind, bleiben sie doch kleiner als die Lehmstein- und Lehmblockabmaße oder die Stärke von Wänden aus Stampf- und Wellerlehm.

Die Bindekraft des Mauerwerks wird benötigt, um stabile Wände zu errichten, welche bei Querbelastung nicht versagen. Die Wanddicke hat eine große Auswirkung auf die benötigte Bindekraft. Eine 2,4 m hohe senkrecht stehende Wand von 300 mm Stärke kann selbst bei sehr geringer Bindekraft ($0,024 \text{ N/mm}^2$) eine gleichmäßig verteilte Querlast von 500 N/m^2 aufnehmen. Um die Wandstärke auf 105 mm zu reduzieren und dabei die gleiche Biegefestigkeit zu gewährleisten, muss die Bindekraft auf $0,2 \text{ N/mm}^2$ erhöht werden. Es gibt viele Beispiele von freistehenden 300 mm starken Lehmwänden, die eine Bindekraft von nahezu Null besitzen (z. B. luftgetrocknete Lehmsteine mit Lehmmörtel). Die Bindekraft von $0,2 \text{ N/mm}^2$ für eine 100 mm starke Wand wird als angemessenes Ziel für die charakteristische Festigkeit von ungebranntem Lehmsteinmauerwerk angesehen.

Die Universität von Bath ist der Hauptpartner eines zweijährigen, vom UK Government Technology Strategy Board (TSB) geförderten Projektes zur Untersuchung und Entwicklung von ungebranntem Lehmsteinmauerwerk. Industriepartner sind Istock Brick, Hanson, Errol Brick Co., The Brick Development Association, Lime Technology und arc-Architekten.

Die Testergebnisse, die in diesem Beitrag vorgestellt werden, basieren auf zuvor veröffentlichten Arbeiten [Walker et al, 2008] und behandeln die Bindekrafteigenschaften einer Reihe von verschiedenen Mörteln mit zwei marktüblich erhältlichen ungebrannten Lehmsteinen. Diese beiden Lehmsteine sind in Abb. 1 abgebildet.

Baustoffe und Verfahren

Frühere Arbeiten untersuchten die Bindekraft von sechs unterschiedlichen Mörteln nach 28 Tagen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es gibt keine offensichtlichen Bezüge zwischen Mörteldruckfestigkeit und Bindekraft der verschiedenen Mörtel. Der Zement:Sand-Mörtel hat die höchste Druckfes-

Mortars for thin unfired clay masonry walls

Traditional earth construction techniques, including cob, mud-block, wattle and daub, and rammed earth, has a long and largely successful history in the UK [Pearson, 1992]. There are an estimated 500,000 occupied earth buildings in the UK, most built before the twentieth century [Little and Morton, 2001]. Although earth buildings are distributed throughout the country with many regional variations, there are regional concentrations, such as cob in the South West and clay lump (mud block) in East Anglia. Earth is primarily used for wall and, occasionally, floor construction. Walls are thick solid construction, in contrast to modern masonry walls, which are generally comprised of two thin leaves with an insulated cavity between. The thermal insulating qualities of traditional earth walls in general do not meet the requirements of modern building regulations in the UK, although the poor insulating qualities are, to some extent, offset by their high thermal mass and hygrothermal properties.

Unfired clay materials provide a sustainable and healthy alternative as a replacement to conventional masonry materials, such as fired clay and concrete block, in both non-load-bearing and low rise load-bearing applications. Environmental benefits include significantly reduced embodied energy, thermal mass and regulation of humidity. Materials may be taken from sustainable resources (low grade clay and overburden) and are readily re-used, re-cycled or harmlessly disposed on end use. Materials are also entirely non-hazardous. Unfired clay materials offer potential health benefits to internal built environments, primarily through passive regulation of relative humidity. Though traditional clay masonry materials, such as adobe, clay lump and cob blocks, as well as more recently developed compressed earth blocks have been used successfully in a variety projects, more and more interest has been shown in using unfired clay bricks produced by high volume industrial brick manufacturers. The tensile strength of unfired clay materials is low and the bond between unfired clay units and traditional clay mortars is poor, therefore walls have relied on their bulk mass to ensure lateral load resistance and resilience. Consequently traditional solid walls are typically at least 225-300 mm thick. The standard size of fired clay bricks in the UK is 215 × 102.5 × 65 mm. Although the dimensions of unfired clay bricks are slightly higher they remain smaller than adobe and compressed earth block dimensions or the sizes of solid rammed earth or cob walls.

The bond strength of masonry is required to create a stable wall that will not collapse if it experiences lateral loading. Wall thickness has a large effect on required bond strength. A 2.4 metre high vertically spanning wall at 300 mm thick, even with very low bond strength (0.024 N/mm²), can carry a uniformly distributed lateral load of 500 N/m². In order to reduce the thickness of the wall to 105 mm, while providing the same flexural capacity, the bond strength must be increased to around 0.2 N/mm². There are many examples of single story 300 mm thick earthen walls where the bond strength approaches zero (e.g. adobe blocks with clay mortars). The bond strength of 0.2 N/mm² for a 100 mm thick wall is considered a reasonable target characteristic strength for unfired earth masonry.

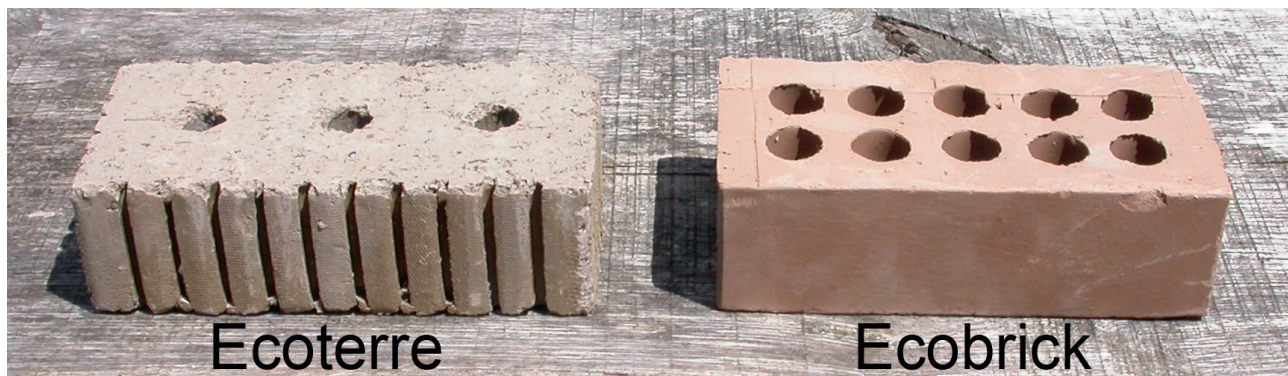
The University of Bath is the lead partner in a two-year UK Government Technology Strategy Board (TSB) funded project to investigate and develop unfired clay masonry. Industrial partners include Ibstock Brick, Hanson, Errol Brick Co., The Brick Development Association, Lime Technology, and arc Architects.

The test results provided in this paper build on previously published work [Walker et al, 2008] and relate to the bond strength characteristics of a range of different mortars with two commercially available unfired clay bricks. These two are shown in Fig. 1.

Materials and methods

Previous work examined the bond strength of six different mortar mixes at 28 days, and the results are summarised in Table 1. There is no apparent correlation between mortar compressive strength and bond strength for the different mortars. The cement:sand mortar has the highest compressive strength but very low bond strength with the unfired clay bricks when no bonding agent is used. With the exception of the sand:cement mortar the compressive strengths for the mortars were below that of the brick which is normally desirable in masonry. For all bricks the use of PVA bonding agent increased bond strength, however its use is not considered suitable for general use.

All of the joints, with exception of the sodium silicate mortars, exhibited an interface failure when no bonding agent was used. This changed to a majority of joints exhibiting failure within the mortar joint after the interface strength had been increased



tigkeit aber eine sehr geringe Bindekraft zu den ungebrannten Lehmsteinen, wenn kein Bindemittel verwendet wird. Mit der Ausnahme von Sand:Zement-Mörtel sind die Druckfestigkeiten der Mörtel unter denen der ungebrannten Lehmsteine, was normalerweise bei Mauerwerk angestrebt wird. Bei allen Steinen erhöht die Anwendung von PVA-Bindemittel die Bindekraft, allerdings wird dessen Verwendung für den generellen Gebrauch nicht für zweckmäßig betrachtet.

Mit Ausnahme der Natriumsilikatmörtel zeigen alle Bruchstellen ein Versagen in der Verbindungsfläche, wenn keine Bindemittel eingesetzt werden. Der Einsatz von Bindemitteln veränderte in der Mehrzahl das Versagensverhalten, indem die Brüche nun im Mörtel stattfanden, nachdem die Festigkeit in der Verbindungsfläche durch das Bindemittel erhöht wurde. Bei der Verwendung von Natriumsilikatmörtel fand das Versagen eher im Stein als an der Oberfläche, der Verbindung zum Mörtel statt. Die Bindekraft war daher durch die Steinfestigkeit begrenzt, was zeigt, dass der verwendete Natriumsilikatmörtel vielleicht zu fest für diese Steine ist.

Die Mischungen 4 und 5 beinhalteten 5% Natriumlignosulfonate, bei 5% Konzentration, die dem Lehm, Sand und Wasser beigemischt wurden. Lignosulfonat (auch Ligninsulfonat genannt) ist ein ligninbasiertes Abprodukt der Papierindustrie und wird üblicherweise als Bindemittel in verschiedenen Anwendungen genutzt sowie in der Bauindustrie als Betonverflüssiger. Es wurde zuvor als Mörtelzusatz in einer begrenzten Anzahl von Bauprojekten im Vereinigten Königreich verwendet.

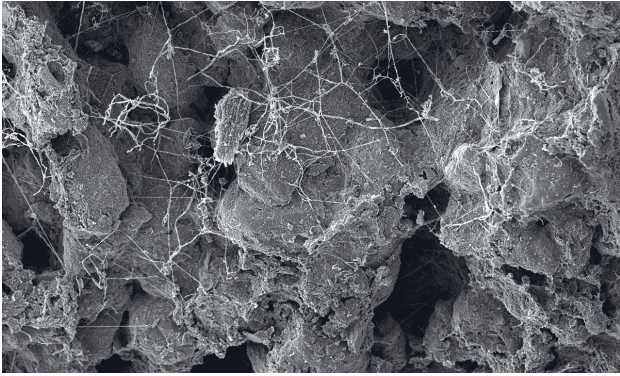
Die Lehm:Sand-Mörtel, die ohne Bindemittel und bei einer Wandstärke von 300 mm in traditionellem Lehmsteinmauerwerk verwendet wurden, hatten eine geringe Bindekraft. Diese Baustoffe können für dünne (100 mm) Wände ohne eine erhebliche Reduzierung der Lastabtragung nicht verwendet werden. Um eine vergleichbare Lastabtragungsfunktion unter Querbelaftung für 100 mm starke Wände zu erreichen, muss die Bindekraft auf 0,20 N/mm² erhöht werden. Die Lignosulfonate, gemeinsam mit PVA-Bindemittel und Natriumsilikatmörtel verwendet, erreichen derartige Werte und werden daher als interessanter Mörteltyp für weitere Untersuchungen angesehen. Die Verwendung des synthetischen PVA-Bindemittels ist sicher nicht ideal, was bedeutet, dass im Weiteren alternative natürliche Zusätze ermittelt werden sollten. Die Verwendung eines Bindemittels verlangsamt den Bauprozess und erhöht die Kosten, solange dies nicht ein Teil des Prozesses der Steinherstellung wird.

Der patentrechtlich geschützte Natriumsilikatmörtel wurde für die Verwendung mit feuerbeständigen Ziegeln entwickelt und ist kostenintensiv (etwa das 5-fache eines abgepackten Kalkmörtels). Deshalb wurde er für weitere Untersuchungen als nicht geeignet angesehen. Die zweite Phase der Tests untersuchte daher Kalkmörtel, lignosulfonatbasierte Mörtel und sand/Lehm/natriumsilikat-basierte Mörtel. Natriumsilikat ist ein Baustoff mit geringem CO₂-Bedarf (60 kg CO₂ pro Tonne) und in seiner Anwendung ökonomisch (600 € pro Tonne Trockenpulver, entsprechend 36 € pro Tonne Mörtel bei 6% Silikatanteil). Alle Mörtel wurden mit ausreichend Wasser zur Erreichung einer Mörtelfließgrenze von 150 bis 170 mm nach British Standard BS EN

Tabelle Phase 1 Mörteltestergebnisse

Mischung	Mörtelzusammensetzung	mittlere Mörtel-druckfestigkeit N/mm ²	mittlere Zugfestigkeit (ohne PVA) N/mm ²	mittlere Zugfestigkeit (mit PVA) N/mm ²
1	3:2 (Sand:Lehm)	2,0	0,002	0,012
2	3:1 (Sand:Lehm)	2,5	0,009	0,11
3	3:1 (Sand:Zement)	11,0	0,002	0,35
4	3:1 (Sand:Lehm) + 5% Lignosulphonate	3,3	0,052	0,52
5	'Eco-brick' Stein Werksmörtel	2,2	0,26	N/A
6	Natriumsilikatmörtel	3,2	0,47	N/A

1 Marktüblich erhältliche ungebrannte Lehmsteine
Commercially available unfired clay bricks



with the bonding agent. Failure of the sodium silicate mortared joints was through the face of the bricks rather than along the interface or mortar; bond strength was therefore limited by brick strength, indicating that the sodium silicate mortar mix used is perhaps too strong for these bricks

Mixes 4 and 5 had 5% sodium lignosulphonate, at 55% concentration, added to the clay, sand and water. Lignosulphonate (or lignosulfonate) is a lignin based by-product of the paper production industry and is commonly used as a binder in a variety of applications, and is also used in the construction industry as a concrete plasticiser. It has previously been used as a mortar additive for a limited number of construction projects in the UK.

The clay:sand mortars used without a bonding agent and with thick (300 mm) walls in traditional earth masonry construction have low bond strengths. These materials cannot be used in thin (100 mm) walls without a substantial reduction in load carrying capacity. In order to produce a similar structural capacity under lateral loading for a 100 mm thick wall, the bond strength must be increased to 0.20 N/mm². The lignosulphonate, used with PVA bonding agent, and the sodium silicate mortar achieved this value and these were considered the most promising mortars for further investigation. The use of a synthetic PVA bonding agent is not necessarily ideal, and alternative natural adhesives are to be investigated further. The use of any bonding agent will slow the construction process and increase costs unless this could be applied as part of the brick manufacture process.

The proprietary sodium silicate mortar has been designed for use with fireproof bricks and is costly (about 5x the cost of a pre-packed lime mortar) It was therefore not considered to be appropriate for further investigation. The second phase of tests therefore investigated lime mortars, lignosulphonate based mortars and sand/clay/sodium silicate solution mortars. Sodium silicate is a material which has a low carbon footprint (60 kg CO₂ per tonne of product), and is economical in use (€600 per tonne of dry powder, equivalent to €36 per tonne of mortar at 6% silicate concentration). All mortar mixes were mixed with sufficient water to provide a mortar flow value of between 150 and 170 mm according to BS EN 1015-3:1999. Bond strength was tested on six specimens of each mix after a number of different times in accordance with BS EN 1052-5:2005.

Results of bond tests

The experimental mortar mixes are summarised in Table 2. Three different forms of failure were seen:

1. Interface failure, where the bond between mortar and brick was weaker than tensile strength of either the mortar or the brick. (Bond)
2. Failure within the mortar, where the bond between mortar and brick is stronger than the tensile strength of the brick. (Mortar)
3. Failure within the brick, where both the bond between mortar and brick and the tensile strength of the mortar are stronger than the tensile strength of the brick. (Brick)

Table 1: Phase 1 mortar test results

Mix	Mortar description	Average mortar compressive strength N/mm^2	Average bond strength (without PVA) N/mm^2	Average bond strength (with PVA) N/mm^2
1	3:2 (sand:clay)	2.0	0.002	0.012
2	3:1 (sand:clay)	2.5	0.009	0.11
3	3:1 (sand:cement)	11.0	0.002	0.35
4	3:1 (sand:clay) + 5% lignosulphonate	3.3	0.052	0.52
5	'Eco-brick' brick proprietary mortar	2.2	0.26	N/A
6	Sodium silicate mortar	3.2	0.47	N/A

2 SEM Aufnahme Lignosulfonatmörtel nach 28 Tagen (100 fache Vergrößerung)
SEM image of Lignosulphonate mortar at 28 days (x 100)

Specimen # Probe Nr.	Brick / Stein	Mortar mix details (by volume)	Mörtelmischung (Volumenanteile)
1	Ecoterre	Proprietary Pre-formulated lime–Basecoat®	Werksmäßig gefertigter Kalk-Unterputz®
2	Ecoterre	1:2.25 NHL3,5 lime mortar	1:2.25 NHL3,5 Kalkmörtelr
3	Errol	3:1 sand:clay with 5% lignosulphonate	3:1 Sand:Lehm mit 5% Lignosulphonate
4	Ecoterre	3:1 sand:clay with 5% lignosulphonate	3:1 Sand:Lehm mit 5% Lignosulphonate
5	Ecoterre	3:1 sand:clay with 10% lignosulphonate	3:1 Sand:Lehm mit 10% Lignosulphonate
6	Ecoterre	3:1 sand:clay with 10% lignosulphonate	3:1 Sand:Lehm mit 10% Lignosulphonate
7	Errol	45:15:6 sand:clay:silicate solution	45:15:6 Sand:Lehm:Silikat Mischung
8	Errol	45:15:7 sand:clay:silicate solution	45:15:7 Sand:Lehm:Silikat Mischung
9	Errol	45:15:8 sand:clay:silicate solution	45:15:8 Sand:Lehm:Silikat Mischung
10	Errol	45:15:9 sand:clay:silicate solution	45:15:9 Sand:Lehm:Silikat Mischung
11	Errol	45:15:10 sand:clay:silicate solution	45:15:10 Sand:Lehm:Silikat Mischung
12	Errol	45:15:11 sand:clay:silicate solution	45:15:11 Sand:Lehm:Silikat Mischung
13	Ecoterre	45:15:7 sand:clay:silicate solution	45:15:7 Sand:Lehm:Silikat Mischung
14	Ecoterre	45:15:8 sand:clay:silicate solution	45:15:8 Sand:Lehm:Silikat Mischung
15	Ecoterre	45:15:8 sand:clay:silicate solution	45:15:8 Sand:Lehm:Silikat Mischung
16	Ecoterre	45:15:10 sand:clay:silicate solution	45:15:10 Sand:Lehm:Silikat Mischung
17	Ecoterre	45:15:11 sand:clay:silicate solution	45:15:11 Sand:Lehm:Silikat Mischung
18	Ecoterre	45:15:12 sand:clay:silicate solution	45:15:12 Sand:Lehm:Silikat Mischung
19	Ecoterre	45:15:10 sand:clay:silicate in 5% sugar solution	45:15:10 Sand:Lehm:Silikat in 5% Zuckerlösung

Tabelle 2 Experimentelle Mörtelmischungen / Table 2 Experimental mortar mixes

1015-3:1999. Die Bindekraft wurde an sechs Probekörpern einer jeden Mischung nach unterschiedlichen Zeitabschnitten in Übereinstimmung mit dem British Standard BS EN 1052-5:2005 getestet.

Ergebnisse der Bindekraftprüfungen

Die experimentellen Mörtelmischungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Drei unterschiedliche Versagensarten wurden beobachtet:

1. Versagen in der Verbindungsfläche, wobei die Bindung zwischen Mörtel und Stein schwächer war als die Zugfestigkeit des Mörtels oder Steines (Verbindungsversagen)
2. Versagen im Mörtel, wobei die Bindung zwischen Mörtel und Stein stärker war als die Zugfestigkeit des Mörtels. (Mörtelversagen)
3. Versagen im Stein, wobei die Bindung zwischen dem Mörtel und dem Stein und die Zugfestigkeit des Mörtels stärker war als die Zugfestigkeit des Steines (Steinversagen)

Die aus den Versuchen ermittelten Werte der durchschnittlichen und charakteristischen Bindekraft zeigt Tabelle 3.

Werksmäßig hergestellte Kalkmörtel

Die werksmäßig hergestellten Kalkmörtel, die mit den Ecoterre-Steinen verwendet wurden, erreichten 80% ihrer 28 Tage-Bindekraft innerhalb von 7 Tagen, aber selbst nach 28 Tagen ist die Bindekraft noch 30% unter den erforderlichen Werten. Das Versagen findet in den Verbindungsflächen zwischen Stein und Mörtel statt. Diese Art von Mörtel wird daher für die Anwendung mit ungebrannten Lehmsteinen für dünne Wände als ungeeignet angesehen.

Kalkmörtel

Da hydraulische Kalke länger als 7 Tage zum Abbinden benötigen, wurde die Bindekraft nur nach 28 Tagen getestet. Zu dieser Zeit lag die Bindekraft nur bei 10% der erforderlichen Werte. Diese Mörtel verhielten sich noch schlechter als die werksmäßig hergestellten Kalkmörtel und wurden daher ebenso für die Anwendung mit ungebrannten Lehmsteinen für dünne Wände als ungeeignet angesehen.

Lignosulfonatmörtel

Die Lignosulfonatmörtel haften viel besser an den Errol-Steinen als an den Ecoterre-Steinen. Die Bindung zu den Ecoterre-Stein-

Test #	Brick Stein	Mix details	Age at test	Bond strength		Failure Mode
		Mischungsdetails	Testalter	Bindekraft	N/mm^2	Versagensart
		by volume nach Volumen	days Tage	Mean mittel	Characteristic charakteristisch	see text siehe Text
1	Ecoterre	PFL	7	0.11	0.01	Bond
2	Ecoterre	PFL	28	0.14	0.08	Bond
3	Ecoterre	NHL3.5	28	0.02	0.01	Bond
4	Errol	5% Ligno	7	0.34	0.28	Bond
5	Errol	5% Ligno	28	0.25	0.12	Bond
6	Errol	5% Ligno	396	0.16	0.05	Bond
7	Ecoterre	5% Ligno	28	0.04	0.01	Bond
8	Ecoterre	10% Ligno	28	0.16	0.05	Bond
9	Ecoterre	15% Ligno	28	0.07	0.02	Bond
10	Errol	60:6 silicate	7	0.05	0.03	Bond
11	Errol	60:7 silicate	7	0.07	0.03	Bond
12	Errol	60:8 silicate	7	0.16	0.06	Bond
13	Errol	60:9 silicate	7	N/A	N/A	Brick
14	Errol	60:10 silicate	7	N/A	N/A	Brick
15	Errol	60:11 silicate	7	N/A	N/A	Brick
16	Ecoterre	60:10 silicate /sugar	7	0.17	0.13	Bond/mortar
17	Ecoterre	60:10 silicate /sugar	28	0.12	0.05	Bond
18	Ecoterre	60:7 silicate	7	0.05	0.01	Bond
19	Ecoterre	60:8 silicate	7	0.11	0.06	Bond/mortar
20	Ecoterre	60:9 silicate	7	0.14	0.06	Mortar
21	Ecoterre	60:10 silicate	7	0.17	0.09	Mortar
22	Ecoterre	60:11 silicate	7	0.15	0.08	Mortar
23	Ecoterre	60:12 silicate	7	0.15	0.10	Mortar

Tabelle 3 Verbundergebnisse (Daten aus sechs Proben für jeden Test) / Table 3 Bond wrench results (data from six specimens for each test)

The average and characteristic bond strengths resulting from the tests conducted are shown in Table 3.

Pre-formulated Lime Mortars

Pre-formulated lime mortars used with Ecoterre bricks achieve 80% of their 28 day bond strength within 7 days, but even at 28 days the bond strength is 30% below desired levels. Failure occurs at the interface between brick and mortar, and it is considered that these types of mortars are inappropriate for use with unfired clay bricks in thin walls.

Lime Mortars

Since hydraulic lime mortars take more than 7 days to set, the bond was only tested at 28 days. At this time the bond was found to be only 10% of the required level. These mortars performed even worse than the pre-formulated lime mortars, and are also considered to be inappropriate for use with unfired clay bricks in thin walls.

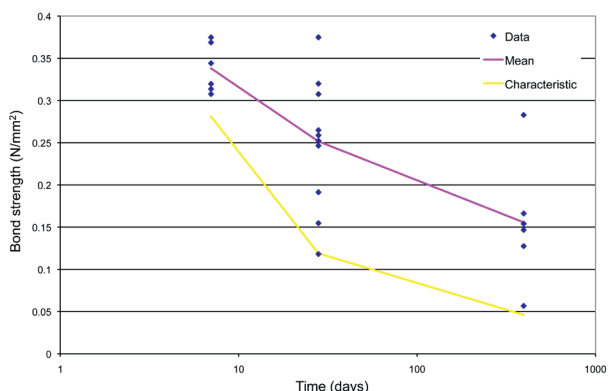
Lignosulphonate Mortars

The lignosulphonate mortar adheres much better to the Errol brick than it does to the Ecoterre brick, and the bond with the

Ecoterre brick is inadequate at 28 days. Specimens made with Errol bricks are of sufficient age to allow long term tests to be conducted, and data up to 396 days are presented in Fig. 3. It would appear that although lignosulphonate mortars produce high bond strengths with some brick types at early stages, the bond becomes more variable and weaker with age, such that within one year the bond is below the required level.

The nature of the bond formed by lignosulphonate mortars with unfired clay bricks is unclear. Scanning electron microscope (SEM) images reveal the growth of a fine ($\sim 2.5\mu\text{m}$ diameter) web of material (Fig. 2). Energy dispersive X-Ray analysis (EDX) of these filaments shows a material which is high in silica content with small amounts of calcium, iron and potassium. This may be indicative of a chemical reaction between the lignosulphonate and the clays in the aggregate. Lignosulphonate mortars are considered to be problematic when used with unfired clay brick thin walls for two reasons:

1. Variable bond strength according to the type of clay in the bricks;
2. Loss of long term bond strength.



nen ist nach 28 Tagen unzureichend. Die Probekörper aus Errol-Steinen sind von angemessenem Alter, um Langzeitversuche zu unternehmen und Daten bis zu 396 Tagen zu erheben, wie in Abb. 3 dargestellt. Es scheint, dass Lignosulfonatmörtel in frühem Stadium hohe Bindekräfte mit einigen Steintypen ausbilden, die Bindekraft aber mit zunehmendem Alter variiert und schwächer wird, sodass die Bindekraft nach einem Jahr unter dem erforderlichen Wert liegt.

Die Art und Weise der Bindung, die der Lignosulfonatmörtel mit den ungebrannten Lehmsteinen eingeht, ist nicht ganz klar. Ein Elektronenmikroskop-Foto zeigt die Bildung einer feinen Netzstruktur ($\sim 2.5\mu\text{m}$ Durchmesser) (Abb. 2). Eine energiedispersive Röntgenmikrobereichsanalyse (EDX) dieser Fäden zeigt ein Material, das hoch an Siliziumgehalt mit geringen Mengen Kalzium, Eisen und Kalium ist. Dies könnte auf eine chemische Reaktion zwischen dem Lignosulfonat und dem Ton im Zuschlag hinweisen. Lignosulfonatmörtel werden in der Anwendung mit ungebrannten Lehmsteinen für dünne Wände aus zwei Gründen als problematisch angesehen:

1. Variierende Bindekraft je nach Art der Tonminerale in den Steinen;
2. Verlust an Langzeit-Bindekraft.

Natriumsilikatmörtel

Natriumsilikatbasierte Mörtel verbinden sich mit allen getesteten Typen von ungebrannten Lehmsteinen und die Bindekraft scheint proportional zur Menge an Natriumsilikat in der Mischung zu sein (Abb. 4). Es scheint, dass die Bindekraft zum Zeitpunkt von 63 Tagen im Weiteren nicht schlechter wird. Um eine gute frühe Bindekraft zu erreichen, sollte man den maximalen Silikatanteil, der noch eine akzeptable Fließfähigkeit des Mörtels zulässt, verwenden. Eine weitere Phase der Forschung wurde daher gestartet, um die Bindekraft von Natriumsilikatmörteln nach längeren Zeitphasen zu beurteilen. Dieses Programm wird sowohl die Druckfestigkeit, die Biegefestigkeit und Dampfdurchlässigkeit der Mörtel bewerten als auch Bewegungseigenschaften des Mauerwerks.

Zusammenfassung

Der Großteil der Primärenergie in gebrannten Ziegeln stammt aus dem Brennprozess und 85% der Herstellungsenergie kann eingespart werden, wenn die Steine in ungebrannter Form ein-

gesetzt werden. Um dies zu erreichen und einen merklichen Effekt im Energieverbrauch zu erzielen, müssen die ungebrannten Steine in den Hauptmarkt eingeführt werden, wo dünne (100-105 mm) Wandstärken angestrebt werden. Damit dies erreicht werden kann, muss die Bindekraft merklich erhöht werden.

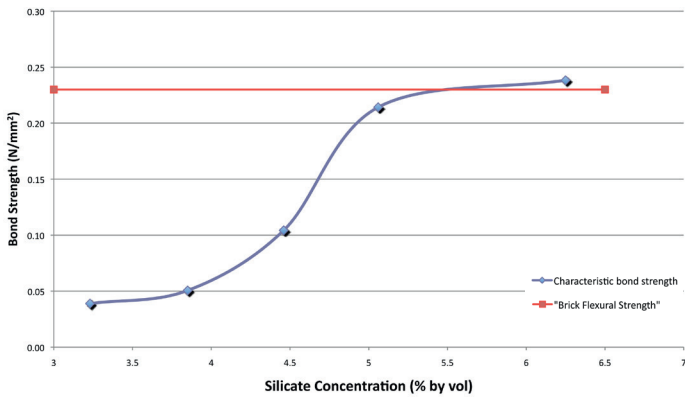
Natriumsilikatbasierte Mörtel zeigten sich in ihrem Verhalten beständiger und beanspruchbarer als andere Mörtel. Zusätzlich haben diese Mörtel einen geringen CO_2 -Gehalt und sind umweltfreundlich, was sie für die Verwendung in der kohlenstoffarmen Bauweise attraktiv macht. Diese Mörtel sind Gegenstand fortlaufender Untersuchungen, die den Einfluss der Zeit und der Umweltbedingungen auf das Verhalten und die Art und Weise der Bindung zwischen Stein und Mörtel beleuchten. Die Verwendung von Natriumsilikatmörteln in dünnen (100 mm) Wänden erscheint vielversprechend.

Danksagungen

Die Autoren möchten sich bei bedanken bei: The Technology Strategy Board; Die Hilfe und Unterstützung durch die Kollegen an der University of Bath sowie die Unterstützung durch folgende Partner: Ibstock Brick, Errol Brick Company, Hanson Construction Products, arc Architects, Lime Technology Limited und the Brick Development Association.

Literatur

- [1] BSI (1999). *Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. BS EN 1015-3:1999. British Standards Institution, London.
- [2] BSI (2005). *Methods of test for masonry – Part 5: Determination of bond strength by the bond wrench method*. BS EN 1052-5:2005. British Standards Institution, London.
- [3] Little B, Morton T (2001). *Building with Earth in Scotland. Innovative Design and Sustainability*. Scottish Executive Central Research Unit, Edinburgh.
- [4] Pearson GT (1992). *Conservation of Clay and Chalk Buildings*, London: Donhead.
- [5] Walker, P., Heath, A., Lawrence, M., Modern innovations in unfired clay masonry in the UK, *Proceedings from the Tenth International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*, February 1-5, 2008, Bamako, Mali



Sodium Silicate Mortars

Sodium silicate based mortars bond with all types of unfired clay bricks tested to date, and the bond appears to be proportional to the amount of sodium silicate in the mix (Fig. 4). It would appear that bond strength up to 63 days does not deteriorate with time. In order to obtain good early bond strength it is considered that the maximum silicate solution concentration, commensurate with acceptable mortar flow, should be used. A further phase of research has therefore been initiated to evaluate the bond strength of sodium silicate mortars over extended time periods. This programme will also evaluate compressive strength, flexural strength and vapour permeability of the mortars as well as movement characteristics of the masonry.

Conclusion

The majority of the embodied energy in fired bricks comes from the firing process, and an 85% saving in manufacturing energy can be achieved if the bricks are used in an unfired form. In order for this to have a significant effect on energy usage, the unfired bricks will have to move into mainstream markets where thin (100-105 mm) wall thicknesses are desirable. In order to achieve this, a significant increase in bond strength is needed.

Sodium silicate based mortars have been shown to perform more consistently and to a higher level of performance than other mortar types. In addition these mortars have a low carbon footprint and are environmentally benign, which makes them attractive for use in low carbon construction. These mortars are the subject of ongoing research, looking at the effect of time and environmental conditions on performance and the nature of the bond between brick and mortar. The use of sodium silicate mortars with thin (100 mm) walls appears promising.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the support of: the Technology Strategy Board; the assistance and support of colleagues at the University of Bath; support from the following partners: Ibstock Brick, Errol Brick Company, Hanson Construction Products, arc Architects, Lime Technology Limited and the Brick Development Association.

References

- [1] BSI (1999). *Methods of test for mortar for masonry* – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). BS EN 1015-3:1999. British Standards Institution, London.
- [2] BSI (2005). *Methods of test for masonry* – Part 5: Determination of bond strength by the bond wrench method. BS EN 1052-5:2005. British Standards Institution, London.
- [3] Little B, Morton T (2001). *Building with Earth in Scotland. Innovative Design and Sustainability*. Scottish Executive Central Research Unit, Edinburgh.
- [4] Pearson GT (1992). *Conservation of Clay and Chalk Buildings*, London: Donhead.
- [5] Walker, P., Heath, A., Lawrence, M., Modern innovations in unfired clay masonry in the UK, *Proceedings from the Tenth International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*, February 1-5, 2008, Bamako, Mali