¹CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Borås, Schweden ²BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland ³ZRS Architekten Ingenieure, Berlin, Deutschland

Vergleich und Modellierung der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen aus Lehmsteinmauerwerk, Wellerlehm und Stampflehm

Schätzungen zeigen, dass ungefähr 1/3 der Weltbevölkerung in Gebäuden aus Lehm arbeitet oder lebt. Einige der Länder mit besonders hohem Anteil an Lehmbauarchitektur sind in der Vergangenheit von schweren Erdbeben betroffen worden, z. B. Iran (Bam 2003), Peru (Pisco 2007) oder Chile (Conception 2010). Obwohl einige Normen und Richtlinien zu Lehmkonstruktionen existieren (India standards 1993, ASTM 2010, Technical Building Standard NTE E. 080 2000, Peru), fehlen häufig zuverlässige Materialkenngrößen und Bemessungsregeln für den Tragwerksplaner. Dies wird weiterhin durch die große Variabilität der Eigenschaften von Lehmbaumaterialien erschwert, welche von eine ganzen Reihe verschiedener Größen abhängen, die die physiochemischen Bindungseigenschaften auf der mikrostrukturellen Ebene beeinflussen, z.B. Partikelgrößenverteilung, Wassergehalt oder die Art der Tonminerale.

Neu eingeführte technische Bestimmungen für Bauen in seismisch aktiven Gebieten, wo Lehmbauten z.T. noch in großer Zahl vorhanden sind (z. B. Marokko, Pakistan), schränken die Verwendung von Lehm als Baustoff entweder stark ein oder verbieten ihn ganz. In Ländern, die über technische Baubestimmungen zum Bauen mit Lehmbaustoffen verfügen (z. B. Neuseeland), sind dann oft nur die wichtigsten Baustoffe und Bauweisen des Neubaus und konstruktive Grundsätze geregelt. Historische Lehmbaustoffe und die Sanierung sind nicht abgedeckt. Fehlende Regelungen und fehlendes Fachwissen führen dann zu nicht fachgerechten Instandsetzung und Ertüchtigung von Lehmbauwerken. Besonders das Einbringen aussteifender Elemente, die im Vergleich zum Lehm zu steif sind, kann im Falle dynamischer Lasten, z. B. im Erdbebenfall, zu verheerenden Schäden führen. Das betrifft insbesondere sowohl den Einbau von Beton- (Torrealva, 2009) oder Stahlbauteilen (Schröder, 2010) als auch die Verstärkungen durch Stahlgitter oder Zementputze (Torrealva, 2009). Bei Erdbeben können diese Teile im ungünstigen Fall verstärkt Lasten in das umgebende weichere Lehmmaterial ableiten mit der Folge, dass dieses regelrecht zerstampft wird. Beispiele von Reparaturen historischer Lehmbauwerke mit zu steifen Materialien zeigten bei Erdbeben entsprechende Schadensbilder, obwohl die gutgemeinten, aber fehlgeleiteten Instandsetzungsmaßnahmen unter statischer Last z.T. durchaus ihre Funktion erfüllten.

Heutzutage lassen sich Bauteilverhalten unter verschiedene Lastsituation durch Finite-Element-Modellierung recht gut vorherbestimmen. Die entsprechenden Eingangsparameter sind für die meisten Massiv- oder Mauerwerksbaustoffe bekannt. Dies trifft leider nicht für Lehmbaustoffe zu. Die Kenntnis der Materialeigenschaften und des Versagensverhalten von Lehmbaustoffen und –bauteilen ist sehr stark fragmentiert und limitiert. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind Teil eines von der EU geförderten Projekts um die mechanischen Eigenschaften für eine Reihe verschiedener Lehmbauweisen vergleichend zu bestimmen. Untersucht wurden Lehmsteinmauerwerk mit Vollsteinen und Lehmmörtel, Wellerlehm und Stampflehm (Tab. 1). Das Ziel war zum einen die Bestimmung mechanischer Kenngrößen für die entsprechenden Lehmbauweisen und die numerische Modellierung deren Versagensverhaltens unter statischer Last.

Experimentelles Programm

Die Ausgangsmaterialien, die im Versuchsprogramm verwendet wurden, stammten von einem deutschen Lehmbaustoffproduzent (Tab. 1). Lehmsteinmauerwerkskörper wurden nach

Anwendung als	Material	Spezifikation	Rohdichte	ρ kg/m³
Lehmstein- mauerwerks-	Lehmstein	Vollsteine NF, mechanisch in die Form geschlagen (plastische Konsistenz, keine Verdichtung)	1863	1870
korper	Lehmmörtel	Größtkorn 4 mm, Schwindmaß < 2 %	1885	
Stampflehm- körper	Stampflehm- fertigmischung	Erdfeuchte Mischung, Größtkorn 16 mm, Verdichtung von Hand	2190	
Wellerlehm- körper	Baulehm- fertigmischung	Plastische Baulehmmischung mit Strohfasern, Faserlänge = 200 – 300 mm, Fasermenge ca. 25 kg/m³	1475	

Tabelle 1: Ausgangsstoffe für die Herstellung von Prüfkörpern

¹CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Borås, Sweden ²BAM Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Germany ³ZRS Architekten Ingenieure, Berlin, Germany

Comparison and modelling of the mechanical characteristics of building components in earth blockwork, cob and rammed earth

Estimates show that approximately 1/3 of the world population work or live in earthen buildings. Some countries with a particularly high proportion of earthen architecture have been hit at some time in the past by major earthquakes, e.g. Iran (Bam 2003), Peru (Pisco 2007) or Chile (Conception 2010). Although some standards and guidelines on earth building exist (India standards 1993, ASTM 2010, Technical Building Standard NTE E. 080 2000, Peru), reliable material parameters and measurement rules for structural designers are often lacking. Their development will continue to be handicapped by the variability of earthbuilding material characteristics, which depend on a whole series of different variables that are influenced by physiochemical binding properties at a micro structural level, e.g. particle size distribution, water content or the types of clay minerals.

Newly introduced technical regulations for building in seismically active regions, where earth buildings to some extent still exist in large numbers (e.g. Morocco, Pakistan), seriously limit the use of earth as a building material or even forbid it completely. In countries, which do have technical regulations for building with earth (e.g. New Zealand), often only the most important building materials and methods for new building as well as the constructional fundamentals are regulated. Historic earthbuilding materials and renovation are not covered. The lacking regulations and technical know-how then lead to inappropriate repairs and strengthening of buildings, particularly by introducing stiffening elements, which compared to earth are too stiff, can lead to devastating damage in the case of dynamic stresses such as earthquakes. This specially applies not only to the incorporation of concrete (Torrealva, 2009) or steel components (Schröder, 2010), but also to lattice steel reinforcement and cement renders (Torrealva, 2009). In earthquakes these components can, in unfavourable situations, impose additional loads onto the surrounding softer earth material, with the result that this literally crumbles. Examples of repairs to historic earthen buildings containing stiffening materials have demonstrated damage patterns of this sort in earthquakes, even though the well-meant but misguided repair measures to some extent adequately fulfilled their function under normal structural load.

These days the behaviour of building components und various load situations can be very effectively predefined through finite element modelling. The respective input parameters are known for most solid or masonry building materials. Unfortunately this does not apply to earthen building materials. Knowledge regarding the material characteristics and the failure behaviour of earth-building materials and components is very fragmentary and limited. The results presented here are part of a EU-sponsored project comparatively to establish the mechanical properties of a series of earth-building methods. Earth blockwork with full blocks and earth mortar, cob walling and rammed earth were examined (Table 1). The aim was first to establish the mechanical parameters for the respective earth-building method and then to ascertain their failure pattern under structural loading through numerical modelling.

Experimental programme

The input materials that were used in the test programme were sourced from a German earth-building product manufacturer (Table 1). Earth block masonry elements were constructed in line with DIN EN 1052-1 and consisted of 6 earth block courses amounting to the dimensions 500×520×110 mm³. The

Used for	Material	Specification	Raw dens.	ρ kg/m³
Earth block masonry	Earth block	Full NF block, mechanically introduced into the mould (ductile consistency, no compaction)	1863	1870
	Earth mortar	Max. grain size 4 mm, shrinkage value < 2 %	1885	
Rammed earth element	Rammed earth pre-mix	Earth-moist mix, Max. grain size 16 mm, hand compacted	2190	
Cob walling element	Building earth pre-mix	Ductile building earth mix with straw fibres, fibre length = 200 – 300 mm, fibre quantity ca. 25 kg/m³	1475	

Table 1: Input materials for producing the test samples



DIN EN 1052-1 hergestellt und bestanden aus 6 Lehmsteinlagen mit einer Größe von 500×520×110 mm³. Die Fugendicke wurde mit 15 bis 20 mm etwas dicker eingestellt um den breiteren Fugen bei historischem Lehmsteinmauerwerk Rechnung zu tragen. Stampflehmprüfkörper wurden mit Schalungen der Größe 500×500×110 mm³ hergestellt. Wellerlehm wurde in typischer Verfahrensweise zuerst in größeren Körpern "gewellert" (ca. 120×60×80 mm³). Nach entsprechender Trocknungszeit (ca. 3 Monate) wurden daraus Prüfkörper der Maße 420×420×110 mm³ mit einer Säge herausgeschnitten. Die Prüfkörper waren bezüglich der Lastrichtung entsprechend den größeren Wellerlehmblöcken orientiert.

Nach der Herstellung der Prüfkörper wurden diese bis nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte bei 23 °C, 50% RLF gelagert. Die Bestimmung der Druckfestigkeit wurde mit einer Universalprüfmaschine nach DIN EN 1052-1 an 4 bis 6 Prüfkörpern durchgeführt. Das Prüfverfahren gilt strenggenommen nur für Mauerwerksdruckfestigkeiten; es wurde aber zu Vergleichszwecken auch für die beiden anderen Lehmbauweisen eingesetzt. Die Versuche erfolgten, abweichend von der Norm, weggesteuert um das Nachbruchverhalten besser zu erfassen. Eine detailliertere Beschreibung der Versuche und Ergebnisse findet sich in Miccoli et al. (2012).

Versuchsergebnisse

Beispiele für den Versuchsaufbau und das Versagensverhalten der verschiedenen Prüfkörpertypen sind in Abbildung 1 wiedergegeben. Für Mauerwerksprüfkörper wurden Druckfestigkeiten zwischen 2,8 und 3,5 MPa und Verformungen zwischen 0,5 und 1,0% ermittelt. Die Prüfkörper versagten überwiegend spröde mit Rissen, die teilweise dem vertikalen Fugenverlauf folgten oder durch Steine gingen (Abb. 1). Stampflehm versagte ähnlich spröde, zeigte aber eine deutlichere Bruchkegelausbildung (Abb. 1). Die Verformungen lagen im Bereich der Mauerwerksprüfkörper, die Druckfestigkeit und E-Modul erreichten jedoch höhere Werte: 2,9 bis 3,9 MPa (ca. 4100 MPa). Wellerlehmprüfkörper zeigten ein komplett verschiedenes Versagensverhalten. Die Druckfestigkeit bewegte sich im Bereich 1,4 bis 1,7 MPa. Die Verformungsraten lagen jedoch bei bis zu fast 6%. Dies war durch die Strohfasern verursacht, die ein duktiles Materialverhalten hervorriefen ohne dass ein charakteristisches Bruchversagen eintrat.

Die Mittelwerte der Versuche sind mit den Standardabweichungen in Tabelle 2 wiedergegeben. In Tabelle 2 finden sich auch die Einzelwerte der Festigkeiten von Lehmstein und Mauermörtel. Die in Abbildung 2 abgebildeten Einhüllenden der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Kurven der Prüfkörper zeigen für Lehmsteinmauerwerk eine Erweichung im Anfangsbereich, wohingegen die Stampflehmprüfkörper sich von Anfang an elastisch verhalten. Die Spannungs-Dehnungskurven der Wellerlehmkörper zeigten besonders im Nachbruchverhalten eine nur graduelle Verringerung der Tragkapazität allerdings verbunden mit großen Verformungsbeträgen. Ergebnisse anderer Autoren deuten hierbei in eine ähnliche Richtung. So stellten Quagliarini und Lenci (2010) fest, dass Lehmsteine mit Zugabe von Stroh eine deutliche Erhöhung der Duktilität erfuhren, wohingegen die Zu-

Tabelle 2: Ergebnisse zu den mechanischen Kennwerten der Prüfkörper und Einzelmaterialien (Stein, Mörtel)

	Druckfes MPa	tigkeit	Zugfestig MPa	gkeit	E-Modul MPa		Verformu ε _{1/3} %	ıng (vert.)	Querdeh	nzahl
	Mittel	STA	Mittel	STA	Mittel	STA	Mittel	STA	Mittel	STA
Lehmstein	5,10	0,31	0,50	0,14	2197	71	0,071	0,002	0,43	0,07
Lehmmörtel	3,16	0,44	0,30	0,08	1067	191	0,500	0,010	nb	nb
Mauerwerk	3,28	0,40	_	_	803	204	0,145	0,045	0,37	0,13
Stampflehm	3,73	0,23	nb	nb	4143	961	0,031	0,007	0,27	0,04
Wellerlehm	1,59	0,03	0,32	0,06	651	441	0,123	0,083	0,15	0,04

Mittel = Mittelwert; STA = Standardabweichung, nb = nicht bestimmt

1 Lehmsteinmauerwerk (links), Stampflehm (mitte) und Wellerlehm (rechts) unter Druck; Beispiele für das Versagensverhalten (Risse sind als Linien wiedergegeben)

1 Earth blockwork (left), rammed earth (centre) and cob (right) under pressure; examples of the failure behaviour (cracks are shown as lines)



slightly wider 15 to 20 mm joints were chosen to emulate the more generous joints in historic earth blockwork. Rammed earth test samples were made in 500×500×110 mm³ shuttering. Cob walling was first prepared in the typical way, in large ca. 120×60×80 mm³ panels. After a suitable drying out period (ca. 3 months), 420×420×110 mm³ test samples were removed with a saw. The test samples were orientated, with regard to load direction, in the same way as the larger cob blocks. After preparing the test samples, they were stored until they had reached an equilibrium moisture content of 50% RLF at 23°C. Establishing the compressive strength was performed with a universal test machine in accordance with DIN EN 1052-1 on 4 to 6 test samples. Strictly speaking, the test procedure was only intended for establishing the compressive strength of masonry, but it was also employed for the two other earth-building methods for comparative purposes. Deviating from the standard, the tests were performed distance-controlled, in order to record better their post-cracking behaviour. A detailed description of the test and the results can be found in Miccoli et al. (2012).

Test results

Examples of the test set-up and the failure pattern of the various test sample types are shown in Fig. 1. For masonry test samples, compression strengths of 2.8 and 3.5 MPa and distortions between 0.5 and 1.0% were recorded. The test samples failed mainly in a brittle fashion with cracks, which partially followed the vertical joint alignment or passed through the blocks (Fig. 1). The rammed earth failed in a similarly brittle way, but showed a more distinct cone-shaped fracture pattern (Fig. 1). The distortions lay within the range of the masonry test samples, though the compressive strength and E-module attained higher values: 2.9 to 3.9 MPa (ca. 4100 MPa). Cob walling samples exhibited a completely different failure pattern. The compressive strength was in the region of 1.4 to 1.7 MPa. The distortions, however, reached almost 6%. This was caused by the straw fibres, which induced ductile material behaviour without the occurrence of the characteristic break failure.

The mean values of the tests are reproduced with the standard deviations in Table 2. Table 2 also contains the individual values for the strengths of earth block and masonry mortar. The enveloping of the individual stress-strain curves of the test samples in Fig. 2 show for the earth blockwork softening in the initial stages, whereas the rammed earth test samples displayed ductile behaviour from the beginning. The stress-strain curves of the cob walling samples showed, particularly in their post-cracking behaviour, only a gradual reduction of load capacity, but associated with substantial distortion levels. Results of other authors have shown a similar tendency in this respect. For instance, Quagliarini and Lenci (2010) discovered that earth blocks with added straw experienced distinctly higher ductility, whereas the adding of increasing quantities of sand produced a successive lowering of compressive strength.

The mechanical parameters of earth building materials spread very significantly between the different types, but substantial fluctuations also occurred within one group. Table 3 shows some values published in the literature for comparison with the

 Table 2: Results of the mechanical parameters of the test samples and individual materials (stone, mortar)

	Compres MPa	sive strength	Tensile st MPa	rength	E-module MPa	!	Distortior ɛ 1/3 %	n (vert.)	Poisson's	ratio
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
Earth block	5.10	0.31	0.50	0.14	2197	71	0.071	0.002	0.43	0.07
Earth mortar	3.16	0.44	0.30	0.08	1067	191	0.500	0.010	nd	nd
Masonry	3.28	0.40	_	_	803	204	0.145	0.045	0.37	0.13
Rammed earth	3.73	0.23	nd	nd	4143	961	0.031	0.007	0.27	0.04
Cob walling earth	1.59	0.03	0.32	0.06	651	441	0.123	0.083	0.15	0.04

Mean = mean value; STD = standard deviation, nd = not determined

2 Vergleich der drei Typen von Lehmbauteilen unter Druckbeanspruchung in Form der Einhüllenden ihrer Spannungs-Dehnungs-Kurven

2 Comparison of the three types of earth-built elements under compression load in the form of the enveloping of their stress-strain curves



gabe von steigenden Mengen von Sand eine sukzessive Erniedrigung der Druckfestigkeit erzeugte.

Die mechanischen Kennwerte von Lehmbaustoffen streuen sehr stark zwischen verschiedenen Arten. Aber auch innerhalb einer Gruppe treten sehr starke Schwankungen auf. Tabelle 3 zeigt einige Werte aus der Literatur im Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen (in fett, s. auch Miccoli, 2012). Das liegt zum einen an den Materialeigenschaften, zum anderen aber auch an den Bestimmungsmethoden der Kennwerte. Leider gibt es zu Lehmbaustoffen und Bauteilen noch keine einheitlichen Prüfverfahren. Zwar werden in absehbarer Zeit in Deutschland Produktnormen zu Lehmbaustoffen bereitgestellt (Ziegert et al., 2011; Müller, et al., 2012), die auch Prüfvorschriften beinhalten, europa- oder weltweit unterscheiden sich Prüfprozeduren noch sehr stark, was auch einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Das Verhalten der drei untersuchten Baustoffe zeigte Unterschiede die von einer Reihe verschiedener Faktoren abhängen, darunter Ausgleichsfeuchte, Fasergehalt, Tonmineralart, Partikelgrößenverteilung (letztere beeinflusst eine Reihe weiterer Eigenschaften wie Rohdichte, Tongehalt, Festigkeitseigenschaften). Im Hinblick auf die Versuchsergebnisse wurden die folgenden Beobachtungen gemacht: 1. Lehmsteinmauerwerk

Druckfestigkeit und Verformung zeigen die für Mauerwerk typische Verzahnungsphase, wenn die Spannungs-Dehnungskurve etwas konkav ist und bevor sie in den elastischen Bereich übergeht. Die Verzahnungsphase kann bis zu 30% der maximalen Festigkeit ausmachen.

2. Stampflehm

Die Ergebnisse bezüglich der Festigkeit und Verformung zeigen ein sprödes Versagen an. In einigen Fällen trat außerdem ein Versagen in Richtung der Verdichtungsebene, wie in Jaquin (2006) beschrieben, auf.

3. Wellerlehm

Druckfestigkeit und Verformung zeigen ein ähnliches Verhalten wie Wellerlehm aus historischen Bauwerken (Ziegert, 2003). Die Druckfestigkeitswerte von Material aus historischen Gebäuden liegen allerdings meist etwas niedriger was z.T. daran liegt, dass die Menge an Strohfasern stark variierte, das Material teilweise schon vorgeschädigt war oder der Tongehalt zu niedrig ausfiel.

Numerische Modellierung

Voraussetzung

Versuche das Materialverhalten von Lehmsteinmauerwerk und Stampflehm durch lineare finite Elementmodellierung zu simu-

Material	Rohdichte kg/m³	Druckfestigkeit MPa	Zugfestigkeit MPa	E-Modul MPa	Querdehnzahl –	Referenz
Lehmsteinmauerwerk	1870	2,14	0,021	315	0,37	Liberatore et al. 2006
Mauerwerk	1850	3,20	0,018	803	0,37	Miccoli et al. 2012
Stampflehm	2100-2300	2,42-2,96		650		Dierks Ziegert 2000
	1790	1,00		90-105		Bui 2007
Wellerlehm	1600-2200	1,50-3,0		500-800		Röhlen Ziegert 2010
	2300	3,70		4100	0,27	Miccoli et al. 2012
	1400-1700	0,45-1,40	0,09-0,34	170-335		Ziegert 2003
	1500	1,60	0,32	650	0,15	Miccoli et al. 2012

Tabelle 3: Zusammenfassung einiger Literaturwerte für mechanischen Kennwerte von Lehmbaustoffen

3 Detail der Homogenität der Lehmbauteile (obere Bildreihe) und die 8-Knoten quadratischen Spannungselemente für die Darstellung des Lehmbauteilkontinuummodells für den Makroansatz (rechte Bildreihe)



above results (in bold type, s. also Miccoli, 2012). This has to do with the material characteristics on the one hand and the determining methods for the parameters on the other. Unfortunately there are still no uniform test procedures for earthen building materials and components. However, in the foreseeable future in Germany product standards for earth-building materials will be made available (Ziegert et al., 2011; Müller, et al., 2012), which will also contain standard test procedures. Test procedures still vary enormously throughout Europe and worldwide, which also has an influence on results.

The behaviour of the three tested building materials revealed differences that are the result of various factors, including equilibrium moisture content, fibre content, clay mineral type, particle size distribution, (the last influencing a series of further characteristics such as raw density, clay content and consistency characteristics). The following observations were made on the test results:

1. Earth blockwork

Compressive strength and distortion produced the interlocking phase typical for masonry, when the stress/strain curve is slightly concave but before it progresses into the ductile stage. The interlocking phase can account for up to 30% of the maximum strength. 2. Rammed earth

The results in respect of strength and distortion revealed a brittle failure pattern. In some cases a failure following the direction of the compaction layer also occurred, as described by Jaquin (2006).

3. Cob walling

Compressive strength and distortion displayed similar behaviour characteristics to cob walling in historic buildings (Ziegert, 2003). The compressive strength values of material from historic buildings, though usually a little lower, was partially because the amount of straw fibres varied considerably, the material was to some extent previously damaged or the clay content was too low.

Numerical modelling

Prior condition

Tests to simulate the material behaviour of earth blockwork and rammed earth by linear finite element modelling had been done before (Mahdi, 2004; Ghannad et al., 2006; Hardwick and Little, 2010), whereas there are no published reports of modelling of cob walling. The aim of modelling attempts was often to establish the stress profile under imposed load and to determine of the natural frequency of a building component and its distortions under dynamic external load. The advantage of linear elastic modelling is that the input values could be estab-

Table 3: Summary of a few published values for	the mechanical parameters of earth building materials
--	---

Material	Raw density kg/m³	Compressive strength MPa	Tensile strength MPa	E-module MPa	Poisson's ratio —	Reference
Earth blockwork	1870	2.14	0.021	315	0.37	Liberatore et al. 2006
Masonry	1850	3.20	0.018	803	0.37	Miccoli et al. 2012
Rammed earth	2100-2300	2.42-2.96		650		Dierks Ziegert 2000
	1790	1.00		90-105		Bui 2007
Cob walling earth	1600-2200	1.50-3.0		500-800		Röhlen Ziegert 2010
	2300	3.70		4100	0.27	Miccoli et al. 2012
	1400-1700	0.45-1.40	0.09-0.34	170-335		Ziegert 2003
	1500	1.60	0.32	650	0.15	Miccoli et al. 2012

3 Detail of the homogeneity of earth-built elements (upper row) and the 8-knot quadratic tension elements for presenting the earth-built element continuum model for the macro starting point (row opposite)





lieren wurden schon früher durchgeführt (Mahdi, 2004; Ghannad et al., 2006; Hardwick und Little, 2010), wohingegen die Modellierung von Wellerlehm in der Literatur noch nicht beschrieben wurde. Ziel der Modellierungen war häufig die Erkennung von Beanspruchungszonen unter Lasteinwirkung und die Ermittlung der Eigenfrequenz eines Bauteils und Verformungen unter dynamischem Lasteintrag. Der Vorteil von linear elastischen Modellen ist, dass die Eingangsgrößen durch verhältnismäßig einfache Materialprüfungen ermittelt werden können. Dies ist speziell bei Lehmbaustoffen der Fall, wo die meisten Kenndaten durch einfache uniaxiale mechanische Prüfungen ermittelt wurden. Bei dieser Art der Modellierung werden jedoch keine Bauteilinhomogenitäten berücksichtigt. Z.B. werden bei Mauerwerk Fugen und Stein zu einem Material homogenisiert. Bei Stampflehm können die Schwächezonen senkrecht zur Verdichtungsrichtung und die Bauteilfugen der Schalungselemente nicht berücksichtigt werden. In der Literatur werden diese Inhomogenitäten bei Lehmbauteilen deshalb normalerweise nicht behandelt. Eine Ausnahme bildet das Model von Jaquin (2006). Linear elastische Modellierung benötigt nur wenige Eingangsdaten und ist bezüglich der moderat erforderlichen Rechenleistung und des geringen Zeitaufwands die am häufigsten verwendete Form der Simulation. Alternativ wird Mauerwerk häufig auch durch Grenzwertanalyse (Orduña und Lourenco, 2002), diskrete Element-Modellierung (Azevedo, 2000) oder nicht-lineare Modellierung (Lourenço and Rots, 1997, Oliveira 2003) simuliert. Für die vorliegende Arbeit wurde trotz der höheren erforderlichen Rechenleistung und Zeitaufwands eine nicht-lineare Analyse verwendet, da davon ausgegangen wurde, dass diese die Simulation von Lehmbauteilen auch nach dem Versagensfall am besten abbildet.

Kalibrierung

Für Mauerwerk wird abhängig von der Detailtreue Mikro-, Mesooder Makromodellierung durchgeführt. Im Fall von Wellerlehm kann im ersten Ansatz eine Makromodellierung angewendet werden, da von einer verhältnismäßig homogenen Struktur eines Bauteils ausgegangen werden kann. Sollen bei Stampflehm der Einfluss der Verdichtungslagen berücksichtigt werden ist eine Mesomodellierung anzuwenden ansonsten reicht eine Makromodellierung aus.

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Kontinuum-isotropische Makromodellierung durchgeführt mit Kenntnisname, dass damit Bauteildetails wie Fugenhaftung und -dicke bei Lehmsteinmauerwerk nicht berücksichtigt werden können. Mit der Software DIANA® wurden entsprechende Modelle entwickelt um die Wirksamkeit von nicht-linearer FE-Modellierung für Bauteile aus Lehm zu ermitteln und um ein konstruktives Modell für Lehmbaustoffe zu definieren, das von Bauingenieuren genutzt werden kann. Die Eingangsdaten für die FE-Modellierung stammten von den vorgestellten eigenen Versuchsergebnissen. Eine Einschränkung war die Verformungsbehinderung der Probenkörper im Bereich des Lasteintrags, was im Modell durch entsprechende Auflager berücksichtigt wurde. Die Geometrie der modellierten Bauteile war identisch zu den in den Versuchen verwendeten. In Abbildung 3 sind die Unterschiede zwischen Versuchskörper und Modell zusammenfassend dargestellt.

Annahmen zum mechanischen Verhalten von Lehmbauteilen sollten grundlegendes Materialverhalten, ausreichende Genauigkeit, Textureffekte, Kontaktflächenphänomene und die Homogenität der Bauteile berücksichtigen. Zuerst wurden ein ,total strain rotating smeared crack'-Modell mit linearen, multilinearen und im Falle von Stampflehm parabolische Eingangskurven basierend auf den Versuchsergebnissen verwendet (Abb. 4 und

Tabelle 4: Eingangsdaten für die numerische Modellierung (aus den vorgestellten Versuchsergebnissen)

	Rohdichte ρ kg/m³	Druckfestigkeit f_c MPa	Zugfestigkeit f_t MPa	E-Modul E MPa	Querdehnzahl v –
Lehmsteinmauerwerk	1850	3,20	0,60 (angenommen)	2400	0,15
Stampflehm	2200	3,70	0,30 (angenommen)	4100	0,27
Wellerlehm	1474	1,60	0,32 (angenommen)	650	0,17

4 Ursprüngliche Eingangskurven für das ,total strain rotating smeared crack'-Modell für Lehmbauteile. ft bezeichnet hierbei die Zugfestigkeit

4 Original input curves for the 'total strain rotating smeared crack' model for earth-built elements. Here *ft* indicates tensile strength



lished by relatively simple material tests. This is particularly the case with earth-building materials, where most of the parameters can be established by straightforward mechanical tests. With this type of modelling, however, no building component homogeneities are taken into account. With masonry, for example, joints and brick are fused into a single material. With rammed earth, on the other hand, weakness zones at right angles to the compaction zone and the building component joints of the formwork elements cannot be allowed for. These inhomogeneities in earth building components are therefore not usually examined. One exception is Jaquin's model (2006). Linear elastic modelling only needs a small amount of input data and is, with regard to the moderate computing power necessary and the low expenditure of time, the most commonly adopted form of simulation. Alternatively, masonry is also often simulated using boundary value analysis (Orduña und Lourenco, 2002), discrete element modelling (Azevedo, 2000) or non-linear modelling (Lourenço and Rots, 1997, Oliveira 2003). For the work discussed here, in spite of the high computer power and the greater time consumption involved, a non-linear analysis was adopted, because it was assumed that this was the simulation method that best also illustrated earth building component behaviour after the failure event

Calibration

For masonry, conducting micro, meso or macro modelling is dependent on paying attention to detail accuracy. In the case of cob, macro modelling can be applied from the first point of contact, because one can assume the building element has a relatively homogenous structure. With rammed earth, if one wants to take the compaction layer into account one should use meso modelling, otherwise macro modelling is sufficient.

Table 4: Input data for the numerical modelling (from the presented test results)

For the work described here, continuum-isotropic macro modelling was employed, in the knowledge that building component details such as joint adhesion and joint thickness with earth blockwork cannot be allowed for. With the DIANA® software appropriate models were developed to establish the effectiveness of non-linear FE-modelling of earthen building elements and to define a constructive model for earth-building materials that can be used by structural engineers. The input data for the FE-modelling came from our own presented test results. One constraint was the distortion resistance of the test samples in the region of the load imposition, which was allowed for in the model by using suitable supports. The geometry of the building elements models was identical with that used in the tests. In Fig. 3 the differences between the tests sample and model are summarised.

Assumptions regarding the mechanical behaviour of earthbuilding materials should allow for fundamental material behaviour, sufficient accuracy, textural effects, contact surface phenomena and the homogeneity of the building elements. First of all a 'total strain rotating smeared crack' model should be used with linear, multi-linear and, in the case of rammed earth, parabolic input curves based on test results (Fig. 4 and Table 4). Since the best results were obtained at the beginning with multi-linear input curves for the compression behaviour, only these were adopted for the ongoing calculations. The behaviour under tensile load was assumed to be brittle, so no results were available (Fig. 4).

Originally the load was imposed onto the earth-building component was a point load, which lay on a stiff intermediate element (similar to a steel beam under test). Due to delays in the iteration procedure, this was further simplified: in the form of a flat-surface load applied directly onto the building element.

	Raw density ρ kg/m³	Compressive strength f _c MPa	Tensile strength f_t MPa	E-module E MPa	Poisson's ratio v _
Earthen blockwork	1850	3.20	0.60 (assumed)	2400	0.15
Rammed earth	2200	3.70	0.30 (assumed)	4100	0.27
Cob walling	1474	1.60	0.32 (assumed)	650	0.17

5 Vergleich der Prüfergebnisse und numerischer Modellierung von Lehmsteinmauerwerk

5 Comparison of the test results and numeric modelling of earthen blockwork



Tab. 4). Da am Anfang mit multininearen Eingangskurven für das Druckverhalten die besten Ergebnisse erzielt wurden, sind für die weiteren Berechnungen nur noch diese angewendet worden. Für die Eigenschaften unter Zugbelastung wurde von einem spröden Verhalten ausgegangen, da hierzu keine Ergebnisse zur Verfügung standen (Abb. 4).

Ursprünglich wurde der Lasteintrag in das Lehmbauteil über eine Punktlast, die auf einem steifen Zwischenelement aufliegt (ähnlich dem Stahlträger im Versuch), simuliert. Aufgrund von Verzögerungen beim Iterationsverfahren wurde dies weiter vereinfacht: In Form eines flächigen Lasteintrags direkt in das Bauteil. Eine horizontale Verformungsbehinderung am Fuß- und Kopfpunkt der Bauteile, analog zur Behinderung durch den Zementausgleichsmörtel, wurde hierbei mit berücksichtigt.

Validierung des Models und Ergebnisanalyse

Lehmsteinmauerwerk

Die Ergebnisse der Modellierung von Lehmsteinmauerwerk sind in Abbildung 5 und 6, sowie Tabelle 5 aufgeführt. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten für die vorgegebenen multilinearen Eingangsgrößen erbrachte befriedigende Resultate (Abb. 5) aber das simulierte Rissmuster (Abb. 6) zeigte nur wenig Analogie zu den beobachteten aus den Versuchen. Bezüglich des Versagensverhaltens von Lehmsteinmauerwerk wären deshalb Mikro- bzw. Mesomodellierung besser geeignet. Die Modellvariante mit monotonem Lastauftrag erreichte das Maxima bei geringerer Spannung (85%) und Dehnung (51%) als im Experiment ermittelt, wohingegen die Variante mit wegbasierender Belastung im Wesentlichen dieselben Maximalwerte erreichte (Abb. 5).

Stampf- und Wellerlehm

Ergebnisse der numerischen Modellierung von Stampf- und Wellerlehm unter einachsiger Drucklast sind in Form von Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abbildung 7 und als Ausgabewerte in Tabelle 6 wiedergegeben. Abbildung 8 zeigt das modellierte Versagensverhalten in Form von Spannungsverteilungen und Rissmuster. Sowohl die Modellvariante mit monotonem Lastauftrag als auch wegbasierend zeigen in ihren Ergebnissen eine gute Übereinstimmung mit den Laborversuchen. Bei Stampflehm ist der Unterschied bei der maximalen Dehnung von Versuch und Modellierung mit etwa 15% verhältnismäßig klein.

Abbildung 8 stellt das Bruchbild mit den vorherrschenden Spannungsverteilungen bei Maximallast dar. Bei wegbasierendem Lastauftrag wurden lokale Spannungsmaxima von 1,36 MPa bei Wellerlehm und 3,5 MPa bei Stampflehm, wie im Laborversuch beobachtet, an den Ecken der modellierten Bauteile erreicht.

	Prüfergebnisse (Mittel)	Wegbasierende Modellierung	Kraftbasierende Modellierung
Max. Spannung $\sigma_{c.peak}$ MPa	(3.2)	3,15	2,8
Dehnung bei max. Sp. ε _{c.peak} %	0.15-0.6	0,395	0,3
Max. Dehnung ε _{c.peak} %	(0.75)	0,68	0,37

Tabelle 6: Ausgabewerte der Modellierung für Stampf- und Wellerlehm

Tabelle 5: Ausgabewerte der Modellierung für Lehmsteinmauerwerk

	Stampflehm			Wellerlehm			
	Prüfergebnis (Mittel)	Kraftbasierende Modellierung	e Wegbasierende Modellierung	Prüfergerbnis (Mittel)	Kraftbasierende Modellierung	Wegbasierende Modellierung	
Max. Spannung $\sigma_{c.peak}$ MPa	(3,7)	3,72	3,5	(1,6)	1,6	1,6	
Dehnung bei max. Sp. ε _{c.peak} %	0,2-0,8	0,38	0,43	0,5-2,0	1,9	1,9	
Max. Dehnung εc.peak %	(0,78)	0,66	0,6	(4,0)	3,3	3,5	

6 Ergebnisse für das Versagensverhalten von Lehmsteinmauerwerk bei einachsigem Lasteintrag

6 Results for the failure behaviour of earth blockwork under single-axis load application



A horizontal distortion resistance at the foot and head of the object was allowed for n this case, similar to the resistance of-fered by cement levelling mortar.

Validating the model and results analysis

Earth blockwork

The results of the modelling of earth blockwork are presented in Figs. 5 and 6, as well as Table 5. The stress-strain behaviour for the predetermined multi-linear input parameters brought satisfactory results (Fig. 5) but the simulated crack pattern (Fig. 6) revealed only low similarity to those observed in the tests. Therefore, with regard to the failure pattern of earth blockwork, micro or meso modelling would have been better suited. The model variant with monotonic load application reached the peak with lower tension (85%) and strain (51%) than was established in the experiment, whereas the variant with distance-based loading reached more or less the same maximum values (Fig. 5).

Rammed earth and cob

The results of the numeric modelling for rammed earth and cob under single-axis compression load are reproduced in the form of stress/strain curves in Fig. 7 and as exit values in Table 6. Fig. 8 shows the failure behaviour model in the form of stress distributions and crack patterns. Both the model variants with monotonic load application as well as the distance-based mod-

Table 5: Output values of the modelling for earth blockwork

els demonstrate that their results accord well with the laboratory tests. With rammed earth the difference in maximum strain between test and model of ca. 15% is relatively small.

Fig. 8 shows the fracture pattern with the principal stress distributions at maximum load. With distance-based load imposition local stress maxima of 1.36 MPa with cob and 3.5 MPa with rammed earth, as observed in the laboratory, were reached at the corners of the building element models.

Comparison of the results

The laboratory results were used in order to simulate the behaviour of earth-building elements under load pressure with the help of non-linear macro FE-Modelling.

Corresponding fundamental material behaviour was taken into account and the geometry of the building element models allowed for the distortion resistance observed in the laboratory during the test procedure. The results, which were calculated using the distance-based 'total strain rotating smeared crack' model, enabled reliable prediction of the failure with regard to the stress-strain curves for all the earth-building elements. For the stress distribution and the associated crack patterns, however, the model only produced satisfactory results with rammed earth and cob. With earth blockwork, due to the composite

	Test results (mean)	Distance-based modelling	Forced-based modelling
Max. tension $\sigma_{c.peak}$ MPa	(3.2)	3.15	2.8
Strain with max. Sp. ε _{c.peak} %	0.15-0.6	0.395	0.3
Max. strain ε _{c.peak} %	(0.75)	0.68	0.37

Table 6: Output values of the modelling for rammed earth and cob

	Rammed earth			Cob walling		
	Test results (mean)	Forced-based modelling	Distance-based modelling	Test results (mean)	Forced-based modelling	Distance-based modelling
Max. tension oc.peak MPa	(3.7)	3.72	3.5	(1.6)	1.6	1.6
Strain with max. Sp. εc.peak %	0.2-0.8	0.38	0.43	0.5-2.0	1.9	1.9
Max. strain εc.peak %	(0.78)	0.66	0.6	(4.0)	3.3	3.5

7 Vergleich der Prüfergebnisse und numerischer Modellierung von Stampf- (links) und Wellerlehmbauteilen (rechts)

7 Comparison of the test results and numeric modelling of rammed earth (left) and cob (right) elements.



Rissmuster



Vorherrschende vertikale Spannung $\sigma_{y, peak}$



Vorherrschende horizontale Spannung $\sigma_{x, peak}$

Vergleich der Ergebnisse

Die Laborergebnisse wurden verwendet um das Verhalten von Lehmbauteilen bei Druckbeanspruchung mit Hilfe einer nicht-linearen Makro-FE-Modellierung zu simulieren. Entsprechendes grundlegendes Materialverhalten wurde berücksichtigt und die verwendete Geometrie der modellierten Bauteile trug den im Labor beobachteten Verformungsbehinderungen durch den Versuchsablauf Rechnung. Die Ergebnisse, die durch das wegbasierende ,total strain rotating smeared crack'-Modell errechnet wurden, erbrachten bezüglich der Spannungs-Dehnungs-Linien für alle Lehmbauteile eine gute Vorhersage des Versagens. Bezüglich der Spannungsverteilung und den sich einstellenden Rissmustern zeigte das Modell jedoch nur bei Stampf- und Wellerlehm befriedigende Ergebnisse. Bei Lehmsteinmauerwerk gab es, aufgrund der Kompositstruktur, keine Übereinstimmung mit Versuch und Modell. Hier ist eine, wesentlich aufwändigere, Mikromodellierung der bessere Weg für das Verstehen und die Vorhersage des Versagensverhaltens von Bauteilen aus Lehmsteinmauerwerk.

Schlussfolgerungen

Bisher gibt es nur sehr wenige systematische Untersuchungen zum Verhalten von Bauteilen aus Lehmbaustoffen unter verschiedenen Lastbeanspruchungen. Für Lehmsteinmauerwerk sind bisher wohl die meisten Ergebnisse zusammengetragen worden (z.B. Dowling, 2005; Torrealva, 2006; Gasparini, 2006). Zu Bauteilen aus Wellerlehm existieren allerdings nur sehr wenige Daten (z. B. Ziegert, 2003). Vergleichende Untersuchungen, die verschiedene Lehmbauweisen in ihren unterschiedlichen Techniken berücksichtigen und deren Verhalten unter verschiedenen Lastfällen beschreiben, fehlen bisher ganz. Vorhersagemodelle zum Verhalten von historischen Lehmbauwerken z.B. im Falle von Erdbeben sind deshalb nur sehr schwer möglich, Folgen von Eingriffen zur konstruktiven Sicherung nur im Ansatz abzuschätzen. Die vorgestellten Ergebnisse tragen zum einen zum Verständnis des Verhaltens von Bauteilen aus verschiedenen Lehmbaumaterialien bei zum anderen ermöglichten sie einen ersten Ansatz in der Modellierung des Bauteilverhaltens einer spezifischen Lehmbautechnik. Zukünftige Forschungen werden mehr auf der Verfeinerung des numerischen Modells liegen und der Simulation komplexerer Lastfälle und Bauteile.

Danksagung

Das Projekt wurde von der Europäischen Union unter der Nummer 244123 finanziert.

Referenzen

Siehe englischsprachigen Text.

8 Results for the failure behaviour of rammed earth (left-hand row) and cob (right-hand row) under single-axis load application (distance-based) with distortion restraint at the foot and head of the test sample

⁸ Ergebnisse für das Versagensverhalten von Stampf- (linke Reihe) und Wellerlehm (rechte Reihe) bei einachsigem Lasteintrag (wegbasierend) mit Verformungsbehinderung am Fuß- und Kopfpunkt der Prüfkörper



Rissmuster



Vorherrschende vertikale Spannung $\sigma_{y, peak}$



Vorherrschende horizontale Spannung $\sigma_{x, peak}$

structure, no agreement was evident between test and model. For this the much more sophisticated micro modelling would be a better choice for understanding and predicting the failure patterns of earth block building elements.

Conclusions

Until now there have only been a few systematic investigations into the behaviour of earthen building components and materials under different load conditions. Most of the assembled results have been for earth blockwork (e.g. Dowling, 2005; Torrealva, 2006; Gasparini, 2006). For building elements in cob only a small amount of data exists (e.g. Ziegert, 2003). Comparative investigations, which take into account the various earthen building methods with their differing techniques and describe their behaviour characteristics under different load conditions, are completely lacking. Prediction models for the behaviour of historic earth-built examples, e.g. in cases of earthquakes, are therefore only rarely possible; the effect of interventions to improve structural integrity are only beginning to be appraisable. The presented results contribute to an understanding of the behaviour of building elements made with the various earthen materials, for example, by enabling the first attempts in the modelling of building element behaviour in a specific earth building technique to be undertaken. Future research will concentrate on the refinement of numeric models and the simulation of more complex loading situations and building components.

Acknowledgement

The project was financed by the European Union under the number 244123.

Literature

- ASTM E2392/E2393 M (2010) Standard guide for design of earthen wall building systems.
- [2] Azevedo J., Sincraian G. (2001) Modelling the Seismic Behaviour of Monumental Masonry Structures. International Congress Archi2000, UNESCO, Bethlehem, Palestine.
- [3] Bui Q.B., Morel J.C. (2009) Assessing the anisotropy of rammed earth. Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 3005-3011.
- [4] Dierks, K. and Ziegert, C. (2000) unpublished Kapelle der Versöhnung Schlussbericht zur Fremdüberwachtung Forschungs- und Seminarbericht des Fachgebietes Tragwerkslehre und Baukonstruktion der TU Berlin
- [5] DIN EN 1052-1 (1998) Methods of tests for masonry. Part 1: Determination of compressive strength.
- [6] Dowling D., Samali B., Li J. (2005) An improved means of reinforcing adobe wallsexternal vertical reinforcement, In: SismoAdobe 2005, May 16-19, 2005, PUCP, Lima, Perú, 1-19.

- [7] Gasparini J. (2006) Erdbebensicherheit von Lehmsteinbauten untersucht f
 ür den Standort Oaxaca, Mexico. Doctoral thesis, Institute of Technology, Berlin.
- [8] Ghannad, M.A., Makhshi, A., Mousavi Eshikiki, S.E., Khosravifar, A., Bozorgnia, Y., Taheri Behbahani, A.A. (2006) A study on Seismic Vulnerability of Rural Houses in Iran, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (A joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
- [9] Hardwick J., Little J. (2010). Seismic Performance of Mud Brick Structures. Engineers Without Borders UK, National Research Conference.
- [10] IS13827 (1993) Indian standard guidelines for improving earthquake resistance of earthen buildings
- [11] Jaquin P.A., Augarde C.E., Gerrard C.M. (2006) Analysis of Historical Rammed Earth construction. Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India.
- [12] Liberatore D., Spera G., Mucciarelli M., Gallipoli M., Santarsiero D., Tancredi C., Masini N., Racina V., Capriuoli A., Cividini A., Tedeschi C. (2006) Typological and Experimental Investigation on the Adobe Buildings of Aliano (Basilicata, Italy), Proceedings of the Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India.
- [13] Lourenço P., Rots J. G. (1997). A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 7, pp. 660-668.
- [14] Mahdi T. (2004) Performance of Traditional Arches and Domes in Recent Iranian Earthquakes. XIII World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, p. 2871.
- [15] Miccoli L., Müller U., Perrone C., Ziegert C. (2012) Earth block masonry, rammed earth and cob: earthen components from different construction techniques and their structural performance. In: Proc. of XIth International conference on the study and conservation of earthen architectural heritage, Terra 2012 Lima, Peru, April 22nd-27th.
- [16] Müller U., Ziegert C., Kaiser C., Röhlen U. (2012) Eigenschaften industrieller Lehmbauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmsteinmauerwerk, Mauerwerk.
- [17] NTE E.080 Adobe (2000) Technical Building Standard, Peru.
- [18] Oliveira D.V. (2003) Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading, PhD Thesis, University of Minho.
- [19] Orduña, A., Lourenço, P. B. (2001) Limit analysis as a tool for the simplified assessment of ancient masonry structures, Historical Constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds.), Guimarães, pp. 511-520.
- [20] Quagliarini E., Lenci S. (2010) The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. Journal of Cultural Heritage 11(3): 309-314.
- [21] Röhlen und Ziegert (2010) Lehmbau Praxis-Planung und Ausführung.
- [22] Schröder H. (2010) Lehmbau-Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Vieweg+Teubner, Wiesbaden
- [23] Torrealva D., Vargas Neumann J., Blondet M. (2009) Earthquake resistant design criteria and testing of adobe buildings at Pontificia Universidad Catòlica del Peru. In: Proc. of the Getty seismic adobe project 2006 colloquium The Getty Conservation Institute, 3-10.
- [24] Ziegert C. (2003) Lehmwellerbau–Konstruktion, Schäden und Sanierung, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Institute of Technology, Berlin.
- [25] Ziegert C., K. Dierks, U. Müller (2011) Lehmsteine und Lehmmörtel-nachhaltige Bauprodukte auf dem Weg zur Stoffnorm, in: W. Jäger (ed), Mauerwerkskalender 2011, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, pp. 57-70.