

Konrad Zilch, Stefanie Grabowski, Wolfgang Scheufler

Experimentelle Untersuchung des nichtlinearen Tragverhaltens zusammengesetzter Schubwandquerschnitte aus unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbelastung

Kurztitel:

Erdbebentragverhalten zusammengesetzter Schubwandquerschnitte aus unbewehrtem Mauerwerk

Kurzbericht zum Forschungsvorhaben Z 6 - 10.07.03-04.10
gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

01. September 2008

Technische Universität München

Institut für Baustoffe und Konstruktion

Lehrstuhl für Massivbau

1 Problemstellung

Mauerwerk wird in Deutschland im üblichen Hochbau traditionell als tragendes Element eingesetzt. Durch die Anpassung der nationalen Einwirkungsnormen auf die aktuellen europäischen Vorschriften ergeben sich für die Nachweise im Lastfall Erdbeben (DIN 4149 (2005)) und teilweise auch im Lastfall Wind deutlich höhere horizontale Lasten. Mit den bekannten Bemessungsansätzen für unbewehrtes Mauerwerk kann der Nachweis der Aufnahme dieser horizontalen Lasten (Schubbeanspruchung von Aussteifungswänden) in vielen Fällen nicht mehr erbracht werden. Im Widerspruch dazu stehen jedoch die jahrelangen guten Erfahrungen mit Mauerwerksgebäuden in deutschen Erdbebengebieten. Die Gründe für diese Divergenz liegen zum Teil in den konservativen Ansätzen für die rechnerischen Nachweise der Konstruktionen. So ist insbesondere der Effekt von zusammengesetzten Schubwandquerschnitten in der aktuell gültigen Bemessungsnorm nicht in vollem Maße berücksichtigt.

Bei der Bemessung von Mauerwerk gegen seismische Einwirkungen wird in der Regel der Schubnachweis im untersten Geschoss maßgebend. Für diesen Nachweis des Schubwiderstandes dürfen nach DIN 1053-1 (1996) bzw. DIN 1053-100 (2007) mit DIN 1053-100 A1 (2007) lediglich bei im Verband hergestellten zusammengesetzten Tragwänden, bei denen ein Abreißen der Schubwand von der aussteifenden Querwand infolge unterschiedlichen Verformungsverhaltens nicht zu erwarten ist, eine mitwirkende Breite angesetzt werden. In der Praxis wird aus Rationalisierungsgründen heutzutage jedoch mehrheitlich die Stumpfstoßtechnik ausgeführt, bei der eine zugfeste Verbindung zwischen Flansch und Steg über die in der Lagerfuge eingelegte Bewehrung in Form von Edelstahlflachankern hergestellt wird. Für diese Herstellungsweise fehlen derzeit gänzlich Untersuchungen im Bezug auf das Verhalten unter Erdbebenbeanspruchungen.

Das Ziel der Forschungsarbeiten war, den Einfluss des Zusammenwirkens von zusammengesetzten Schubwandquerschnitten auf das Trag- und Verformungsverhalten in üblichen Hochbauten für den Lastfall Erdbeben nach DIN 4149 (2005) zu untersuchen. Als Referenzgebäude wurde auf Basis von Voruntersuchungen ein übliches dreigeschossiges Reihenmittelhaus ausgewählt, bei dem die horizontale Lastabtragung durch quer zu den Längswänden stehende Schubwände erfolgt. Die Untersuchungen bezogen sich auf Gebiete mittlerer und geringer Seismizität wie sie in Deutschland und Mitteleuropa vorzufinden ist. Für die Untersuchungen wurden ausschließlich praxisrelevante Stein-Mörtel-Kombinationen aus Ziegel- und Kalksandsteinmauerwerk sowie moderne Herstellmethoden, wie Dünnbettverfahren und Stumpfstoßtechnik, berücksichtigt.

2 Experimentelle Untersuchungen

Für die Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens zusammengesetzter Schubwandquerschnitte für den Lastfall Erdbeben wurden zum einen statisch-zyklische, und zum anderen pseudodynamische Versuche an Wandbauteilen im Originalmaßstab durchgeführt. Bei beiden Versuchsmethoden werden die Mauerwerkskörper unter kombinierter Druck- und Schubbeanspruchung in Scheibenebene geprüft, um eine möglichst realitätsnahe Belastung (Kräfte und Verschiebungen) der Wände im Versuch zu simulieren.

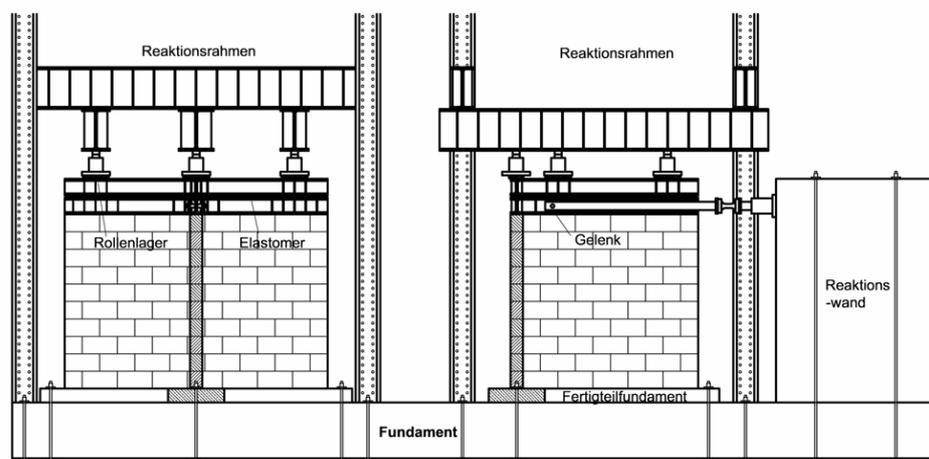


Abbildung 2.1: Versuchsaufbau für zusammengesetzte Mauerwerksquerschnitte

Zu Beginn des Versuchsprogramms wurden zur Beurteilung des Tragwiderstandes von zusammengesetzten Mauerwerksquerschnitten im Vergleich zum Tragwiderstand von geraden Mauerwerkswänden, Versuche mit statisch-zyklischem Belastungsverlauf durchgeführt. Der Vorteil dieser Versuchsmethode, bei der der zeitliche Verlauf der Belastungen im Vorfeld festgelegt ist, liegt in der verbesserten Vergleichbarkeit der Ergebnisse von geraden Wandscheiben mit den Ergebnissen aus Versuchen an zusammengesetzten Wandquerschnitten, da hier im Gegensatz zu den pseudodynamischen Versuchen die Belastungsgeschichte zum einen nicht durch die Reaktion des Versuchskörpers bzw. des zu untersuchenden Gebäudes beeinflusst wird, und zum anderen die Kombination von Normalkraft und Schubbeanspruchung unabhängig von einem zu untersuchenden Gebäudetyp vorgegeben werden kann..

Für die genauere und realitätsnähere Simulation des Verhaltens komplexer Mauerwerksgebäude unter Erdbebenbeanspruchung wurde die Methode der Pseudodynamik angewendet. Hierbei wird die maßgebliche Schubwand im untersten Geschoss im Versuchsstand direkt experimentell geprüft, während der Rest der tragenden Gebäudestruktur im Computer numerisch simuliert wird. Grundlage dieser Methodik ist dabei die zeitgleiche Kopplung von realem Bauteilversuch und numerischen Simulation der restlichen Konstruktion.

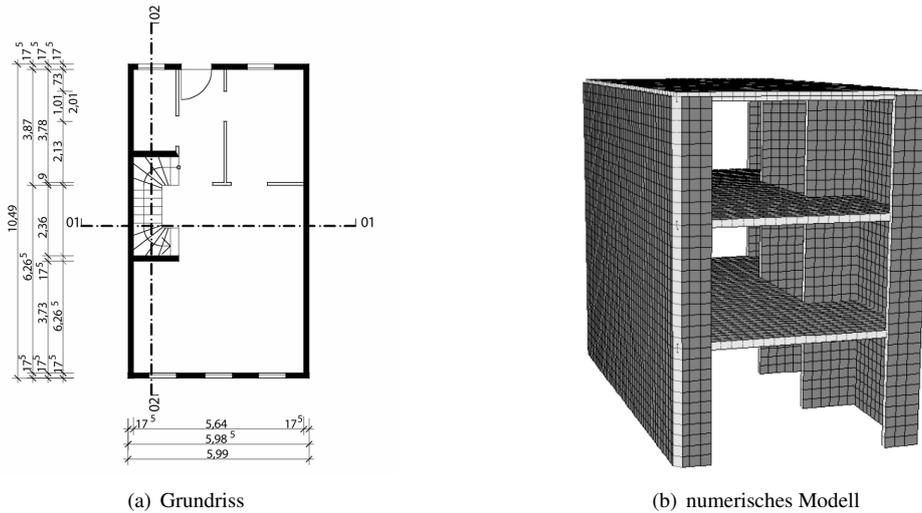


Abbildung 2.2: untersuchtes dreigeschossiges Reihenmittelhaus (Referenzgebäude)

Die numerische Berechnung erfasst dabei sämtliche dynamische Belastungen, so dass für den eigentlichen Versuch eine statische Lastaufbringung ausreichend ist. Grundlage der numerischen Berechnungen bei pseudodynamischen Versuchen ist die schrittweise Lösung der Schwingungsdifferentialgleichung (Hilber et al. (1977); Newmark (1959); Schermer (2004); Shing et al. (1996); Thiele (2000)) eines fußpunkterregten Systems für den viskos gedämpften Mehrmassenschwinger. Als Erdbebeneinwirkung wurde ein Bodenbeschleunigungszeitverlauf (nach DIN 4149 (2005) bzw. DIN EN 1998-1 (2006)) der Gesamtdauer von 10 Sekunden künstlich generiert (Meskouris (1999); Meskouris und Hinzen (2003)) und entsprechend der Laststufe skaliert.

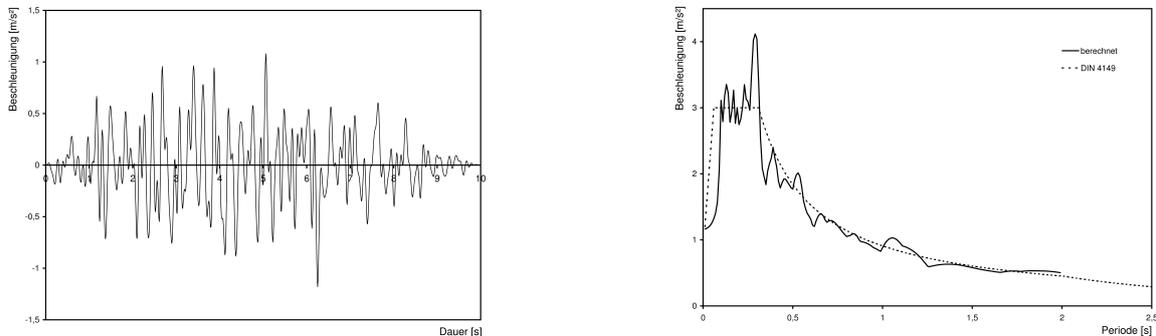


Abbildung 2.3: künstlich generierter Erdbebenzeitverlauf mit zugehörigem Antwortspektrum

Als Referenzgebäudemodell wurde ein dreigeschossiges Reihenmittelhaus mit Grundrissabmessungen von 6m x 10,5m gewählt. Die Geschossdecken bestehen dabei aus zweiachsig gespannten Stahlbetonplatten, die die Last auf die tragenden Mauerwerkswände ableiten. Die Aussteifung des Gebäudes in der untersuchten Belastungsrichtung, erfolgt im Wesentlichen durch zwei Schubwände, die mit den Längswänden im Grundriss T-förmig zusammenstoßen. Die Durchführung der Versuche erfolgte unter Ausnutzung der Symmetrie in Längsrichtung an einer Gebäudehälfte. Durch die Erfassung des Gebäudes als räumliches Modell mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente, konnte auch die Vertikallastaufteilung auf die einzelnen Mauerwerkswände realitätsnah erfasst werden.

3 ERGEBNISSE

Vergleich von statisch-zyklischen Versuchen mit pseudodynamischen Versuchen

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von zusammengesetzten Wandquerschnitten aus Mauerwerk wurden zwei verschiedene Versuchsmethoden angewendet: statisch-zyklische Versuche und pseudodynamische Versuche.

Der Vergleich der Hysteresekurven (Horizontalkraft über Wandkopfverschiebung) der pseudodynamischen Versuche, zeigt trotz Variation von maßgebenden Parametern (Wandgeometrie, Steinart, Steinformat, etc.) eine Ähnlichkeit in der äußeren Form der Hysterese. Gleiches gilt für die Form der Hysterese der statisch-zyklischen Versuche. Im Vergleich von statisch-zyklischen Versuchen mit den pseudodynamischen Versuchen, unterscheiden sich die Formen der Hysteresekurven allerdings deutlich. Jede Versuchsmethode erzeugt somit ein individuelles Ergebnis, aus dem nur zum Teil Aussagen über das Verhalten unter der jeweils anderen Methode abgeleitet werden können.

Vergleich von geraden Wänden mit zusammengesetzten Wandquerschnitten

Im Rahmen der statisch-zyklischen Versuche wurden neben den zusammengesetzten Wandquerschnitten auch drei einteilige (gerade) Wände geprüft. Diese geraden Schubwände waren bezüglich des Steinformats, der Lager- bzw. Stoßfugenausbildung und der Wandlänge bzw. -höhe jeweils identisch zu den Schubwänden der zusammengesetzten Wandquerschnitte. Je nach Steintyp, Steinformat, vertikalem Normalspannungsniveau und Wandgeometrie, zeigen die Schubsteifigkeit, die Hysteresekurven und die Versagensmechanismen teilweise ein sehr unterschiedliches Verhalten zwischen geradem und zusammengesetztem Querschnitt. Allen Versuchskörpern gemeinsam ist, dass sich bei zusammengesetzten Querschnitten die Schubwand in der Querwand abstützen kann und Schubkräfte in der Verbindungsfuge der Wandabschnitte aktiviert werden.

Einfluss der Verbindungsart von Schub- und Querwand

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden zwei unterschiedliche Arten der Verbindung von Querwand und Schubwand eingesetzt:

- Mauerwerkverband durch Verzahnung
- Stumpfstoßtechnik mit Einbau von Flachstahlankern

Zur Bestimmung des Einflusses dieses Parameters wurden deshalb mehrere zusammengesetzte Mauerwerkswände geprüft, die sich nur durch die Verbindungstechnik im Kreuzungsbereich der Wände unterscheiden. Im Rahmen der derzeit gültigen Bemessungsnorm DIN 1053-1 (1996) dürfen zusammengesetzte Querschnitte bei einer Schubbemessung nur bei Anwendung der verzahnten Verbandstechnik in Rechnung gestellt werden.

3 ERGEBNISSE

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten jedoch, dass auch bei Ausführung eines Stumpfstoßes mit zusätzlichen Stahlverbindungsankern im Kreuzungsbereich, ein Zusammenwirken von Schub- und Querwand erzeugt wird. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse jedoch abhängig vom Steintyp, der Stein- bzw. Wandgeometrie erheblich variieren. Eine eindeutige Aussage über den Einfluss der Verbindungstechnik auf Bemessungsparameter wie z.B. Traglast, Rissverhalten, Duktilität und die mögliche Energiedissipation, lässt sich daher aus den durchgeführten Versuchen nicht ableiten, hierzu sind weitere Versuche erforderlich.

Aktivierung der Querwand

Um die Aussteifungswirkung der Querwand bei zusammengesetzten Querschnitten aus Mauerwerk experimentell zu erfassen, wurden zusätzlich zu den Messungen an der Schubwand, auch die Plattenverformungen der Querwand in drei unterschiedlichen Höhenlagen und drei unterschiedlichen Achsen mittels elektronischen Weggebern erfasst.

In den Messergebnissen der Wegaufnehmer für die Plattenverformung der Querwand war bei allen Versuchen deutlich zu erkennen, dass die Größenordnung der Auslenkung in der Mittelachse in etwa derjenigen des Schubwandkopfes entspricht. Wesentlich ist jedoch die Erkenntnis, dass die beiden bezüglich der Mittelachse seitlich versetzt angeordneten Messgeber annähernd gleiche Verformungen messen, wie derjenige in der Schubwandachse. Diese Verschiebungsmessungen der Querwand lassen darauf schließen, dass der angesetzte Querwandabschnitt zum Lastabtrag horizontaler Schubkräfte vollständig aktiviert werden konnte. Bei den untersuchten Wandgeometrien war jedoch zum einen die Länge der Plattenstege teilweise identisch mit der Länge der Schubwand, und zum anderen wurde die Länge der Querwand innerhalb dieses Forschungsvorhabens nicht variiert. Eine allgemeingültige Aussage über eine mögliche mitwirkende Breite der Querwand kann aus diesem Grund, aus den Ergebnissen der geprüften Wände nicht getroffen werden.

Versagensmechanismus

Das Versagen der untersuchten Wände variierte in Abhängigkeit der Steinart und den geometrischen Verhältnissen. Ein allgemein gleichartiger Versagensmechanismus konnte infolge der Variation der Baustoffe und der Wandgeometrien nicht beobachtet werden.

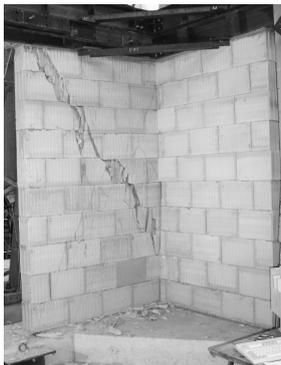


Abbildung 3.1: Prüfkörper V0a nach dem Versagen

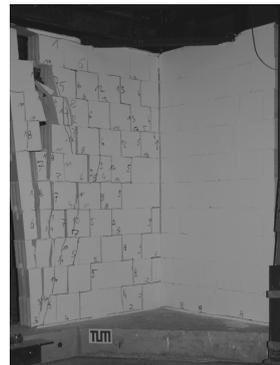


Abbildung 3.2: Prüfkörper V09 nach dem Versagen

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Experimentelle Untersuchung des nichtlinearen Tragverhaltens zusammengesetzter Schubwandquerschnitte aus unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbelastung“, wurden am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München, Schubversuche unter kombinierter Beanspruchung an geschosshohen Mauerwerkswänden durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens war, das Tragverhalten von zusammengesetzten Schubwandquerschnitten speziell im Hinblick auf seismische Einwirkungen hin zu erforschen. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die maßgebenden Parameter, wie z.B. Steinart, Wandgeometrie und Verbindungstechnik variiert. Zur Bestimmung des Verhaltens der Prüfkörper unter Schubbeanspruchung, wurden zwei unterschiedliche Versuchsmethoden (statisch-zyklische bzw. pseudodynamische Methode) angewendet. Die Ergebnisse dieser Wandversuche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Hysteresekurven (Horizontallast über Wandkopfverschiebung) zeigen einen entscheidenden Einfluss der Querwand auf das Tragverhalten des Gesamtquerschnitts. Die Querwand wird sowohl bei im Verband gemauerten Querschnitten als auch bei Ausbildung eines Stumpfstoßes, mit in den Lagerfugen eingelegten Flachstahlankern zur Lastabtragung der Schubwand mit herangezogen. Der Einfluss der Verbindungsart des Stoßes (im Verband gemauert oder stumpf gestoßen mit Stahlankern) auf die Erhöhung der horizontalen Traglast bzw. Verformbarkeit sowie auf das Energiedissipationsvermögen kann aus den durchgeführten Versuchen nicht allgemeingültig abgeleitet werden.
- Eine Entkopplung der Platte (Querwand) vom Steg (Schubwand) infolge der horizontalen Schubbeanspruchung war bei im Verband vermauerten zusammengesetzten Querschnitten nicht erkennbar.
- Die durchgeführten Versuche belegen eine deutliche Aktivierung der Querwand über ihre Breite.
- Das Versuchsergebnis wird durch die angewendete Versuchsmethodik (statisch-zyklisch bzw. pseudodynamisch) erkennbar beeinflusst.
- Das Rissbild, die Tragfähigkeit, die Duktilität und der Versagensmechanismus des Prüfkörpers wurden maßgeblich durch die geometrischen Verhältnisse Steinlänge zu Steinhöhe bzw. Wandlänge zu Wandhöhe, die verwendete Steinart und das vertikale Normalspannungsniveau geprägt.

Literaturverzeichnis

- DIN 1053-1 1996** DIN 1053-1: *Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Normenausschuß Bauwesen (NABau), November 1996
- DIN 1053-100 2007** DIN 1053-100: *Mauerwerk - Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts*. Normenausschuß Bauwesen (NABau), September 2007
- DIN 1053-100 A1 2007** DIN 1053-100 A1: *Mauerwerk - Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts; Änderung A1*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Normenausschuß Bauwesen (NABau), Februar 2007
- DIN 4149 2005** DIN 4149: *Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Normenausschuß Bauwesen (NABau), April 2005
- DIN EN 1998-1 2006** DIN EN 1998-1: *Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkung und Regeln für Hochbauten*. Deutsche Fassung EN 1998-1: 2004. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: Normenausschuß Bauwesen (NABau), April 2006
- Hilber et al. 1977** HILBER, H. M. ; HUGHES, T. J. R. ; TAYLOR, R. L.: Improved numerical Dissipation for time Integration Algorithms in Structural Dynamics. In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (1977)
- Meskouris 1999** MESKOURIS, K.: *Baudynamik: Modell, Methoden, Praxisbeispiele*. Bauingenieur-Praxis. Berlin : Ernst & Sohn, 1999. – ISBN 3-433-01326-8
- Meskouris und Hinzen 2003** MESKOURIS, K. ; HINZEN, K.-G.: *Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen - Anwendung - Beispiele*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg & Sohn, 2003. – ISBN 3-528-02574-3
- Newmark 1959** NEWMARK, N. M.: A Method of Computation for Structural Dynamics. In: *ASCE - Journal of Engineering Mechanics Division* (1959)
- Schermer 2004** SCHERMER, D. C.: *Verhalten von unbewehrtem Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung*. München, Technische Universität, Dissertation, Dezember 2004. – ISSN 0941 - 925X
- Shing et al. 1996** SHING, P. B. ; NAKASHIMA, M. ; BURSI, O. S.: Application of pseudodynamic Test Method to structural Research. In: *Earthquake Spectra* (1996)
- Thiele 2000** THIELE, K.: *Pseudodynamische Versuche an Tragwerken mit grossen Steifigkeitsänderungen und mehreren Freiheitsgraden*. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Dissertation, August 2000