



Kurzfassung zum Abschlussbericht

**Titel: Eingefasstes Mauerwerk als Möglichkeit
zur Erhöhung der Tragfähigkeit
von Aussteifungswänden**

**Einführung von Eingefasstem Mauerwerk zur Erhöhung der
Tragfähigkeit von aussteifenden Scheiben mit dem Ziel der
Kompensation von Mehrkosten infolge erhöhter,
horizontaler Einwirkungen**

Aktenzeichen: Z6-10.07.03-05.11

Auftraggeber: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Referat II 13
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Auftragnehmer: Technische Universität Dresden
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger

Bearbeiter: Prof Dr.-Ing Wolfram Jäger
Dipl.-Ing. Peter Schöps

Datum: Dresden, Juni 2009

.....
Prof Dr.-Ing Wolfram Jäger

„Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: Z6-10.07.03-05.11 / II 13 – 80 01 05 – 11)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor“

1 Ziel der Forschungsaufgabe

Mit dem durchgängigen Übergang auf das semiprobabilistische Sicherheitskonzept ist durch die wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung der Einwirkungen eine Erhöhung der horizontalen Beanspruchung von Gebäuden verbunden. Diese führt insbesondere bei Erdbebeneinwirkungen und in Bereichen erhöhter Windeinwirkungen zu Nachweisproblemen bei der Aussteifung von Mauerwerksbauten. Die damit notwendige Verstärkung führt zu einer Verteuerung einerseits und andererseits zu einem Marktverlust für eine bisher wirtschaftliche Bauweise, dem Mauerwerksbau.

Eine adäquate Alternative zur Verbesserung der horizontalen Tragfähigkeit von Mauerwerksbauten stellt das Eingefasste Mauerwerk dar. Durch die rahmenartige Umschließung der gemauerten Wände wird ein verbessertes Verhalten bei horizontaler Beanspruchung erreicht.

Es gibt bisher in Deutschland aber wenige experimentelle und theoretische Untersuchungen über das seismische Verhalten dieser Konstruktionen. Als Konsequenz daraus wird die signifikante horizontale sowie vertikale Tragfähigkeitsverbesserung durch Einfassungen bei der Bemessung nach DIN 4149 nur mit einem empirischen Verhaltensfaktor $q = 2,0$ berücksichtigt.

Ziel des Forschungsvorhabens war es zum einen die konstruktionsbedingten Vorteile zu erfassen und zum anderen die aus dem Herstellungsprozess entstehenden Besonderheiten zu untersuchen. Um eine breitere Anwendung von Eingefasstem Mauerwerk für wesentliche aussteifende Bauteile in Deutschland zu erreichen erfolgte die Erarbeitung eines Bemessungsalgorithmus, mit dessen Hilfe der anwendende Ingenieur die Vorteile bei statischen und dynamischen Belastungen nutzen kann.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

2.1 Allgemeines

Das Eingefasste Mauerwerk unterscheidet sich sowohl vom bewehrten Mauerwerk als auch von Ausfachungswänden. Der wesentliche Unterschied gegenüber Konstruktionen mit Ausfachungswänden besteht darin, dass das ausfachende Mauerwerk einen Teil der vertikalen Lasten mit trägt. Daher ist ein wichtiger Aspekt bei Eingefasstem Mauerwerk die Reihenfolge bei der Herstellung der Bauteile. Wird bei der Skelettbauweise zuerst der Stahlbetonrahmen hergestellt und anschließend die Ausfachung, ist dies beim Eingefassten Mauerwerk umgekehrt.

Bei bewehrtem Mauerwerk mit vertikaler Bewehrung befindet sich die Bewehrung in Steinen mit dafür vorgesehenen Löchern oder Öffnungen, die nach dem Errichten der Wand mit Beton verfüllt werden. Das Mauerwerk wird so nach dessen Errichtung ebenfalls durch Stahlbeton eingefasst. Allerdings ist diese Einfassung nicht mit einer Schubbewehrung versehen und ergibt keinen selbständigen Rahmen. Die verbesserte Biegetragfähigkeit trifft aber in gleichem Maße auf das Eingefasste Mauerwerk zu.

In den deutschen und europäischen Normen wird Eingefasstes Mauerwerk nur wenig behandelt. In der Regel bleibt es dem bemessenden Ingenieur überlassen wie er die jeweiligen Konstruktionen berücksichtigt. Während in Europa für seismisch stark aktive Regionen auf Konstruktionen aus Stahlbeton ausgewichen wird, ist außerhalb Europas Mauerwerk auch in solchen Gebieten verbreitet. So unterscheidet beispielsweise die peruanische Mauerwerksnorm SENCICO 2006 für die Gebäudeaussteifung zwischen Eingefasstem Mauerwerk und Ausfachungswänden. Für das Eingefasste Mauerwerk wird ein Verhaltensfaktor von 3 angesetzt. Die Bemessungsgleichungen sind empirisch aus einer Vielzahl von zyklischen und Rütteltischversuchen entstanden.

In Deutschland wurde zur experimentellen Bestimmung der Schubfestigkeit lange Zeit das „vereinheitlichte Schubprüfverfahren“ verwendet. Hierbei wird ein Ausschnitt der auf Schub beanspruchten Wand betrachtet. Die Schubspannungen werden umlaufend auf eine quadratische Mauerwerksscheibe aufgebracht. Mit dieser Versuchsanordnung sollte der auf *Mann/Müller* basierende analytische Ansatz nachgestellt werden.

In den letzten Jahren ist bei den Forschungen zur Schubtragfähigkeit von Mauerwerk, insbesondere unter Erdbebeneinwirkung, immer mehr zu Versuchsanordnungen mit Bezug zu Schubwänden im Gebäude übergegangen worden. So wurden zum Beispiel die Schubversuche des europäischen Forschungsvorhabens ESECMaSE so durchgeführt, dass am Wandkopf über zwei vertikale Pressen zum einen die Auflast aufgebracht und zum anderen ein Moment in die Wand eingetragen werden kann. Dieses Verfahren liegt auch den in diesem Projekt durchgeführten Versuchen zu Grunde.

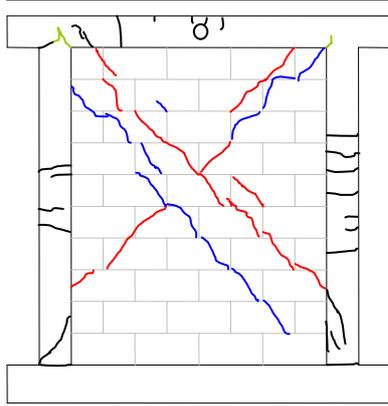
2.2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Beurteilung des Schubtragverhaltens von Eingefasstem Mauerwerk wurden vier Versuche an Mauerwerk aus Porenbetonsteinen durchgeführt. Hierbei sollte das spezielle Verhalten dieser Konstruktion im Verhältnis zu üblichen Aussteifungswänden untersucht werden. Ziel war es, neben dem Schubtragverhalten einer mittels Stahlbeton eingefassten Mauerwerkswand auch die durch unterschiedliche Schwindprozesse hervorgerufenen Vorspannungen zu erfassen. Bei der Versuchsanordnung wurden zwei Varianten untersucht. Bei der ersten Variante wird lediglich eine konstante Auflast auf die Versuchswand aufgebracht. Somit liegt der äußere Momentennullpunkt am Wandkopf. Für den letzten Versuch wurden die beiden vertikalen Zylinder so gesteuert, dass bei gleichbleibender Gesamtlast die Lage des Momentennullpunktes in halber Wandhöhe liegt.

Begleitend zum Aufbau der Versuchswände wurden zusätzliche Probekörper der verwendeten Materialien angefertigt und die notwendigen Eingangsparameter für die numerische Modelle zu bestimmen.

Es wurden die Verformungen der Versuchswände sowohl nach der Herstellung und vor der eigentlichen Versuchsdurchführung, als auch während der Versuchsdurchführung gemessen. In dem Zeitraum nach der Herstellung sind die Schwindverformungen über Setzdehnmesser auf den Versuchswänden und über in Hüllrohren in den Stahlbetonrahmen einbetonierte Stahlstäbe gemessen worden. Hierbei zeigte sich das zu erwartenden Schwindverhalten, welches zu einer Vorspannung des Mauerwerks führt.

Bei den Schubversuchen wurden zuerst die Auflast aufgebracht und anschließend eine zyklische horizontale Verformung aufgezwungen. Diese wurde nach jedem dritten Zyklus gesteigert. Bild 1 zeigt die typischen Erstrisse. In Bild 2 sind die erzielten Traglasten aktuelle Porenbetonversuchen ohne Einfassung gegenübergestellt.



- 1. Risse Mauerwerk 10mm Zyklus
- 2. Risse Mauerwerk 18mm Zyklus
- 1. Risse Rahmen 20mm Zyklus
- 2. Risse Rahmen 40mm Zyklus

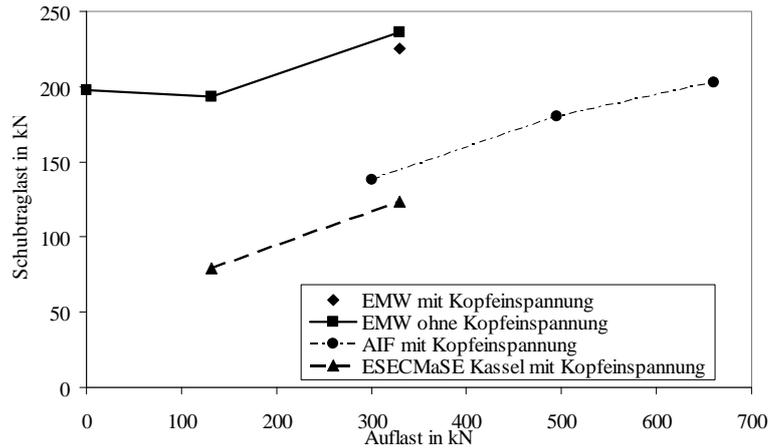


Bild 1 Rissbild Wand 2 (Auflast 132 kN)

Bild 2 Vergleich mit aktuellen Porenbetonversuchen aus der Literatur

Die sich aus der Hysterese des Last-Verschiebungsdiagramms ergebenden Hüllkurve wird zur Beurteilung der Duktilität bilinear vereinfacht. Die nach der gängigen Vorgehensweise bestimmten Werte sind in der folgenden Tabelle als Variante 1 (V1) angegeben.

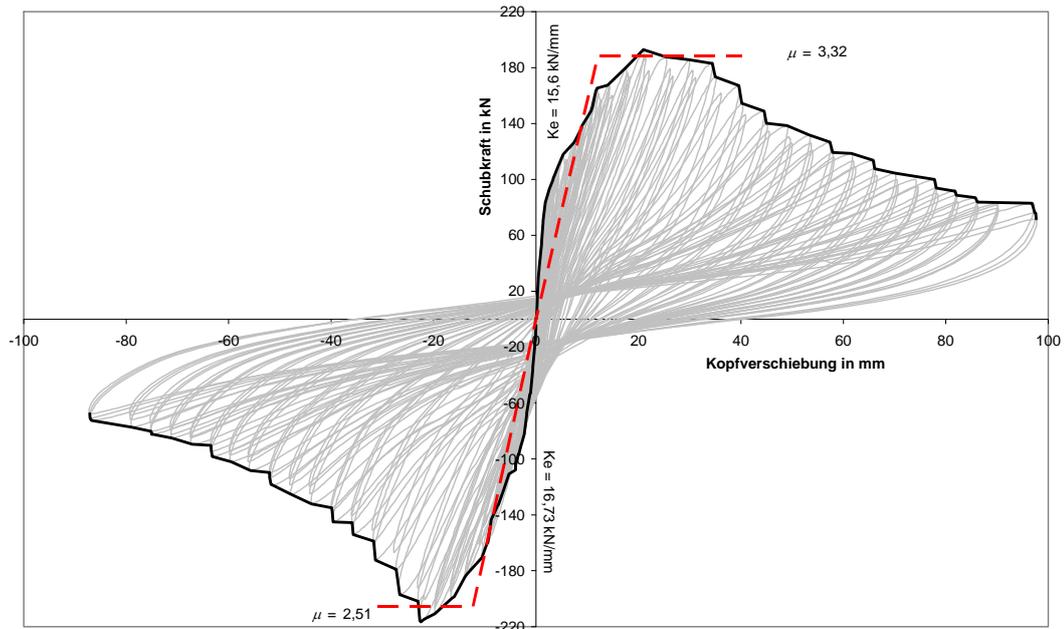


Bild 3 Hysterese und Hüllkurve für Wand 2 (Auflast 132 kN)

Tabelle 1 Übersicht über die Wandeigenschaften

Wand			1	2	3	4
V1	Auflast	kN	330	132	-	330
	H_{\max}^-	kN	250	217	198	242
	H_{\max}^+	kN	236	193	198	225
	μ^-		3,58	2,51	1,64	5,68
	μ^+		6,18	3,32	4,30	8,55
V2	H_{cr}^-	kN	100	107	86	125
	H_{cr}^+	kN	97	116	87	124
	μ^-		9,95	4,43	6,56	7,59
	μ^+		11,42	5,18	14,18	11,28
V3	d_u^-	mm	94,3	87,2	104,3	75,7
	d_u^+	mm	97,6	97,7	112,1	66,6
	μ^-		21,13	17,72	26,13	12,08
	μ^+		24,87	16,55	32,57	16,69

Durch den ausgeprägten nichtlinearen Verlauf der Last-Verformungs-Kurven im ansteigenden Bereich ergibt sich bei 70% der maximalen Schublast bereits eine größere plastische Verformung und damit eine geringere formelle Anfangssteifigkeit und Duktilität. Die errechneten Werte zwischen 4,3 mm und 13,1 mm für d_{cr} stellen für normale Mauerwerksscheiben bereits die maximale Verformung dar. Bei der Variante V2 sind für H_{cr} daher nicht 70% der maximalen Schublast, sondern die beobachtete Erstrisslast für die Berechnung der Duktilität verwendet worden. Für die dritte Variante V3 wurde zusätzlich die maximale im Versuch erreichte Verformung für die Bestimmung der Duktilität herangezogen.

2.3 Numerische und analytische Betrachtungen

Das für die numerischen Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben verwendete Programmsystem ANSYS ermöglicht über eine scriptgesteuerte Eingabe auf einfache Weise Parameter in numerischen Modellen zu verändern. Außerdem können über eine Programmierschnittstelle weitere vom Anwender entwickelte Elemente oder Materialroutinen eingebunden werden. Wie bereits bei den Untersuchungen im Rahmen anderer Forschungsprojekte festgestellt werden konnte, ist die Abbildung des Verbundverhaltens bei der Behandlung des Schubtragverhaltens von entscheidender Bedeutung. Daher wurden im Rahmen dieses Projektes in das Programmsystem ANSYS verschiedene Interface-Elemente implementiert. Für Porenbeton ist zusätzlich das Druck-Zug-Versagen innerhalb der Steine von Bedeutung. Hierfür wurde zusätzlich eine Materialroutine für die vorhandenen zweidimensionalen Elementen entwickelt. Mit dieser ist es nun möglich den Versagensverlauf in der Versuchswand numerisch nachzustellen und eine Parameterstudie durchzuführen. Das folgende Bild zeigt ein typisches numerisches Rissbild und den Kraftverlauf innerhalb der Wand nach den ersten Rissen.

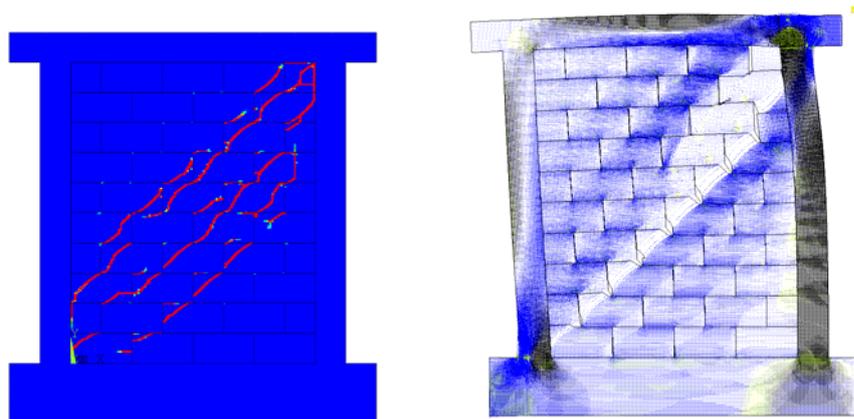


Bild 4 Typisches numerisches Rissbild und Kraftfluss einer Versuchswand

Die durch die Risse entstehenden beiden Hälften tragen als Teilscheiben die Schublast auch weiterhin ab. Am Ende des Risses wird der Rahmen auf Abscheren belastet.

Da der verwendete Stahlbetonrahmen nicht einzeln geprüft wurde, ist dessen Schubtragfähigkeit numerisch und analytisch abgeschätzt worden. Ohne Auflast liegt die Schubtraglasten zwischen 59 und 65 kN, mit Auflast etwas höher und wird erst bei einer Verformung von ca. 50 mm erreicht. Der direkte Anteil des Rahmens an der Schubtragfähigkeit ist daher gering.

Eine genauere Erfassung des Zusammenspiels zwischen Rahmen und Mauerwerk beim Schwinden ist nur durch ein FE-Modell möglich. Da bereits das frühe Schwinden des Betons durch das Mauerwerk verhindert wird, kommt es im Beton bereits zu ersten plastischen Dehnungen, die das Endschwindmaß verringern. Ein zweiter Einflussfaktor ist die relativ kurze Zeit zwischen Herstellung und Versuchs von ca. 2 Monaten. Daher wurden lediglich 20-25% des Endschwindmaßes in der erfassten Zeitspanne erreicht. Die daraus resultierenden Spannungen blieben im Mauerwerk deutlich unter den Festigkeiten, erreichten aber im Beton fast die Zugfestigkeit. Eine lokale Entspannung etwa durch Rissbildung in den Rahmenecken führt aber nicht zum vollständigen Verlust der Vorspannung, wie in einer weiteren numerischen Betrachtung festgestellt werden konnte.

Wie zu erwarten, beeinflusst die Stärke des Schwindens die Vorspannung des Mauerwerks und damit dessen Schubtragfähigkeit. Durch das horizontale Schwinden des oberen Balkens kommt es aber bereits zu einer Schubbeanspruchung des Mauerwerks was wiederum zu einer Verringerung der Tragfähigkeit führt. Eine weitere Steigerung des Schwindmaßes bringt daher nur noch geringe Traglasterhöhungen bzw. keinen Zuwachs mehr.

Das numerische Modell weist eine höhere Anfangsteifigkeit auf und der Lastabfall bei Rissbildung ist größer. Ursache für das abweichende Verhalten sind die Inhomogenitäten des Mauerwerks. In der Simulation wird von einem homogenen Material ausgegangen, bei dem die Festigkeit und die Steifigkeit in jedem Element identisch sind. Ebenso sind alle Stoßfugen ohne Versatz abgebildet. Bei einer Vergleichsrechnung ohne Kontakt in den Stoßfugen ergab sich zwar die gleiche Risslast, aber die Steifigkeit war geringer. Bei einer streuenden Zugfestigkeit der Steine ist eine weniger spröde Rissbildung und ggf. ein früherer Rissbeginn zu erwarten. Mit den genannten Einschränkungen konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und numerischem Ergebnis erzielt werden.

Bei der Parameterstudie wurde neben der Wandlänge auch das Steinformat verändert. Die halbierte Steinelänge führte im Vergleich mit den in den Versuchen verwendeten Steinen zu einer geringeren Anfangsteifigkeit und bei den kleineren Auflaststufen auch zu einer geringeren Tragfähigkeit. Durch die Verlängerung der Wand vergrößerte sich in gleichem Maße die Schubtragfähigkeit.

In weiteren Varianten wurde die Dicke des einfassenden Stahlbetonrahmens und der Bewehrungsgrad geändert. Das Fugensversagen konnte nur numerisch untersucht werden, da die Verbundfestigkeiten bei den verwendeten Porenbetonsteinen größer als die Steinzugfestigkeit sind. In Abhängigkeit von der Steingeometrie, der Auflast und dem Verhältnis von Haftzug- zur Haftscherfestigkeit variiert das Versagen. Das in Bild 5 dargestellte Klaffen muss beim Eingefassten Mauerwerk nicht zum Versagen führen.

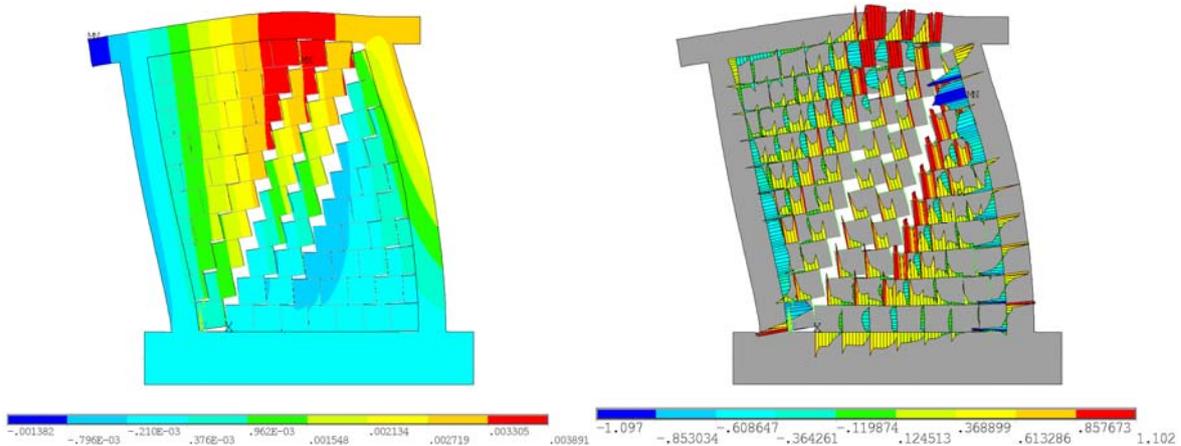


Bild 5 Vertikale Verformungen und Normalspannungen in den Fugen ohne Auflast

Durch die vertikale Verformungszunahme wird über den Rahmen eine zusätzliche Auflast aktiviert, die eine erhöhte Schubtragfähigkeit ermöglicht.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Eingefasstes Mauerwerk als Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Aussteifungswänden“ wurden mit freundlicher Unterstützung des Bundesverbandes Porenbeton bei der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH vier zyklische Schubversuche an eingefassten Porenbetonwänden durchgeführt. Parallel erfolgte die Bestimmung aller relevanten Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe. Des Weiteren sind für die numerische Simulation Interface-Elemente und eine Materialroutine in das Programmsystem ANSYS implementiert worden. Hiermit konnte eine numerische Parameterstudie zur Untersuchung weiterer Einflussfaktoren durchgeführt werden.

Ziel des Projektes war es, für Mauerwerk eine höhere Schubtragfähigkeit und eine bessere Duktilität nachzuweisen.

Bei der Versuchsdurchführung wurde als wesentlichster äußerer Einflussfaktor die Auflast variiert. Als unterste Grenze konnte beim Eingefassten Mauerwerk ein Versuch ohne Auflast gefahren werden. Als statisches System wurde für die ersten drei Versuche ein Kragarm angenommen. Die hierbei erreichte Schubtraglast ohne Auflast überstieg bereits deutlich die von konventionellem Mauerwerk mit Auflast und Kopfeinspannung. Eine Steigerung der Auflast führte zu einer weiteren Zunahme der Traglast.

Mit der vierten Versuchswand wurde eine Kopfeinspannung durch das Gebäude simuliert. Im Gegensatz zum konventionellen Mauerwerk konnte die Schubtragfähigkeit hierdurch nicht gesteigert werden. Allerdings ergab sich eine größere Anfangssteifigkeit.

Ein weiterer wichtiger Vorteil von Eingefasstem Mauerwerk ist dessen hohe Duktilität, welche sich in erster Linie in der maximalen Verformung zeigt. In den Versuchen wurde teilweise die Kapazitätsgrenze (Weg) der Prüfeinrichtung erreicht. Die nach der üblichen Vorgehensweise

berechnete Duktilität μ spiegelt diese Eigenschaft jedoch nicht adäquat wieder. Hier liefern ggf. die Flächen unter der Hüllkurve eine bessere Vergleichbarkeit.

Durch das große Verformungsvermögen des Stahlbetonrahmens ist auch eine hohe Resttragfähigkeit gegeben, die ein vollständiges Einstürzen des Gebäudes verhindern kann.

Die vergleichenden numerischen Untersuchungen haben den Einfluss des Herstellungsprozesses verdeutlicht. Durch das Betonieren nach dem Errichten des Mauerwerks kommt es einerseits zum besseren Verbund zwischen Rahmen und Ausfachung und andererseits erfolgt eine Vorspannung des Mauerwerks. Hierdurch kann besonders bei geringen Auflasten eine Traglaststeigerung erreicht werden.

Des Weiteren wurden numerisch weitere Einflussfaktoren variiert. So ist eine gewisse Abhängigkeit der Traglast vom Steinformat ersichtlich. Die Untersuchung des Versagens im Bereich der Fugen war nur numerisch möglich. Bei Verwendung von Steinen mit einem hohen h/l -Verhältniss können sich auf Grund des Klaffens und der daraus resultierenden Rotation einzelner Steinstreben zusätzliche Belastungen für den Rahmen ergeben.

Für die Bemessung wird ein erster Vorschlag unterbreitet, der auf den Bemessungsgleichungen für unbewehrtes Mauerwerk aufbaut und so die Übertragung der Erkenntnisse auf das Eingefasste Mauerwerk ermöglicht. Die Versuche und auch die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich durch den Schwindvorgang und den guten Verbund zwischen Mauerwerk und Rahmen ein Spannungszustand ähnlich dem des vereinheitlichten Schubprüfverfahrens einstellt. Für die Bemessung wird daher vorgeschlagen vereinfachend von einem gleichmäßig auf Schub belasteten Mauerwerksausschnitt auszugehen. Zusätzlich sind noch weitere Nachweise für den Rahmen zu führen.

Zur Bestimmung der Auflastverteilung zwischen Mauerwerk und Stahlbetonrahmen kann eine einfache Simulation mit Hilfe der FEM und linear-elastischem Materialverhalten durchgeführt werden. Die weitere Bemessung erfolgt analog DIN 1053 für einfache Wandscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk. Allerdings kann der Faktor für die Schubspannungsverteilung für das Steinzugversagen zu 1,0 gesetzt bzw. die Tragfähigkeit einer unbewehrten Wand um 1,5 erhöht werden. Beim Versagensfall Reibung ergibt sich eine deutliche Traglaststeigerung durch die Nutzung der Gesamtlänge der Mauerwerksausfachung im Gegensatz zur überdrückten Länge bei normalen Mauerwerksscheiben. Um dennoch den Einfluss einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung, die sich beim Reibungsversagen durch den großflächigen Verlust des Haftverbundes besonders auswirkt, in der Wand zu berücksichtigen, ist ein Abminderungsfaktor einzuführen.

Für die Biegebemessung der Wandscheibe kann in erster Näherung von bewehrtem Mauerwerk mit vertikaler Bewehrung ausgegangen werden. Bei einer genaueren Berechnung können das Schwinden und zusätzlich für den Druckbereich die höher Druckfestigkeit und der E-Modul des Betons berücksichtigen werden.

Nach der Rissbildung in der Ausfachung, die in der Regel diagonal verläuft, wird der Rahmen an den Rissenden zusätzlich auf Schub beansprucht, da über die Dübelwirkung die beiden entstehenden Wandhälften zusammengehalten werden. Bei der ungünstigsten Annahme, dass beide Wandhälften den gleichen Anteil der Schubkraft aufnehmen, ergibt sich für den Rahmen eine Querkraft in der Höhe der halben Schubkraft. Hierfür ist ein Querkraftnachweis für den Rahmen zu führen.

Da das äußere statischen System keinen entscheidenden Einfluss auf die Schubtragfähigkeit hat, vereinfacht sich die Bemessung gegenüber reinen Mauerwerksgebäuden. Es ist keine genaue Schnittkraftermittlung bezüglich der Momentenverteilung in den Aussteifungswänden notwendig. Eine aufwändige Gebäudemodellierung kann entfallen.

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche an Schubwänden sind auf Porenbetonmauerwerk begrenzt. Für eine allgemeinere Aussage sind weitere Versuche mit Kalksandsteinen und Ziegelmauerwerk notwendig und von besonderem Interesse. Hier sind zum einen ein anderes Verbundverhalten zu erwarten und zum anderen ein divergentes Verhalten beim Steinzugversagen.

Literatur

- [1] Jäger, W.; Schöps, P.: *Eingefasstes Mauerwerk als Möglichkeit zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Aussteifungswänden*. Forschungsbericht. Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung. erarbeitet i. A. des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Dresden Dezember 2008.
- [2] Fehling, E.; Stürz, J.: *Experimentelle Untersuchungen zum Schubtragverhalten von Porenbetonwandscheiben*. Kassel November 2006.
- [3] Jäger, W.; Lohaus, L.; Höveling, H.; Steinborn, T.; Schöps, P.: *Schubtragfähigkeit von Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen und Porenbeton-Planelementen*. Forschungsbericht. AIF-Nr. 14642BG. Hannover u. Dresden 2009.