

# Rütteltischversuche an einem Gebäude mit Mauerwerks- und Stahlbetonwänden

K. Beyer, M. Tondelli, S. Petry

## Zusammenfassung

S 2

Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes unter Federführung der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) wurde ein vierstöckiges Gebäude mit Mauerwerks- und Stahlbetonwänden auf dem Rütteltisch des TREES-Labors am EUCENTRE in Pavia (Italien) getestet. Der Test wurde im Maßstab 1:2 durchgeführt und ist Teil einer größeren Forschungsinitiative an der EPFL zu gemischten Stahlbeton-Mauerwerks-Tragsystemen. Das Hauptaugenmerk während des Rütteltischversuches lag darin, einen besseren Einblick in das dynamische, nicht-lineare Verhalten solcher gemischten Strukturen zu erhalten sowie Daten für die Validierung numerischer Modelle zu gewinnen. Dieser Beitrag stellt den Versuchskörper, die Instrumentierung und die Bodenbewegung, mit welcher der Rütteltisch angeregt wurde, dar und diskutiert erste Ergebnisse des Versuchs.

## 1 Einleitung

Mit der Einführung der Normengeneration 2005 wurden die Bemessungsspektren für Erdbeben in der Schweiz erhöht und in der Folge können die meisten unbewehrten Mauerwerksgebäude nicht mehr für Erdbeben nachgewiesen werden. Aus diesem Grund werden in neuen Bauvorhaben heute typischerweise einige Mauerwerkswände durch Stahlbetonwände ersetzt und bestehende Mauerwerksgebäude

durch neu eingezogene Stahlbetonwände verstärkt. Das Tragsystem der resultierenden Struktur besteht daher aus Mauerwerkswänden und einigen Stahlbetonwänden, die durch Stahlbetondecken und Mauerwerksriegel gekoppelt sind (**Bild 1**). Spezifische Bemessungsregeln für solche gemischten Strukturen fehlen [1,2]. In der Schweiz werden für die Erdbebenbemessung solcher Gebäude häufig nur die Stahlbetonwände berücksichtigt und die Stockwerksschieflung auf 0.5% begrenzt, um Einstürze der Mauerwerkswände zu vermeiden. Da Steifigkeit und Widerstand von Mauerwerkswänden aber ähnliche Größenordnungen wie diejenigen von Stahlbetonwänden erreichen, wird das wirkliche Verhalten des Gebäudes während eines Erdbebens von beiden Wandtypen sowie ihrer Interaktion bestimmt. Numerische Untersuchungen an gemischten Stahlbeton-Mauerwerksgebäuden haben gezeigt, dass die Ergebnisse solcher Berechnungen, z. B. die Schubkraftverteilung zwischen den verschiedenen Wänden, sehr empfindlich hinsichtlich der Modellannahmen sind [3]. Experimentelle Ergebnisse, die zur Validierung herangezogen werden können, fehlten bisher. Darüber hinaus könnte das Verhalten senkrecht zur Ebene der Mauerwerkswände ein weiterer Schwachpunkt dieser Art von Gebäude sein. Neuere Studien zu diesem Thema zeigen jedoch, dass die Randbedingungen der Mauerwerkswände für Belastungen senkrecht zur Ebene bis jetzt noch nicht richtig erfasst werden aber gleichzeitig einen großen Einfluss auf deren Verhalten haben [4]. Ziel eines Forschungsprojektes an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ist das Verhalten von gemischten Stahlbeton-Mauerwerksgebäuden zu untersuchen und notwendige Grundlagen für die kraft- und verformungsbasierte Bemessung solcher Gebäude zu entwickeln. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde im Dezember 2012 ein Rütteltischversuch an einem vierstöckigen Gebäude im TREES-Labor am EUCENTRE in Pavia (Italien) im Maßstab 1:2 durchgeführt. Dieser Artikel beschreibt diesen Test sowie die dafür durchgeführten vorbereitenden quasi-statischen Versuche an der EPFL. Für weitergehende Informationen zum Test wird der Leser auf [5] verwiesen.

Prof. Dr. Katrin Beyer  
M.Sc. Marco Tondelli  
Dipl.-Ing. Sarah Petry

Earthquake Engineering and  
Structural Dynamics Laboratory (EESD)  
École Polytechnique Fédérale  
de Lausanne (EPFL)  
CH-1015 Lausanne



Bild 1. Mehrstöckige Wohnhäuser in der Schweiz mit Stahlbeton- und Mauerwerkswänden (Fotos: T. Wenk)

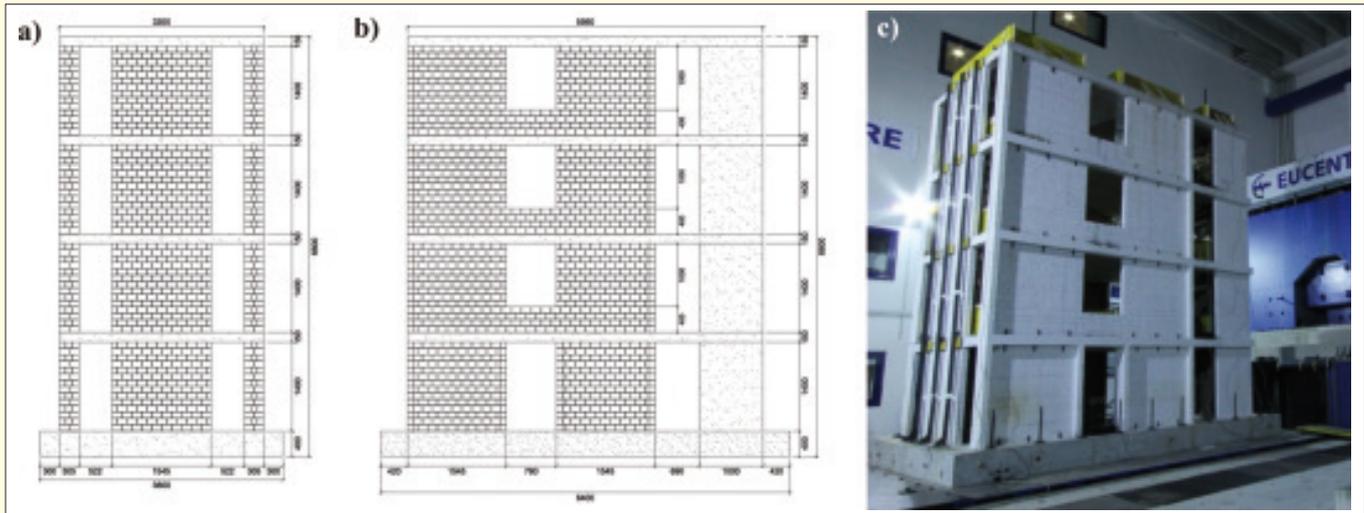


Bild 2. Quer- und Längsansicht des Versuchskörpers (a, b). Foto des Versuchskörpers nachdem er auf dem Rütteltisch montiert und die zusätzlichen Massen installiert waren (c).

## 2 Versuchskörper für den Rütteltischversuch

Der Rütteltisch des TREES-Labors kann Beschleunigungen in einer horizontalen Richtung aufbringen und zeichnet sich insbesondere durch seine große Kraftkapazität aus. Das vierstöckige Gebäude konnte daher im Maßstab 1:2 getestet werden. Parallel zur Richtung der Anregung bestand das Tragsystem des Gebäudes auf jeder Seite aus zwei Mauerwerkswänden und einer Stahlbetondecke (Bild 2b). An den kurzen Stirnseiten befand sich auf jeder Seite lediglich eine Mauerwerkswand, welche senkrecht zu ihrer Ebene belastet wurden (Bild 2a). Um die Skalierungseffekte auszugleichen, wurden zusätzliche Massen auf den Decken installiert und die Belastungsgeschichte zeitlich skaliert. Das Gesamtgewicht des Modellgebäudes betrug somit 85 t und die Spannungen und Dehnungen im 1:2 Modell waren identisch zu denen, die in einem 1:1 Prototypengebäude zu erwarten wären.

Um das Verhalten einer gemischten Struktur richtig abzubilden, ist es wichtig, dass bei der Skalierung die Eigenschaften der verschiedenen Materialien nicht verzerrt werden. Während Versuche an Stahlbetonwänden im Maßstab 1:2 gezeigt haben, dass das Verhalten des Prototyps gut abgebildet werden kann, wenn die Durchmesser der Bewehrungsstäbe sowie des Größtkorns entsprechend reduziert werden, fehlten solche Erfahrungen bei der Skalierung von Mauerwerk. Um si-

cherzustellen, dass das Mauerwerk im Maßstab 1:2 ähnliche Eigenschaften wie das Mauerwerk im Vollmaßstab hat, wurden Materialversuche sowie quasi-statisch zyklische Versuche an Mauerwerkswänden in beiden Maßstäben durchgeführt. Diese Versuche sind im nächsten Abschnitt zusammengefasst.

## 3 Vorbereitende Versuche an der EPFL

Für die Mauerwerkswände des Versuchskörpers wurden speziell hergestellte Backsteine im Maßstab 1:2 verwendet. Um diese zu entwickeln, wurden zahlreiche Serien von Materialtests an verschiedenen Steinen durchgeführt. Bild 3 zeigt den schlussendlich gewählten Modell-Backstein und den zugehörigen Prototyp. Für den Rütteltischversuch war es vor allem wichtig, dass das Verhalten von Mauerwerkswänden unter zyklischer horizontaler Belastung im Modellmaßstab gut abgebildet wird. Aus diesem Grund wurden neben zahlreichen Standard-Materialversuchen an Mauerwerkskörpern, quasi-statisch zyklische Versuche an Mauerwerkswänden im Maßstab 1:1 und im Maßstab 1:2 durchgeführt [6,7]. Bild 4 zeigt die zugehörigen Versuchsaufbauten, in denen zwei vertikale Hydraulikzylinder die Normalkraft und das Kopfmoment und ein dritter Zylinder die horizontale Verschiebung aufbrachten. Die Steuerung der drei Zylinder war vollständig miteinander gekoppelt, so dass die Nor-

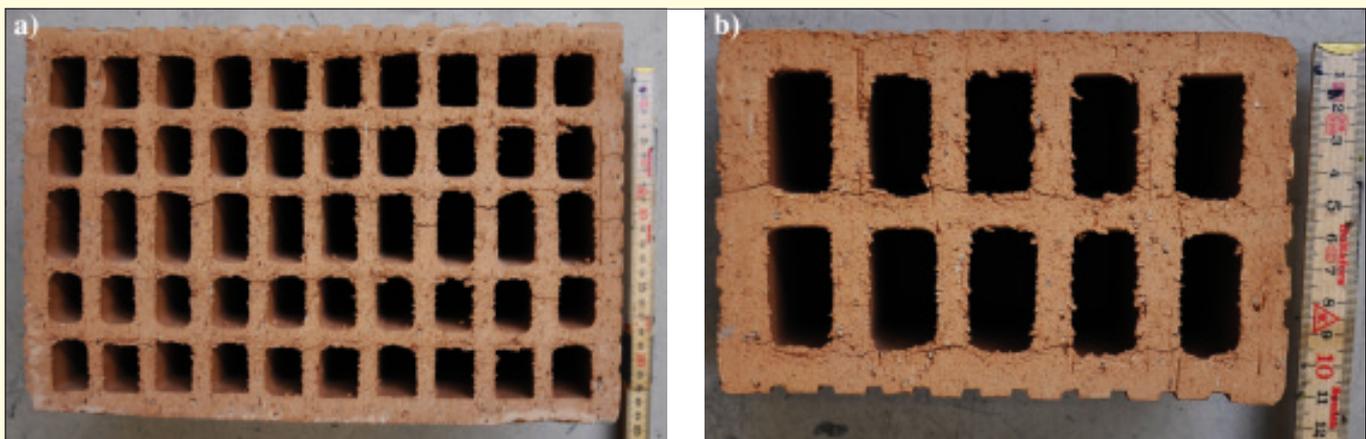


Bild 3. (a) Prototyp des Backsteins und (b) Modell-Backstein für Mauerwerk im Maßstab 1:2 [7]

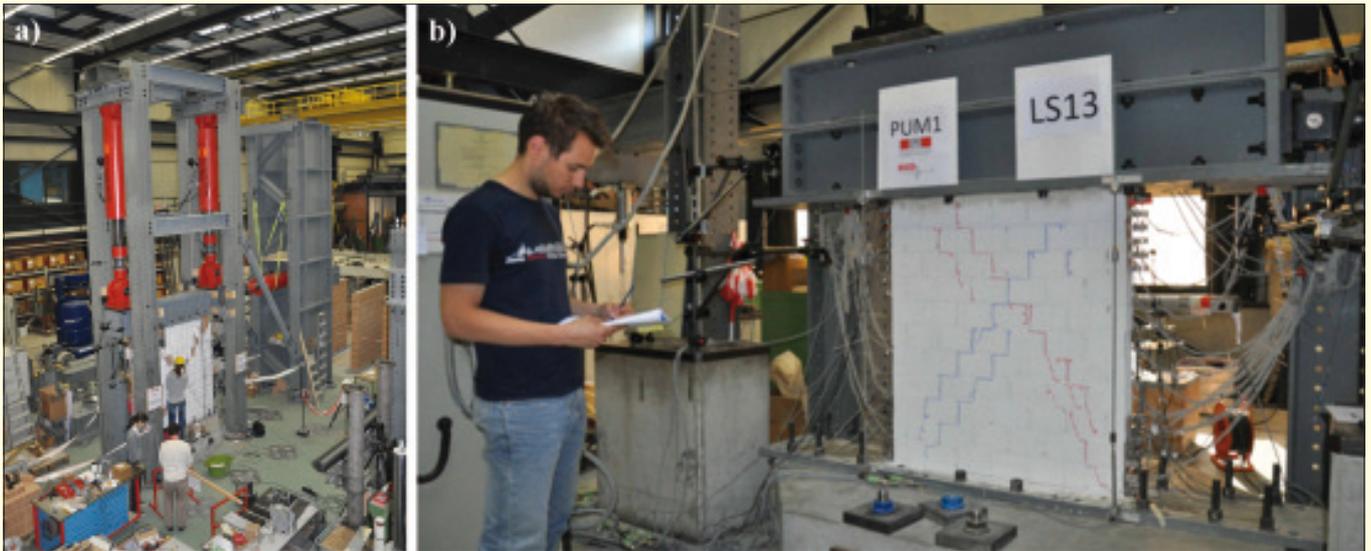


Bild 4. Versuchsaufbauten für quasi-statisch zyklische Versuche an Mauerwerkswänden im Maßstab 1:1 (a) und im Maßstab 1:2 (b) [6].

malkraft und die Höhe des Momentennullpunktes in der Wand während des gesamten Tests konstant blieben. In beiden Maßstäben wurden fünf Konfigurationen getestet, die sich hinsichtlich der aufgetragenen Normalkraft und der Höhe des Momentennullpunktes unterschieden. Die Ergebnis-

se zeigten, dass das Modell-Mauerwerk das Prototyp-Mauerwerk hinsichtlich horizontaler Steifigkeit, Widerstand und Versagensmechanismus sehr gut abbildete; die Verformungskapazität des Modell-Mauerwerks war im Durchschnitt etwas größer als die des Prototyp-Mauerwerks. Als

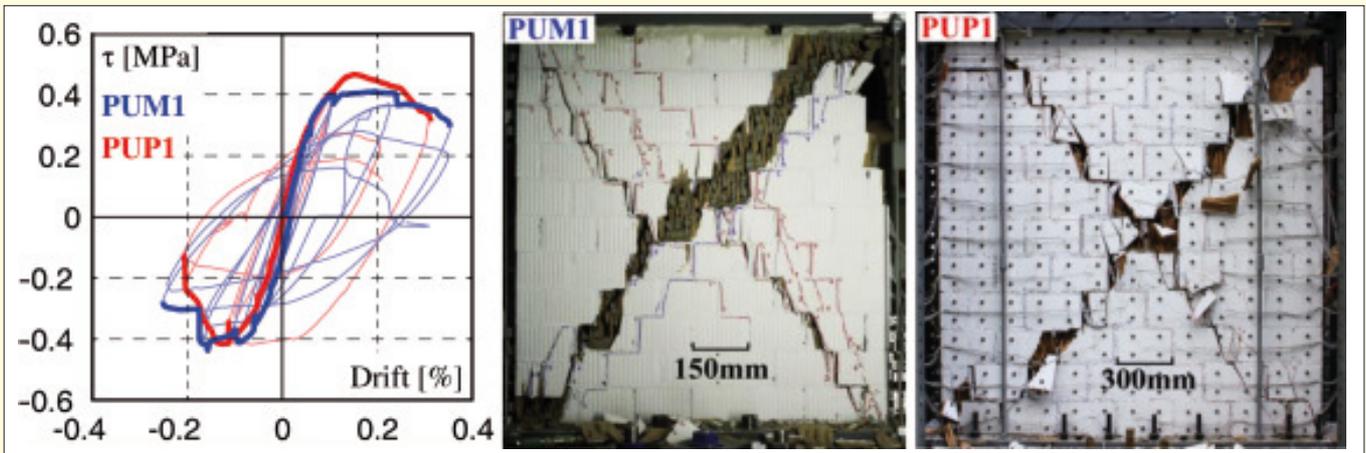


Bild 5. Quasi-statisch zyklische Versuche: Kurven Schubspannung vs. Schiefstellung für die Wand im Maßstab 1:2 (PUM1) und die Wand im Maßstab 1:1 (PUP1) sowie die zugehörigen Bruchbilder nach Axialkraftversagen [6].

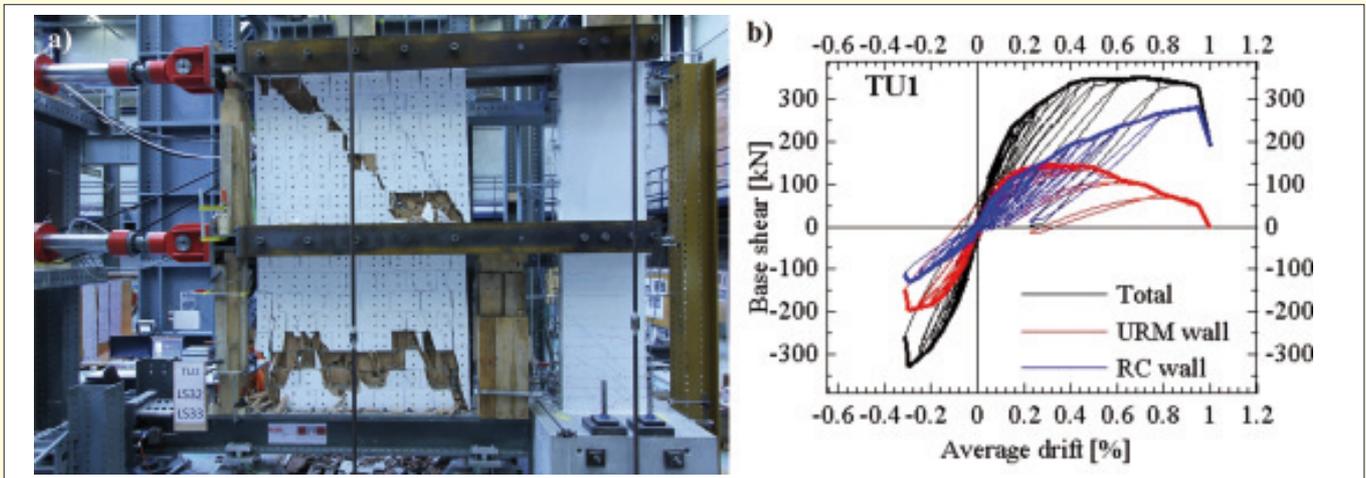


Bild 6. Quasi-statisch zyklische Versuche an einem gemischten Tragsystem: Bruchbild nach Axialkraftversagen (a) und horizontale Kraft-Verformungs-Hysteresen (b) [8].

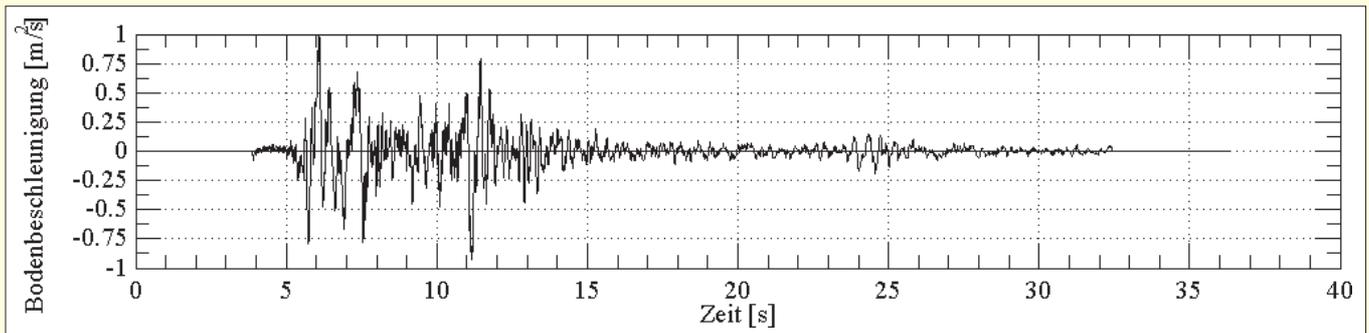


Bild 7. Beschleunigungszeitverlauf für die horizontale Anregung des Rütteltisches für eine maximale Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$ .

Beispiel zeigt **Bild 5** die Kurven der Schubspannung in Funktion der Schiefstellung der ersten Versuchskörper der Prototyp- und Modell-Serie sowie die zugehörigen Bruchbilder nach Axialkraftversagen der Versuchskörper.

Um das Zusammenwirken von Mauerwerks- und Stahlbetonwänden besser zu verstehen, wurden zudem an der EPFL quasi-statische Versuche an einem zweistöckigen gemischten Tragsystem mit je einer der beiden Wandtypen durchgeführt (**Bild 6a**, [8]). Ein speziell entwickelter Versuchsaufbau erlaubte die Auflagerreaktionen am Fuß der Mauerwerkswand zu messen. Aus diesen und den aufgebrachtten Kräften konnten die Kräfte und Momente am Fuß der Stahlbetonwand zurück gerechnet werden. Die Schubkraft-Verformungs-Hysteresen in **Bild 6b** zeigen, dass die Stahlbetonwand einen frühen Steifigkeitsverlust des Gesamtsystems verhindern kann. Des weiteren zeigt das Bruchbild, dass in einem gemischten System – anders als in einem Gebäude, das nur mittels Mauerwerkswänden ausgesteift ist – die horizontalen Verformungen sich nicht im Erdgeschoss konzentrieren sondern über eine größere Höhe verteilt sind.

#### 4 Anregung des Rütteltisches und Instrumentierung des Versuchskörpers

Der Beschleunigungszeitverlauf, der für die Anregung des Rütteltisches ausgewählt wurde, entspricht der Aufzeichnung des Erdbebens in Montenegro in 1979 an der Hercegovni-Meßstation. Um der Skalierung des Versuchskörpers Rechnung zu tragen, wurde die Zeit durch den Faktor 2 di-

vidiert. Insgesamt unterlief der Versuchskörper neun Testdurchläufe, wobei die Maximalbeschleunigung sukzessiv von  $0.05 \text{ g}$  bis  $0.9 \text{ g}$  erhöht wurde. **Bild 7** zeigt den skalierten Beschleunigungsverlauf für eine Maximalbeschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$ .

Die Bewegung des Rütteltisches und das Verhalten des Versuchskörpers während der Versuche wurde von zahlreichen Messinstrumenten aufgezeichnet, darunter 20 Beschleunigungsaufnehmer und 73 Verschiebungsaufnehmer sowie mit einem optischen Messsystem. Mit dem optischen Messsystem wurden die Verformungen in den Mauerwerkswänden, welche parallel zu ihrer Ebene beansprucht wurden, über die gesamte Gebäudehöhe detailliert gemessen. Dazu wurden ca. 600 Reflektoren unter Infrarot-Licht von zehn Videokameras aufgenommen. Mit den festverdrahteten Verschiebungsaufnehmern wurden unter anderem Verformungen am Wandfuß der Stahlbetonwände, Verformungen in den Mauerwerkswänden, die senkrecht zu ihrer Ebene beansprucht wurden, sowie die Verformungen der Stahlbetondecken gemessen.

#### 5 Erste Ergebnisse des Rütteltischversuchs

Die Versuche an dem vierstöckigen Gebäude wurden in einem Zeitraum von vier Tagen durchgeführt. Nach jedem Versuch wurden die Eigenfrequenzen der Struktur neu bestimmt, um den Einfluss der Schäden auf die dynamischen Eigenschaften des Gebäudes zu bestimmen. Die ersten drei Versuche mit maximalen Rütteltisch-Beschleunigungen

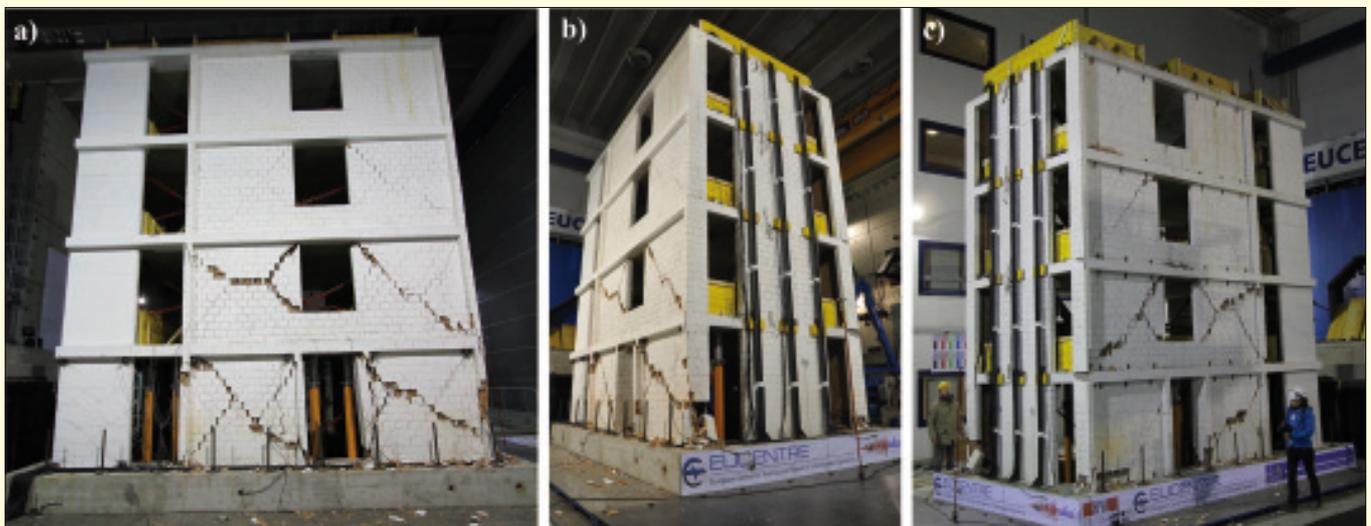


Bild 8. Zustand des Gebäudes nach dem letzten Versuchsdurchlauf.



Bild 9. Die unteren beiden Etagen der Mauerwerkswände, welche parallel zu ihrer Ebene beansprucht wurden, nach dem letzten Versuchsdurchlauf.

zwischen 0.05 und 0.2 g erzeugten nur geringe Schäden in Form von Haarrissen in den Mauerwerkswänden des Erdgeschosses. Bei den Versuchen mit maximalen Rütteltisch-Beschleunigungen von bis zu 0.4 g wurden die Risse in den Mauerwerkswänden der ersten Etage deutlicher und erste Risse wurden in den Stahlbetonwänden an deren Wandfuß bemerkt. Beim Durchlauf mit einer maximalen Rütteltisch-Beschleunigung von 0.6 g wurde die Struktur zum ersten mal stärker beschädigt. Die diagonalen Risse in den Mauerwerkswänden hatten bleibende Rissbreiten von bis zu 0.8 mm; in der Mehrzahl der Fälle war die Rissbreite jedoch noch geringer als 0.2 mm.

Beim letzten Durchlauf mit einer maximalen Rütteltisch-Beschleunigung von 0.9 g wäre das Gebäude beinahe infolge der Wirkung der Schwerelasten eingestürzt. Es blieb unter anderem auch deshalb stehen, weil es lediglich einer unidirektionalen Anregung unterworfen war. Ein Video dieses Versuchs steht unter <http://eesd.epfl.ch/> zur Verfügung. Bei diesem Versuch verloren alle Mauerwerkswände, die parallel zu ihrer Ebene beansprucht wurden und sich in den beiden unteren Etagen befanden, ihre Horizontalkraft- und Axi-

alkraft-Tragfähigkeit und zeigten die für Schubversagen typischen diagonalen Risse mit lokalem Druckversagen am Wandfuß (Bild 8). Die großen bleibenden Verformungen der Mauerwerkswände und das Normalkraftversagen wurden durch das Abrutschen des oberen Teils der Mauerwerkswand einer Etage entlang dem Diagonalriss verursacht (Bild 9). Die Schwerelasten wurden in der Folge lediglich von den Stahlbetonwänden und den Mauerwerkswänden, die senkrecht zu ihrer Ebene beansprucht waren, abgetragen. Nach dem Versuch wurden sofort Abstützungen im Erdgeschoss installiert, um den Einsturz des Gebäudes zu verhindern (Bild 9). Im Gegensatz zu Gebäuden, welche ausschließlich aus Mauerwerkswänden bestehen, verteilten sich die großen horizontalen Verformungen recht gleichmäßig über die unteren beiden Stockwerke und konzentrierten sich nicht ausschließlich auf das Erdgeschoss. Diese Beobachtung steht im Einklang mit den Ergebnissen des quasi-statischen Versuchs in Bild 6. Wie erwartet, war diejenige Belastungsrichtung besonders kritisch, in welcher die Mauerwerkswände, infolge der durch die Decken und Mauerwerksriegel übertragenen Kräfte, einer erhöhten vertikalen Druckkraft ausgesetzt waren.

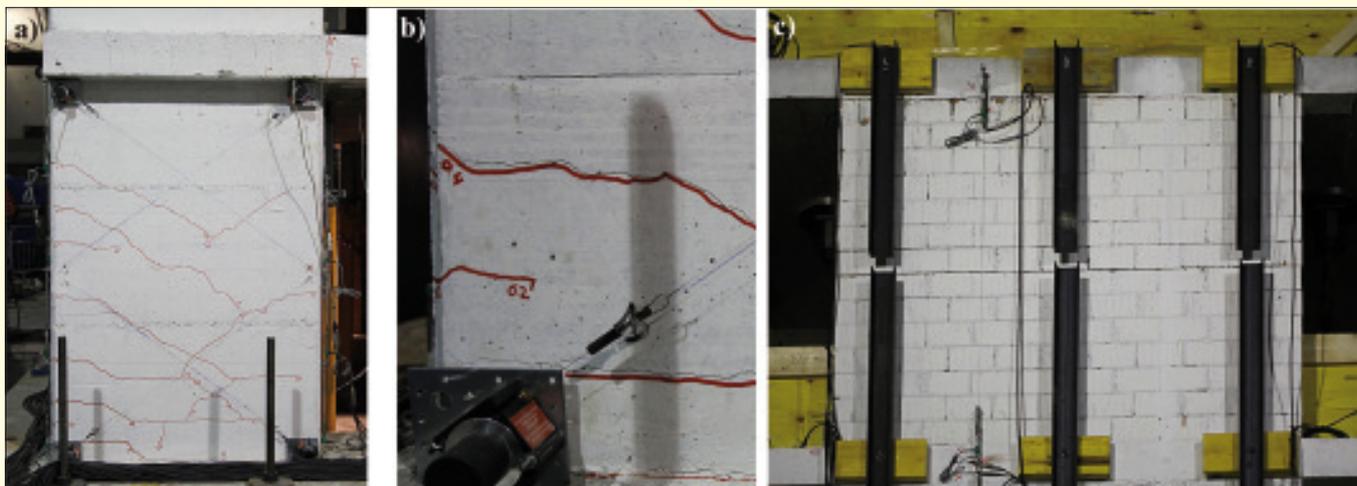


Bild 10. Fuß der Stahlbetonwand (a, b) und Mauerwerkswand des obersten Geschosses (c), die senkrecht zu ihrer Ebene beansprucht war, nach dem letzten Versuchsdurchlauf.

Wie die Mauerwerkswände verhielten sich die Stahlbetonwände unterschiedlich für die zwei Anregungsrichtungen. Für die Anregungsrichtung, in der sich die Normalkraft in den Stahlbetonwänden infolge der Kopplungswirkung von Decken und Riegeln verkleinerte, entwickelten die Stahlbetonwände im Erdgeschoss ein typisches Biege-Schubrissbild mit maximalen bleibenden Rissweiten von 1 mm (**Bild 10a,b**). In der anderen Anregungsrichtung vergrößerte sich die Normalkraft in den Stahlbetonwänden und weniger und kleinere Risse traten auf. In den oberen Stockwerken blieben die Stahlbetonwände ungerissen.

Beim letzten Versuchsdurchlauf wurde zum ersten Mal ein Versagen einer Mauerwerkswand senkrecht zu ihrer Ebene beobachtet. Eine Wand der Stirnseite der obersten Etage war großen horizontalen Verformungen unterworfen und berührte die außenliegenden vertikalen Stahlträger, die installiert worden waren, um ein mögliches Versagen aus der Ebene zu verhindern. Nach dem Versuch waren Horizontalrisse auf halber Wandhöhe und am Wandfuß und -kopf klar zu erkennen (Bild 10c). Die Wand, die versagte, war diejenige die links und rechts von Mauerwerkswänden statt Stahlbetonwänden flankiert war. Dies zeigt, dass die flankierenden Wände neben der eigentlichen Deckensteifigkeit ebenfalls einen Einfluss auf die Randbedingungen bezüglich Versagen senkrecht zur Wandebene haben.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Rütteltischversuche an einer gemischten Tragstruktur mit Stahlbeton- und Mauerwerkswänden erlaubten es, detaillierte Daten und Beobachtungen zum Erdbebenverhalten solcher Strukturen unter einer grossen Bandbreite von Anregungen von ganz kleinen Bewegungen bis hin zum nahezu Einsturz zu gewinnen. Zur Zeit werden die Versuchsdaten aufbereitet und dokumentiert. Anschließend sollen auf diesen aufbauend insbesondere Bemessungsfragen solcher Gebäude beantwortet sowie die Ergebnisse der quasi-statischen Versuche mit den dynamischen Versuchen verglichen werden. Das Erdbebenverhalten eines solchen Gebäudes hängt sehr stark von der jeweiligen Konfiguration der Mauerwerks- und Stahlbetonwände ab, d.h. von der Anzahl, Länge und Anordnung der jeweiligen Wände im Grundriss. Um weiter reichende Rückschlüsse für die Bemessung solcher Gebäude zu gewinnen, werden numerische Modelle mittels der gewonnenen Daten validiert und dann eine größere Reihe von Gebäudekonfigurationen analysiert. Hinsichtlich der Bemessung sollen insbesondere Fragen zur Interaktion von Mauerwerks- und Stahlbetonwänden und der verschiedenen Verhaltenszustände unter dem Aspekt des „Performance-based seismic design“ beantwortet werden. Außerdem ist der Einfluss der Randbedingungen auf das Verhalten von Mauerwerkswänden unter Beanspruchung senkrecht zur Wandebene ein weiterer Schwerpunkt der nachfolgenden Untersuchungen.

## Danksagung

Der Rütteltischversuch im TREES-Labor des EUCENTRE wurde durch das Europäische Forschungsprogramm "SERIES" im Rahmen des Seventh Framework Programme [FP7/2007–2013] unter dem Abkommen Nummer 227887 finanziert. Ausserdem unterstützt das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) das Vorhaben. Die Mauerwerkssteine für alle Versuche wurden von Morandi Frères SA gespendet. Alle Beiträge werden herzlichst verdankt. Die Autoren danken ebenfalls den Mitarbeitern des TREES-Labors, insbesondere Prof. Alberto Pavese und Dr. Simone Peloso, für ihre wertvolle Unterstützung während der gesamten Projektdauer. Das europäische Forschungsprojekt wurde durch die folgenden weiteren Partner begleitet: Prof. Baris Binici, Dr. Christoph Butenweg, Prof. Murat Altug Erberik, Dr. Pierino Lestuzzi, Dr. Jenő Varga, Dr. Thomas Wenk. Die Autoren bedanken sich herzlich für das Interesse und die Rückmeldungen zu Versuchsplanung und -durchführung.

## Literatur

- [1] Cattari, S.; Lagomarsino, S.: Non-linear analysis of mixed masonry and reinforced concrete buildings. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology; Geneva (Switzerland), 2006.
- [2] Casoli, D.: Assessment of existing mixed RC-Masonry structures and strengthening by RC shear walls. A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the Master Degree in Earthquake Engineering; Pavia (Italy), IUSS Press, 2007.
- [3] Paparo, A., Beyer, K.: Seismic behaviour of mixed RC-URM wall structures: comparison between numerical results and experimental evidence. Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013); Vienna, Austria, 2013.
- [4] Dazio, A.: The effect of the boundary conditions on the out-of-plane behaviour of unreinforced masonry walls. 14th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2008); October 12–17, 2008, Beijing, China.
- [5] Tondelli, M.; Petry, S.; Beyer, K.: CoMa WallS: Seismic Behaviour of Mixed Reinforced Concrete – Unreinforced Masonry Wall Structures. Technical report; EPFL, 2013.
- [6] Petry, S.; Beyer, K.: Comparison of seismic tests on URM piers at half and full scale. 12<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium; Vancouver, Canada, 2013.
- [7] Petry, S.; Beyer, K.: Scaling unreinforced masonry structures with hollow-core clay bricks for laboratory testing. Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013); Vienna, Austria, 2013.
- [8] Paparo, A., Beyer, K.: Quasi-static cyclic tests of mixed RC-URM wall structure. 12<sup>th</sup> Canadian Masonry Symposium; Vancouver, Canada, 2013.