Lorenzo Miccoli[1], Daniel V. Oliveira[2], Rui A. Silva[2], Anastasios Drougkas[3], Patrick Fontana[1]

[1] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Germany. [2] ISISE University of Minho, Guimarães, Portugal, [3] National Technical University of Athens, Greece

Numerische Modellierung von Stampflehm unter verschiedenen Lasteinflüssen

Der Beitrag präsentiert einen Vergleich zwischen verschiedenen numerischen Modellierungsansätzen die dazu dienen sollen, das flächige Verhalten von Stampflehmwänden, genauer unter axialer, diagonaler und zyklischer Scherkraftbelastung zu simulieren. Im ersten Teil der Studie werden die mechanischen Eigenschaften der Wandscheiben, die unter einachsiger und diagonaler Druckbelastung getestet wurde und der Wände, die in flächigen, zyklischen Scherkraftbelastung getestet wurden, dargestellt. Die Ergebnisse werden verwendet, um die Finite Elemente Simulation anzuwenden und zu bewerten. Die numerische Modellierung der getesteten Stampflehmproben wird dann im zweiten Teil diskutiert. Ein nichtlineares Materialgesetz basierend auf dem Gesamtdehnungsrissmodell *(total strain rotating crack model – TSRCM)* wurde, wie durch die Software DIANA® [1] verwendet, angesetzt. Ziel dieser hier präsentierten numerischen Analyse ist es, das Verhalten von Stampflehm unter verschiedenen Lasteinflüssen zu simulieren. Für die Wandscheiben wurden Versuche unter linearer Last, sowohl in Makro- als auch Mikromodellansätze für die Simulation der experimentellen Versuche gewählt. Für die Wände, welche zyklischer Belastung ausgesetzt waren, wurden nur die Mikromodellansätze für die Simulation der experimentellen Versuche gewählt. Das betreffende FEM Modell wurde mit den experimentellen Ergebnissen kalibriert. Die Stampflehmlagen wurden mit durchgehenden Elementen, die Kontaktflächen zwischen den Lagen mit Oberflächenelementen repräsentiert. Dieser Ansatz erlaubte die Bewertung des Einflusses der auftretenden Schwächung in den Oberflächen zwischen den Lagen auf das Scherverhalten des Stampflehms. Ziel der numerischen Simulation von zyklischen Versuchen war es, die Eignung allgemeiner Analysemethoden (z.b. für Mauerwerk) für die Analyse von Stampflehm einzuführen und anzuwenden. Stampflehm zeigt brüchige Eigenschaften vergleichbar zu Mauerwerksbaustoffen und wird in geometrischen Formen, wie Wänden, genutzt, die im Mauerwerk üblich sind.

Experimentelles Programm

Einachsiger Druck und Diagonaldruckversuche

Ein Hersteller von vorgefertigten Lehmbaustoffen (Claytec GmbH, Germany) lieferte den Lehm, der für die Probekörper verwendet wurde. Der Stampflehm hat eine Rohdichte von 2,190 kg/m^3, eine Korngrößenverteilung von 0–16 mm und ein Schwindmaß von 0,5%. Das experimentelle Programm bestand darin, fünf Stampflehm-Wandscheiben unter axialem Druck und fünf andere unter diagonalem Druck zu testen. Die Wandscheiben hatten etwa die Abmaße 500 mm × 500 mm × 110 mm (Abb. 1a). Die genaue Beschreibung der Materialeigenschaften und stationären Tests sind an andere Stelle dokumentiert [2]. Die fünf Druckversuche wurden mit Distanzmessungen (Verformungsmessungen) durchgeführt, wobei die Prüfgeschwindigkeit so definiert wurde, dass das Versagen innerhalb von 20-30 Minuten eintrat. Die bei diesen Versuchen an den Probekörpern ermittelten axialen Spannungsverteilungskurven sind in Abb. 1b präsentiert, ebenso wie die entsprechenden Rahmenbedingungen. Diese Kurven zeigen deutlich das nichtlineare Verhalten des Stampflehms unter Druckbelastung, welches schon bei geringem Druckbelastung beginnt. Ein typisches Rissbild einer Stampflehmwandscheibe, die unter Druckbelastung getestet wurde, zeigt Abb. 1c. Die mechanischen Eigenschaften, welche die Druckversuche lieferten sind, in Tabelle 1 dokumentiert.

Die fünf diagonalen Druckversuche wurden gemäß des in den ASTM E 519-10 [3] vorgegebenen Versuchsablaufs durchgeführt (Abb. 2a). Die Versuche fanden unter einer Krafteinleitungsgeschwindigkeit von 130 N/s bis zum Versagen statt. Abbildung 2b

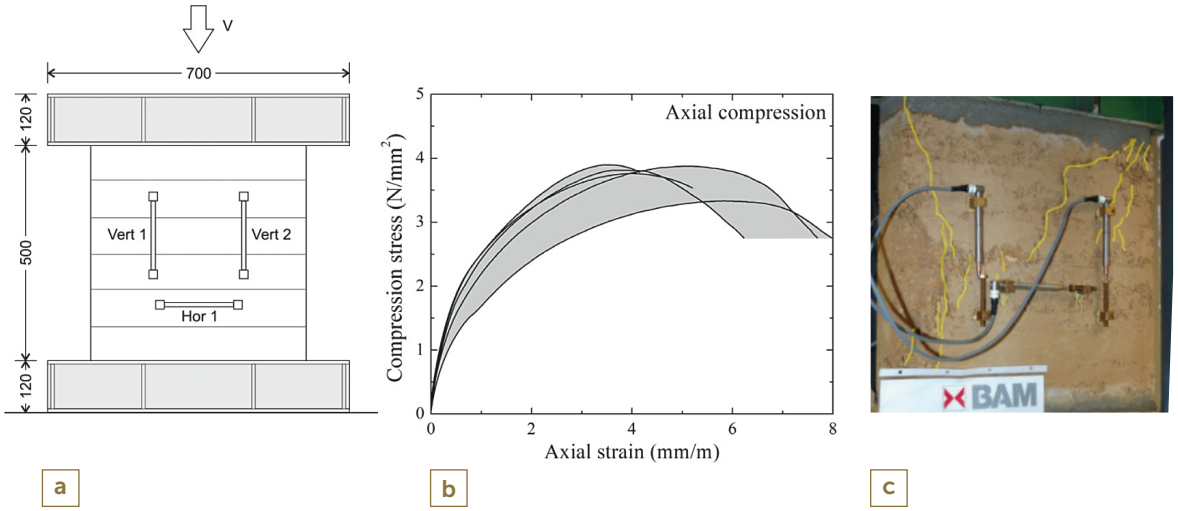


Abb. 1 Druckversuche: (a) Versuchsaufbau (Abmessungen in mm); (b) Druckspannungsverteilungskurven unter betreffenden Rahmenbedingungen; (c) Rissbild bei einer der getesteten Wandscheiben.

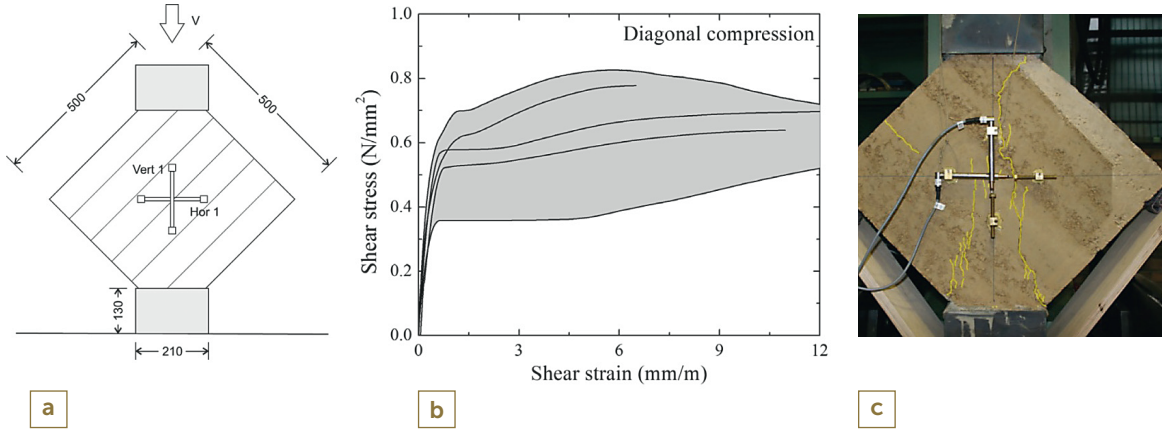


Abb. 2 diagonale Druckversuche: (a) Versuchsaufbau (Abmessungen in mm); (b) Scherspannungsverteilungsdiagramme unter betreffenden Rahmenbedingungen; (c) Rissbild bei einer der getesteten Wandscheiben.

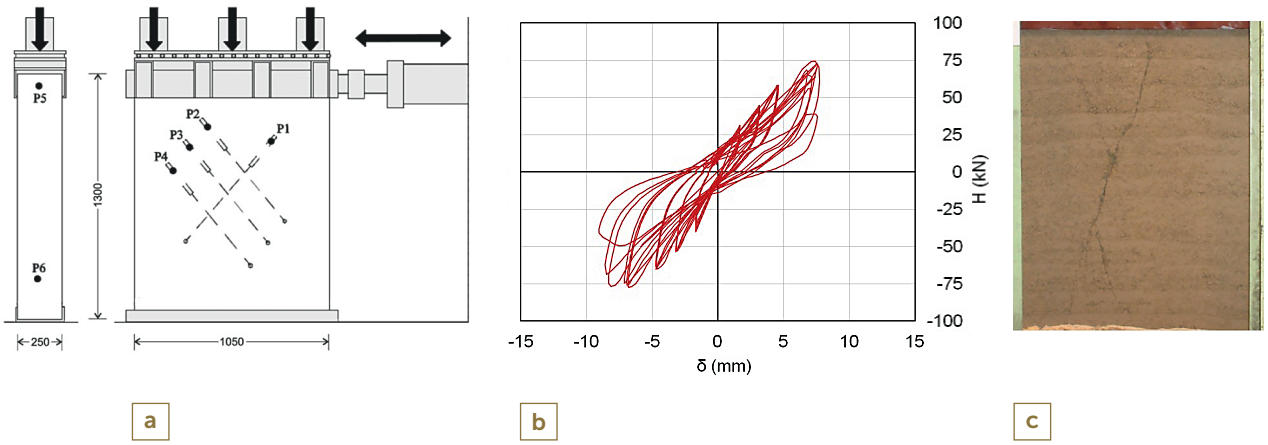


Abb. 3 Zyklische in der Wandebene liegende Scherdruckversuche: (a) Versuchsschema und Sensorplatzierung (P1–P6); (b) experimentelle Hysteresekurven; (c) Rissbild bei einer der Stampflehmwände.

präsentiert die Scherspannungsdiagramme der Probekörper unter den betreffenden Rahmenbedingungen. Grundsätzlich zeigten die Wandscheiben einen frühen Spitzenwert der Scherspannung, der von einer Scherverfestigung gefolgt wurde. Es muss festgestellt werden, dass die Scherverfestigungsphase zu den meisten Scherverformungen an den Probekörpern während der Versuche führte. Ein typisches Rissbild einer Stampflehmwandscheibe, die unter diagonaler Druckbelastung getestet wurde, zeigt Abb. 2c. Die mechanischen Eigenschaften, welche die diagonalen Druckversuche lieferten sind, in Tabelle 1 dokumentiert.

Zyklische Scherdruckversuche

Drei Stampflehmwände wurden an der BAM hergestellt und für die zyklischen Scherdruckversuche verwendet. Die Wände haben die Abmessungen 1300 mm × 1050 mm × 250 mm. Eine detaillierte Beschreibung der Probekörpererstellung und der zyklischen Versuche sind an anderer Stelle dokumentiert [4].

Drei in der Wandebene liegende zyklische Scherdruckversuche wurden am *Institute of Theoretical and Applied Mechanics (ITAM)* in Prag durchgeführt. Die in der Wandebene liegenden zyklischen Scherdruckversuche wurden gemäß des Prüfverfahrens der Richtlinie RILEM TC 76-LUMC3 [5] durchgeführt. Den Versuchsaufbau mit der Positionierung der Sensoren zeigt die Abbildung 3a. Eine zusätzliche vertikale Drucklast von 0,56 N/mm² wurde auf die Wand mittels hydraulischen Buchsen auf einem Stahlträger an der Oberkante der Probekörper übertragen. Die Hysteresekurven der horizontalen Lasten und der daraus folgenden Verformungen für jeden Lastabschnitt zeigt Abbildung 3b. Die Grafik zeigt sowohl die Spannung und den Druckanteil der zyklischen Kurven. Das typische X-förmige Rissbild entlang der Diagonalen zeigt Abbildung 3c.

Alle gemessenen Lastverformungsdiagramme zeigen ein für Scherversagen typisches Bild, das auf das begrenzte Gleiten der Stampflehmlagen zurückzuführen ist. Die Maximalwerte der Querlasten (H), Verformungen (δ) und betreffenden Verdrehungswinkel (θ) zeigt die Tabelle 1.

Numerische Modellierung

Eingangsüberlegungen (Geometrie, Grenzbedingungen und Lasteintrag)

Numerische Analysen für die Simulation der experimentellen Versuche wurde unter Verwendung der nichtlinearen FEM durchgeführt. Ein Flächenspannungszustand wurde für alle Modelle angenommen, da dies eine weniger komplexe Analyse und Programmierung am Computer erlaubt. Die 2D Analyse repräsentiert eine zulässige Annahme durch die Geometrie der Wandscheiben und der in der Wandebene liegenden Belastung. Achtfach gehaltene Viereckelemente (CQ16M) wurden verwendet, um den Stampflehm sowohl in Makro- als auch in Mikromodellierungsansätzen zu simulieren. Beim Mikromodellierungsansatz, wurden die Oberflächen zwischen den Lagen unter Verwendung von sechsfach gehaltenen Null-Wandstärke-Oberflächen-Elementen (CL12I) simuliert.

Das Finite Elemente Netz des Makromodells, welches zur Simulation der axialen Druckversuche verwendet wurde, bestand aus 400 viereckigen Elementen. Das Mikromodell bestand aus 480 viereckigen Elementen und 100 Oberflächenelementen, wobei die Lagenstärke mit 84 mm angenommen wurde. Das Makromodell, welches die diagonalen Drucktests simulierte bestand aus 400 viereckigen Elementen, während das Mikromodell aus 460 viereckigen Elementen und 100 Oberflächenelementen bestand.

Die Grenzbedingungen, welche für die Modelle zur Simulation der axialen Druckversuche gesetzt wur-

Tabelle 1. Ergebnisse der stationären und zyklischen Versuche (Standardabweichung in Klammern)

Einachsiger Druck			DiagonalDruck		Zyklischer Scherdruck		
Druck-festigkeit f_c	Young's Modul E_0	Poisson's ratio ν	Scher-festigkeit f_s	Scher modul G_0	Querlast H_{max}	Verformung δ_{max}	Verdrehungs-winkel θ_{max}
N/mm²	N/mm²		N/mm²	N/mm²	kN	mm	%
3,73 (0,23)	4207 (921)	0,27 (0,03)	0,70 (0,11)	1582 (333)	70,37 (9,43)	6,67 (0,51)	0,51 (0,04)

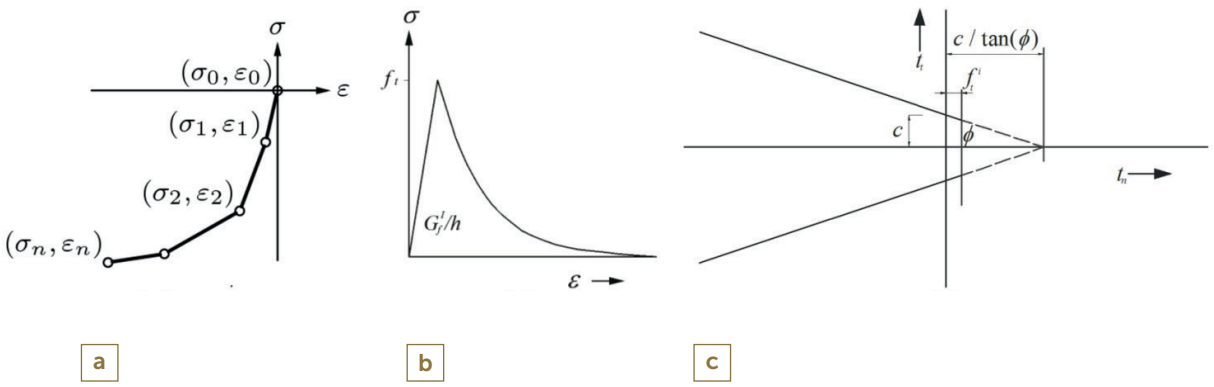


Abb. 4 Materialmodelle die der Analyse zugrunde liegen. Spannungs-Dehnungs-Verhältnisse die den TSRCM zugrunde liegen: (a) Druck (multilinear); (b) Spannung (exponentiell); (c) Coulomb-Friktion-Modell das für die Modellierung der Oberflächen zwischen den Stampflehmlagen verwendet wurde [1]

den, gingen von einer perfekten Einspannung aus. Die Last wurde unter der Annahme gleichmäßiger vertikaler Verformung an der eingespannten Ecke an der Oberkante der FEM Modelle eingebracht. Die Modellierung der diagonalen Druckversuche erfolgte ebenso wie die der axialen Druckversuche.

Für die Simulation der zyklischen Scherdruckversuche wurde ein numerisches Modell unter Anwendung der Mikromodellierung mit durchgehenden und oberflächigen Elementen wie bei den stationären Versuchen verwendet. Zusätzlich wurden zwei feste Haltebalken in das Modell einbezogen: Einer diente als Fundament und einer zur Halterung an der Oberkante. Der untere Balken wurde am Fundament der Probekörper fixiert und an der untersten Lage des Stampflehms mittels einer nichtlinearen Schnittstelle verbunden. Der Balken an der Oberkante war in gleicher Weise an der obersten Lage des Stampflehms verbunden, war aber in der Lage sich zu bewegen und zu rotieren, wie in den Versuchsbedingungen vorgesehen. Insgesamt wurden 1323 Flächenspannungs- und 378 Schnittstellen- Elemente für das FEM Netz verwendet. Eine vertikale Drucklast wurde gleichmäßig an der Oberkante des Kopfbalkens eingebracht. Die zyklische Horizontallast wurde gemäß der auftretenden Verformung am Kopfbalken eingebracht.

Zugrundeliegende Gesetze

Der TSRCM wurde entworfen für ununterbrochene Elemente. Dieses Modell war in der Lage, das nichtlineare Verhalten der Stampflehmlagen hinsichtlich Spannung und Druck nachzuvollziehen. Für das Druckverhalten wurde eine multilineare Kurve, welche den experimentellen Kurven gleicht, angenommen (Abb. 4a). Für das Spannungsverhalten wurde die exponentielle Verformungskurve (Abb. 4b) angenommen. Beide basieren auf Teilenergie- und Finite Elemente Rissbandbreitenkonzepten.

Das Dehnungsversagenskriterium wurde im Hinblick auf die maximale Grundspannung und die Risse innerhalb der Probekörper bewertet. Die Rissbandbreite (h) der Elemente wurde als abhängig von der Fläche des Elements (A) gemäß Gleichung (1) angenommen. Diese Annahme erlaubt es, die Ergebnisse der numerischen Analyse unabhängig von der Größe des Finite Elemente Netzes machen. Diese Annahme ist anwendbar für brüchige Materialien wie Stampflehm.

$$h = \sqrt{A}$$

Ein sekantes Entlasten und Wiederbelasten wurde angenommen, ebenso wie eine lineare Elastizität für die Stahlbalken oben und unten am Probekörper. Ein Mohr-Coulomb-Reibungsversagenskriterium mit einem Dehnungsabriss wurde für die Schnittstellenelemente vorgesehen (Abb. 4c).

Dieses Kriterium erlaubte es, das Schnittstellenverhalten in Kombination von Spannung und Scherkraft zu simulieren. Diese Schnittstellen repräsentieren keine physikalisch konstruktive Einheit, wie z.B. eine Mör-

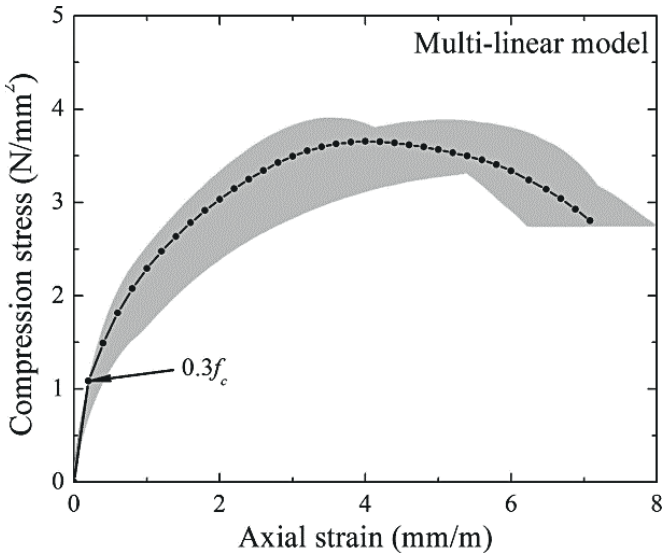


Abb. 5 Multilineare Beziehung beim Druck entnommen den FEM Modellen

telfuge. Sie sind in der Lage, das gegenseitige Zusammenwirken der Stampflehmlagen ebenso zu simulieren, wie im Falle von zyklischen Belastungen, zwischen den Randlagen und den begrenzenden Balken.

Die angenommenen Werte für die Parameter sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Durchschnittswerte aus den axialen Druckversuchen wurden verwendet, um die Eingangswerte für die Zugfestigkeit (f_c), das Young Modul (E_0) und das Poisson's Verhältnis (u). Die Eingangswerte der verbleibenden Parameter wurden auf der Basis der empfohlenen Werte für historisches Mauerwerk angenommen. Die Druckbruchenergie (G_c) wurde mit 1,6 f_c angenommen, die Zugfestigkeit (f_t) mit 0,1 f_c, die mode-I Zugbruchenergie (G_f^I) mit 0,029 f_t.

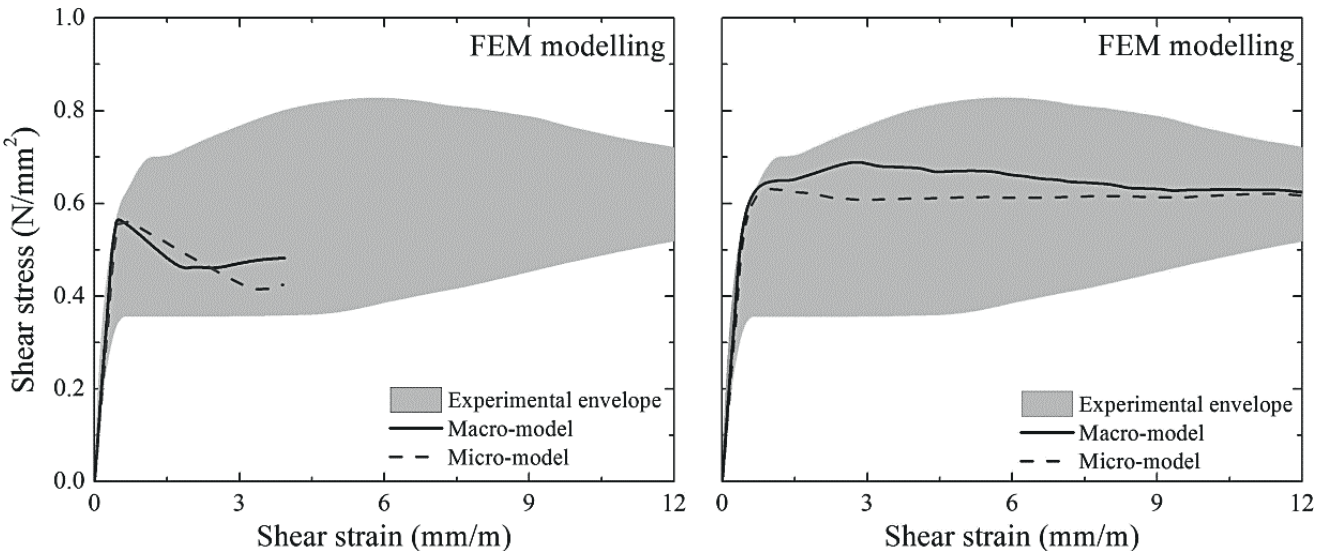
Für die Simulation der zyklischen Versuche wurden die Eingangswerte der Schnittstellennormalsteifigkeit (k_n) und der Schersteifigkeit (k_t) zunächst sehr hoch angenommen, um eine Konzentration der elastischen Verformungen in den Schnittstellenelementen zu verhindern. Daher wurde K_n mit $100E_0$ angenommen und k_s wurde unter Verwendung der Gleichung (2) abgeschätzt. Die Kohesion (c) wurde abgeschätzt als eine Funktion der Zugfestigkeit, die man für Stampflehm annimmt, genauer gesagt mit $1{,}5f_t$. Der Verdrehungswinkel (f) wurde mit 37° angenommen und der Dilatanzwinkel (y) als null. Die Zugfestigkeit der Schnittstellen (f_t^i) wurde als $2/3f_t$ definiert, während man beachten muss, dass der maximale Wert, der mathematisch bei dem Modell erlaubt ist, bei c/tan(f) liegt. Letzten Endes wurde das Zugverhalten der Schnittstellen als brüchig angenommen.

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\mathrm{n})}$$

Kalibrierung der Modelle und Ergebnisse

Die Kalibrierung der Modelle bestand in einem iterativen Prozess, bei dem die numerische Antwort mit dem experimentellen Kurven verglichen wurden. Zunächst wurden die Werte, welche für die Steifheit der Schnittstellenelemente übernommen wurden, vergleichend mit den Makro- und Mikromodellversuchen bewertet. Dieser Vergleich wurde durchgeführt indem die Eingangswerte der Parameter herangezogen wurden und eine Erhöhung und Verringerung jeweils in einer Magnitude erfuhren. Die Details dieser

Abb. 6 Verhalten des Marko- und des Mikromodells bei den diagonalen Druckversuchen: (a) Nutzung von Eingangsparametern; (b) nach der Kalibrierung.



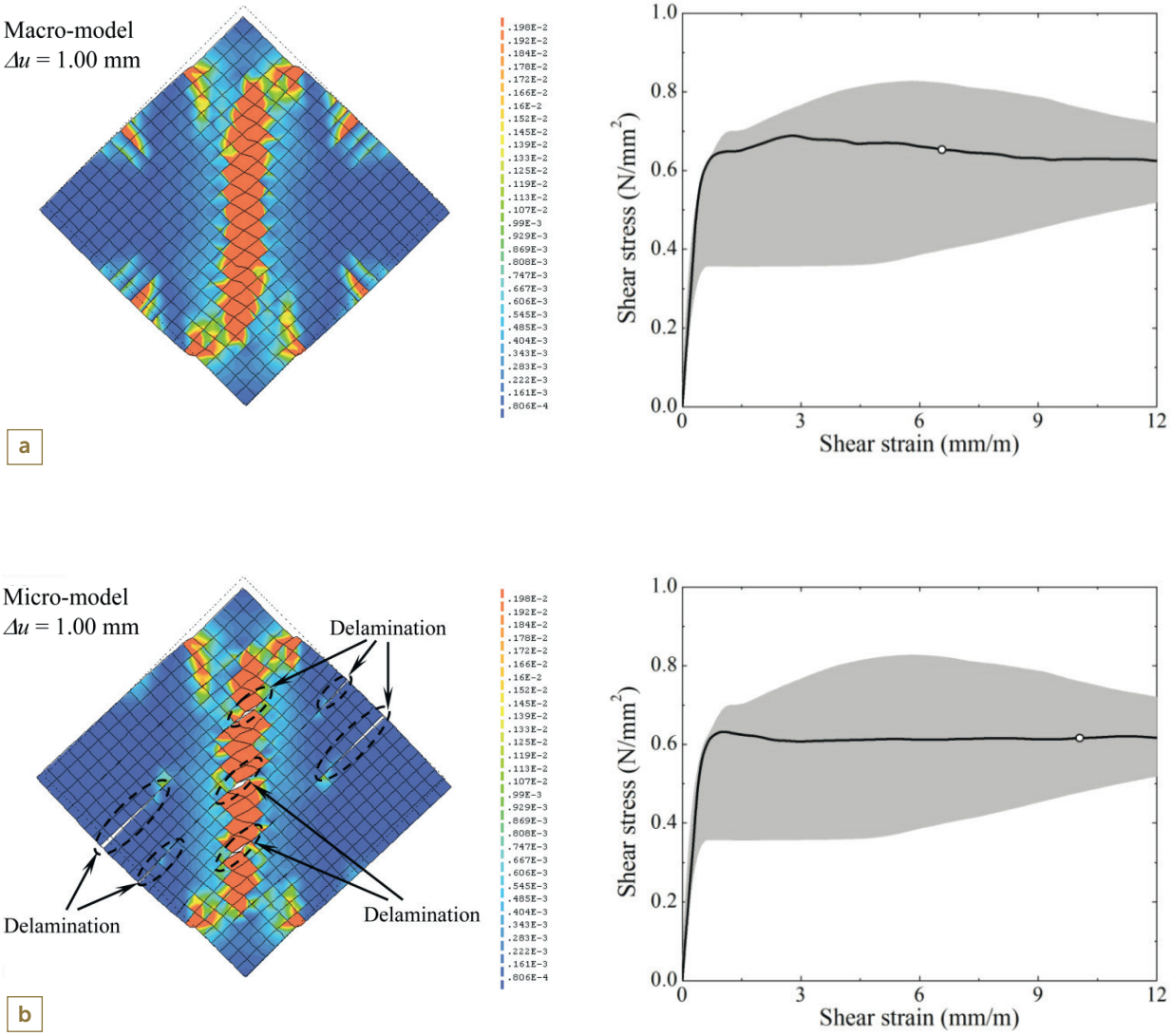


Abb. 7 Prinzipielle Zugspannungen, die eine erzwungene Vertikale Verformung (*Du*) von 1,0 mm erzeugt: (a) Makromodell; (b) Mikromodell.

Kalibrierungsprozesses sind in der vorrausgegangenen Studie [6] dargelegt..

Es wurde entschieden die Eingangswerte der Steifheit zu nutzen. Eine multilineare Beziehung wurde eingeführt, um dem Vor-Bruch-Verhalten bezüglich der Deformierung besser folgen zu können. Diese Beziehung wurde durch Zuhilfenahme der Durchschnittskurve der axialen Druckversuche kalibriert, was zu den in Abbildung 5 dargestellten Kurven führte. Der 2. Punkt in der multilinearen Beziehung wurde mit $0{,}3f_C$ definiert, unter Berücksichtigung des experimentellen Young Moduls.

Abbildung 6a zeigt die Scherspannungs-Scherdehnungsdiagramme des Makro- und Mikromodells der diagonalen Druckversuche unter Verwendung der Referenzwerte der Parameter und der multilinearen Beziehung, welche zuvor unter axialem Druck kalibriert wurde. Beide Modelle weisen gleiche Kurven auf und ein Verhalten, das viel brüchiger ist als in den experimentellen Kurvenverläufen. Dies bedeutet, dass die Kalibrierung der Modelle eine Justierung von G_f^I benötigt, welches der Hauptparameter zur Überwachung der Brüchigkeit ist. Abbildung 6b zeigt die Kurven der kalibrierten Modelle, welche aus der 10-fachen Erhöhung der Eingangswerte resultieren. Diese wichtige Erhöhung wird durch den Fakt gerechtfertigt, dass Stampflehm sich mehr wie ein monolithisches Material verhält, als es Mauerwerk tut.

Die Kurve des Makromodells wird bestimmt von einem frühen Spitzenwert der Scherspannung, gefolgt von einer kleinen Scherverfestigung bis das Maximum der Scherspannung erreicht ist. Auf der anderen Seite zeigt die Kurve des Mikromodells diesen frühen Spitzenwert nicht. Anstelle dessen erreicht das Modell zunächst sein Maximum der Scherspannung,

TSRCM

Material	Young Modul E_0 N/mm²	Poisson's ratio n	Druck-festigkeit f_c N/mm²	Druckbruch Energie G_c N/mm	Zugfestigkeit f_t N/mm²	Zugbruch Energie G_f^I N/mm
Stampflehm	4207	0,27	3,7	5,98	0,37	0,011

COULOMB FRICTION MODELL

Material	Schnittstellen Normalsteifigkeit k_n N/mm³	Schersteifigkeit k_s N/mm³	Kohesion c N/mm²	Verdrehungs winkel tan(f)	Dilatanz winkel tan(y)	Zugfestigkeit in der Schnittstelle f_t^i N/mm
Schnittstelle	4,21×105[a]/42,1[b]	1,66×105[a]/16,6[b]	0,56	0,75	0	0,25

[a] *stationäre Belastung* [b] *zyklische Belastung*

Tabelle 2 Werte der Parameter, die für die numerische Modellierung angenommen wurden

gefolgt von einem Abfall der Spannung mit einer subtilen Scheraufweichung. Möglicherweise ist der Abfall der Spannung auf das Versagen der Schnittstellenelemente zurückzuführen, welches dann durch die Spannungsumverteilung kompensiert wird. Dennoch ist die Entwicklung der Makromodellkurve näher an den Werten der experimentellen Versuche. Das Makromodell zeigt höhere maximale Scherspannungen als das Mikromodell, dessen Werte bei 0,69 N/mm² und 0,63 N/mm² liegen. Beide Werte korrespondieren mit einer kleinen Unterbewertung des Durchschnitts der Scherspannungen, die bei den experimentellen Versuchen ermittelt wurden (0.70 N/mm²). Grundsätzlich zeigt sich, dass beide Kurven innerhalb der experimentellen Hüllkurve liegen, was bedeutet, dass die Anwendung des TSRCM gute Ergebnisse für die Modellierung von ganzen Stampflehmbauteilen liefern würde.

Die Versagenszustände beider Modelle wurden ebenso analysiert. Abbildung 7 zeigt die prinzipiellen Spannungen, die eine erzwungene Vertikale Verformung von 1,0 mm erzeugt. Der Kollaps beider Modelle zeigt sich zunächst in der Mitte konzentriert, auf Grund der Entwicklung von Zugbelastungen, und an den Auflagern aufgrund von Druckkonzentration. Dies entspricht dem Verlauf der Rissentwicklung, die bei den Versuchen beobachtet wurde. Beim Makromodell wurde der Kollaps ebenso an den vier Kanten des Modells beobachtet, was darauf zurückschließen lässt, dass diese Regionen des Modells anfälliger für das Auftreten von Ablösungsversagen sind. Das Mikromodell bestätigt diesen Versagenszustand, wobei es möglich ist, das auch Versagen in den Schnittstellenelementen von zwei der Kanten beobachtet werden kann, wie es auch beid en experimentellen Versuchen zu sehen war. Grundsätzlich sind beide Modelle zur Ermittlung potenzieller Ablösungs-Versagenszonen anwendbar. Das Makromodell erlaubt jedoch keine Kontrolle dieses Versagenszustandes, noch erlaubt es die Unterscheidung vom Versagen des Stampflehmmaterials.

Für die Simulation der Wände unter zyklischer Belastung wurden die Materialeigenschaften experimentell ermittelt und durch einem Kalibrierungsprozess den Stampflehmlagen angepasst. Da keine Charakterisierung der Eigenschaften der Schnittstellen erfolgte, wurden nominelle Werte für die Reibung und Spannung in den Schnittflächen genutzt. Die elastischen Eigenschaften der Schnittflächen, genauer deren elastische Steifigkeit in Spannung und Scherkraft, wurden durch Kalibrierung und Abgleich des numerischen mit dem experimentellen Ergebnissen

Fig. 8 Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Hysteresekurven

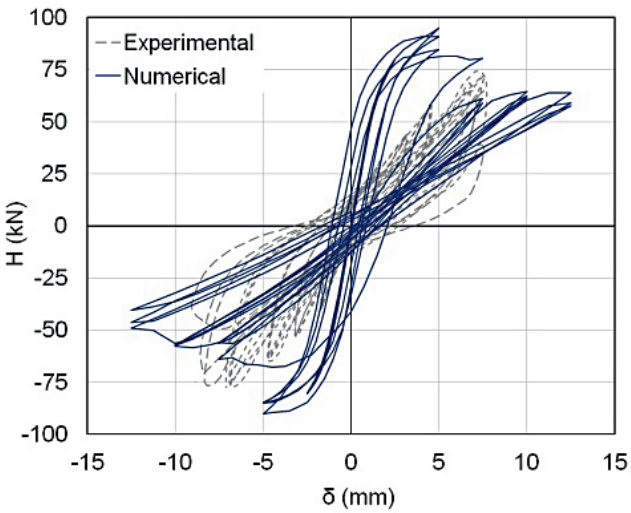


Fig. 9 Entwicklung von Rissbildern, mit Rissverläufen, unter flächig eingebrachten zyklischen Belastungen bei unterschiedlichen Verformungen: (a) 5.0 mm; (b) 7.5 mm; (c) 10.0 mm; (d) 12.5 mm.

ermittelt. Idealerweise sollten die Schnittstellen steif sein, bis sich die Lagen ablösen bzw. abgleiten, öffnen. Aus diesem Grund wurde eine hohe Steifigkeit der Schnittstelle angenommen. Auf Grund von Ausführungsmängeln beim Verdichtungsprozess, mangelhaftem Kontakt zwischen den Lagen und die Störung der Schnittstellen in der erfolgten Konfiguration führte diese Annahme jedoch zu einer Überbewertung der gesamten Wandsteifigkeit. Daher musste die normale Steifigkeit der Schnittstellen reduziert werden, um eine Wandsteifigkeit zu erreichen, die den experimentellen Werten entsprach. Dann wurde die Schersteifigkeit aus der normalen Steifigkeit nach Gleichung (2) ermittelt. Alle Materialeigenschaften die in der Analyse verwendet wurden zeigt Tabelle 2. tiffness according to the equation (2). All the material properties used in the analysis are listed in Table 2.

Die Ergebnisse der numerischen Analyse zeigt Abbildung 8. Die gestrichelten Kurvenverläufe beziehen sich auf die experimentellen Versuche, die durchgehenden Kurven beziehen sich auf die numerische Simulation.

Die Spitzenscherkraft wurde mit guter Genauigkeit vorhergesagt, obwohl die Gesamtsteifigkeit der Wand bei den Eingangszyklen überbewertet wurde. Die Übereinstimmung von experimentellen und numerischen Kurvenverläufen ist in den späteren Zyklen besser als in den früheren Zyklen.

Die Rissbildung am Ende der vier Belastungssequenzen zeigt Abbildung 9a–d im Hinblick auf den Rissverlauf, wobei die Orientierung der Risse und die Sichtbarmachung der relativen Rissbreite gezeigt wird. Der Versagenszustand wurde dominiert durch ein deutliches diagonbales Reißen, in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Versagensfällen der Lagen. Einige Schädigungen in den Schnittstellen wurden bereits in einem frühen Stadium der Analyse festgestellt.

Das Mikromodell erlaubte eine Simulation des Versagens durch Ablösen zwischen den Lagen des Stampflehms, vergleichbar zu denen, die sich in den experimentellen Versuchen zeigten. Dieses Ergebnis erwies sich Hauptvorteil der Anwendung des Mikromodellansatzes. Dieses Modell erwies sich als ausreichend robust und genau um das zyklische Verhalten der getesteten Stampflehmwände zu simulieren. Der Ansatz benötigt allerdings eine Definition der adäquaten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen. Dieser Mikromodellansatz ist zu rechtfertigen, bei zusätzlichem Berechnungsaufwand mittels Computer, wenn die Kollapsmechanismen die zu Schnittstellenversagen zwischen den Stampflehmlagen führen, zu erwarten sind. Im Vergleich zur Simulation von Stampflehm unter stationärer Belastung, zeigt die Schnittstellensteifigkeit, wie sie hier gezeigt wird, deutliche Unterschiede. Die benötigten Werte zur elastischen Steifigkeit der Schnittstellen waren niedriger als jene der Schnittstellen für Scherverhalten unter stationären diagonalen Druck.

Zusammenfassung

Das nichtlineare Verhalten des Stampflehms wurde modelliert unter Beachtung sowohl des Makro- als auch des Mikromodellansatzes. Das TSRCM wurde genutzt, um das Verhalten des Stampflehms zu simulieren, während ein Mohr-Coulomb Versagens Kriterium genutzt wurde, um die Schnittstellen zwischen den Lagen zu modellieren. Die experimentellen Er-

gebnisse wurden bei der Kalibrierung genutzt. Das Druckverhalten des Stampflehms wurde unter Verwendung einer multilinearen Beziehung, die durch die DIANA software [1] bereitgestellt wurde, simuliert. Diese Beziehung wurde unter Berücksichtigung der Durchschnitts Zugspannungskurve der Druckversuche erstellt. Außerdem erscheint das wichtige nichtlineare Verhalten des Stampflehms nicht übertragbar dem Druckverhalten bei der Beziehung die traditionell für Betonmodellierung verwendet wird. Bezüglich der Simulation der diagonalen Druckversuche zeigten die kalibrierten Makro- und Mikromodelle eine gute Vergleichbarkeit mit den experimentellen Hüllkurven der Zug-Scherspannungsdiagramme und den experimentellen Versagensbildern. Das Mikromodell erlaubt die Erfassung der Ablösung zwischen den Schnittstellen der Stampflehmlagen, vergleichbar zu den Ergebnissen der experimentellen Versuche. Dies stellt sich als Hauptvorteil des Mikomodellansatzes dar, wobei der Makromodellansatz eine gleichbedeutende numerische Simulation des Scherverhaltens liefert. Der Mikomodellansatz, der zur Modellierung des nichtlinearen Verhaltens des Stampflehms unter nzyklischer Belastung verwendet wurde, zeigt, dass das kalibrierte numerische Modell in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Hysteresekurven und deren Schadensbild liegt. Es ist wichtig herauszustellen, dass die Ergebnisse der zyklischen Scherdruckbelastungen stark von den beachtlichen Maß der zusätzlich eingebrachten vertikalen Druckbelastung abhängt.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass der hier präsentierte Makromodellansatz ausreichend genau zur Simulation des globalen Scherverhaltens der untersuchten Stampflehmscheiben ist. Dieser Ansatz erfordert die Definition der adäquaten Zugbelastungsbeziehungen. Die Verwendung des Mikromodelansatzes, welcher einen zusätzlichen computerunterstützten Aufwand benötigt, ist gerechtfertigt, wenn spezielle Kollapsmechanismen ein Versagen innerhalb der Schnittstellen zwischen den Stampflehmlagen erwarten lassen. Es ist wichtig, die Unterschiede der Werte der Schnittstellensteifigkeit zwischen den stationären und den zyklischen Analysen herauszustellen. Dieser Unterschied kann mit mangelhaftem Verbund in den Fugen bei horizontaler Belastung gesehen werden.

Danksagung

Diese Forschung wurde durch die Europäische Kommission im Rahmen des Projektes NIKER zur Bewahrung immobilen Kulturerbes und dessen Schutz gegen Erdbebenrisiken gefördert (contract No. 244123) und durch *FEDER Fonds* durch die *Competitivity Factors Operational Programme – COMPETE*, von den nationalen Fonds *FCT – Foundation for Science and Technology* innerhalb der Projekte POCI-01-0145-FEDER-007633 und PTDC/ECM-EST/2777/2014. Die Autoren möchten Ihren großen Dank an Herrn André Gardei, Dr Stanislav Hračov, Dr Stanislav Pospíšil und Herrn Shota Urushadze für deren wichtige Unterstützung der Versuchsabläufe ausdrücken.

Referenzen

[1] TNO. Displacement method analyser (DIANA) user's manual. Release 9.4, Netherlands, 2009.

[2] Miccoli L, Müller U, Fontana P. Mechanical behavior of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. Constr Build Mater 2014;61:327–39.

[3] ASTM E 519-10 (2010) Standard test method for diagonal tension (Shear) in masonry assemblages. American society for testing and materials, West Conshohocken, PA.

[4] Miccoli L, Drougkas A., Müller U, In-plane behaviour of rammed earth under cyclic loading: experimental testing and finite element modelling, Eng Struct 2016; 125, 144-152.

[5] RILEM TC 76. Tests for masonry materials and structures – LUMC3 – Cyclic shear test for masonry panels designed to resist seismic forces; 1991

[6] Miccoli L, Oliveira DV, Silva RA, Müller U, Schueremans L. Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. Mater Struct 2015;48:3443–56.