



„Entwicklung eines rechnerischen Nachweisverfahrens zur wirtschaftlichen Bemessung von nichttragenden und ausgefachten Wänden aus Mauerwerk“

Aktenzeichen: Z 6 – 10.07.03-06.07 / II 2 – 80 01 06 – 7

- Kurzbericht -

Forschende Stelle: TU Darmstadt, Institut für Massivbau

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Lars Richter

Auftraggeber: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
(BBR)

Datum: 30. Juni 2008

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

1 ZIEL DER FORSCHUNGSAUFGABE

In den derzeit gültigen deutschen Mauerwerksnormen ist eine Berücksichtigung der Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge bei der Berechnung von biegebeanspruchten Wänden nicht gestattet. Dies bedeutet, dass zur Aufnahme von Biegebeanspruchungen immer eine Normaldruckkraft entsprechender Größe erforderlich ist. Für die Bemessung von nichttragenden und ausfachenden Mauerwerkswänden, welche per Definition über keine Auflasten verfügen, macht diese Festlegung einen rechnerischen Nachweis der Biegetragfähigkeit unmöglich. Die Bemessung solcher Wände erfolgt daher bis heute mit Hilfe von Tabellen, in denen die Tragfähigkeit anhand von Versuchen aus den 80er Jahren unter festgelegten Randbedingungen ermittelt wurde. Eine Anwendung dieser Bemessungstabellen gestaltet sich heute jedoch schwierig, da mit der Einführung von DIN 1055-4 veränderte Windeinwirkungen zu berücksichtigen sind. Ebenfalls sind bei dem heute verwendeten Mauerwerk mit z. B. unvermörtelten Stoßfugen die seinerzeit festgelegten Randbedingungen für die Bemessungstabellen nicht immer eingehalten. Eine alternatives Nachweisformat für derartige Wände findet man selten in der Literatur und wenn, dann wird es durch die Bedingungen der DIN 1053-1 ausgeschlossen.

Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, dass Mauerwerk über eine, wenn auch geringe, Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge verfügt, wodurch ein allgemein gültiges Berechnungsverfahren zum wirtschaftlichen Nachweis von nichttragenden und ausfachenden Mauerwerkswänden – auch ohne Auflast – möglich wird. Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht daher darin, auf der Grundlage einer fundierten Analyse der Tragfähigkeitsmechanismen und Materialeigenschaften ein Berechnungsmodell zur Ermittlung der Tragfähigkeit von nichttragenden Wänden zu entwickeln. Die verschiedenen Einwirkungen auf die Wände aber auch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Stein-Mörtel-Kombinationen müssen Berücksichtigung finden, um somit zu einer höheren Effektivität bei der Ausführung und Flexibilität bei der Planung von Wohngebäuden beizutragen.

2 DURCHFÜHRUNG DER FORSCHUNGSAUFGABE

Der Grundgedanke basiert ebenfalls auf der Bruchlinientheorie, bei der die Risschädigung in so genannten Bruchlinien zusammengefasst wird, die dann als Drehachsen zwischen den einzelnen Plattenanteilen bzw. bei eingespannten Rändern wirken. Entgegen dem ideal-plastischem Materialverhalten im Stahlbetonbau muss im Mauerwerksbau das nur teilweise ausgeprägte plastische Verhalten berücksichtigt werden. Eine wesentliche Aufgabe ist daher, neben der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit das Nachbruchverhalten bzw. Entfestigungsverhalten zu erfassen. Im Hinblick auf das stark ausgeprägte orthotrope Verhalten von Mauerwerk muss eine getrennte Analyse für eine Beanspruchung senkrecht und parallel zur Lagerfuge erfolgen. Zusätzlich muss aufgrund des zweiachsigen Lastabtrages in der Wand der Einfluss der Drillmomente sowie die Interaktion zwischen den Biegebeanspruchungen analysiert und durch geeignete mechanische Modelle beschrieben werden.

Im ersten Schritt des Projektes wurden aus der Literatur vorhandene Modelle hinsichtlich des mechanischen bzw. empirischen Modells vorgestellt und für einen späteren Vergleich aufbereitet. Der mechanische Hintergrund der Modelle basiert überwiegend auf der Bruchlinientheorie, so dass eine kurze Beschreibung der Grundlagen für eine plastostatische Schnittkraftermittlung erfolgte. Anschließend wurde die Anwendung der Bruchlinientheorie auf das Mauerwerk diskutiert und anhand des Werkstoffverhaltens die Problematik dargestellt. Die vorgestellten Berechnungsverfahren stellen nur einen Ausschnitt der in der Literatur zur Verfügung stehenden Modelle dar. Weitere Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ermittlung der Systemtragfähigkeit durch verschiedene Ansätze von baustoffspezifischen Kennwerten oder modifizierten Randbedingungen. Hier sind vor allem die Biegezugfestigkeit bzw. die Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit oder die Auflagerbedingungen als wesentliche Vertreter genannt.

Auf der Grundlage der Momenten-Krümmungs-Beziehung von Mauerwerk mit einer Biegebeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge konnte ein Berechnungsverfahren zur Erfassung des Tragverhaltens des gerissenen Querschnitts entwickelt werden. Die Beschreibung des nichtlinearen Tragverhaltens erfolgt mit einem Stab-Feder-Modell, bei dem das nichtlineare Tragverhalten innerhalb der Risszone über die Eigenschaften der Feder abgebildet und der ungerissene Bereich der Wand durch die elastischen Eigenschaften des Stabes beschrieben wird. Die Eigenschaften der Feder wurden über die Momenten-Verdrehungs-Beziehung erfasst. Ausgehend von der Krümmung des gerissenen und des ungerissenen Querschnitts wurde der Verdrehwinkel durch die Integration der Krümmungen innerhalb der Prozesszone des Risses berechnet.

In einem nächsten Schritt wurde das Tragverhalten bei einer Biegebeanspruchung parallel zur Lagerfuge eingehend analysiert. Aufgrund der Stoßfugen und der unterschiedlichen Materialeigenschaften vom Stein und vom Mörtel besitzt Mauerwerk ein orthotropes Verhalten. Zur Berechnung der Schnittgrößen einer zweiachsig abtragenden Wand, aber auch zur Bestimmung der Krümmungen und Verdrehungen ist die Kenntnis der Steifigkeit parallel zu den Lagerfugen von besonderer Bedeutung. Für eine unvermörtelte Stoßfuge existieren bereits in der Literatur Approximationsgleichungen zur Bestimmung des Verhältnisses der Biegesteifigkeiten. Unter der Annahme einer nur druckkraftübertragenden Stoßfuge wurden weiterführende Analysen auf der Grundlage einer Finiten-Elemente-Berechnung durchgeführt. Hinsichtlich des Steifigkeitsverhältnisses konnte ein signifikanter Einfluss der Orthotropie des Steines festgestellt werden. Ein maßgebender Einfluss einer gerissenen Stoßfuge konnte für großformatiges Mauerwerk festgestellt werden, welches jedoch meistens mit unvermörtelten Stoßfugen ausgeführt wird.

Grundsätzlich musste eine Unterscheidung hinsichtlich der Bruchkriterien Steinzugversagen und Lagerfugenversagen getroffen werden. Das Lagerfugenversagen weist nicht nur eine auflastabhängige Biegetragfähigkeit auf, sondern konvergiert ebenfalls nach Überschreitung der Querschnittstragfähigkeit gegen eine lastabhängige Resttragfähigkeit. Sowohl für die maximale Querschnittstragfähigkeit als auch für die sich plastisch verhaltende Resttragfähigkeit konnte eine mathematische Beschreibung angegeben werden. Zur Abbildung des Entfestigungsverhaltens wurde ein exponentieller Ansatz unter Verwendung einer Bruchenergie gewählt.

Die Identifikation des Steinzugversagens basiert auf der Hauptspannungshypothese, die die Kenntnis der Steinzugspannungen voraussetzt, welche einen nichtlinearen Verlauf über die Steinhöhe aufweisen. Mit Hilfe eines Erhöhungsfaktors in Abhängigkeit der Steingeometrie konnte eine Quantifizierung der maximalen Steinzugspannung erfolgen.

Bei einem zweiachsigen Lastabtrag von Wänden aus Mauerwerk liegt eine mehraxiale Beanspruchung vor. Zur Erfassung der Tragfähigkeit des Mauerwerks wurden daher auf der Grundlage der zuvor hergeleiteten Materialgesetze für den einachsigen vertikalen bzw. horizontalen Lastabtrag Bruchbedingungen definiert. Zusätzlich wurde für eine wirklichkeitsnahe Erfassung des Tragverhaltens das Entfestigungsverhalten unter Berücksichtigung der Bruchregime Steinzugversagen und Lagerfugenversagen für die Biege- und Drillmomente der Platte erweitert. Die entwickelten Materialgesetze erlauben eine allgemeine Beschreibung des Tragverhaltens von Mauerwerk hinsichtlich der Querschnittstragfähigkeit und des Nachbruchverhaltens und bildeten die Grundlage für die Ermittlung der Systemtragfähigkeit der Wand.

Unter Verwendung des Stab-Feder-Modells wurde auf Basis der Finite-Elemente-Methode ein Berechnungsmodul entwickelt. Aufgrund der nichtlinearen Federn entsteht ebenfalls ein nichtlineares Gleichungssystem, welches mit dem implementierten Newton-Raphson-Verfahren gelöst wurde. Zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit wurde ein inkrementell-iteratives Vorgehen gewählt. Die Last wird dabei schrittweise aufgebracht, wobei innerhalb des Inkrements das Iterationsverfahren zur Anwendung kommt. Anschließend erfolgte eine Verifizierung des Programms mit dokumentierten Versuchen aus der Literatur. Die nachgerechneten Versuche von Jäger (2007) zeigten eine sehr gute Abschätzung der Traglast von nichttragenden Wänden. Hingegen wurden die von Anstötz (1990) experimentell ermittelten Traglasten unterschätzt. Als Ursache wurde die „weiche“ Versuchseinrichtung identifiziert, wodurch zusätzliche Lastumlagerungsmöglichkeiten aktiviert wurden.

Im Sinne einer praxistauglichen Anwendung musste das Berechnungsverfahren dahingehend aufgearbeitet werden, dass ein einfaches Bemessungskonzept zur Verfügung steht. Im Vordergrund steht dabei die Abschätzung der Traglast der Wand unter gegebenen Randbedingungen, ohne eine aufwendige nichtlineare FE-Berechnung durchführen zu müssen. In Anlehnung an den bereits eingeführten bezogenen Traglastfaktor Y_W kann der Bemessungswert der aufnehmbaren Last nach Gl. 2-1 ermittelt werden. Der Nachweis erfolgt nicht auf Basis der Schnittgrößen, sondern über die Bemessungswerte der einwirkenden und der aufnehmbaren Last.

$$q_{Ed} \leq q_{Rd} \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$\text{mit } q_{Rd} = \frac{t^2}{A_w} \cdot \frac{f_{tk2}}{\gamma_M} \cdot Y_w \quad \text{Gl. 2-2}$$

Der bezogene Traglastfaktor Y_W beschreibt die Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung von nichtlinearen Effekten und beinhaltet die Ermittlung der Schnittgrößen. Der Traglastfaktor wurde mit festgelegten Material- und Systemparametern für einen ausgewählten Lagerungstyp anhand einer Parameterstudie bestimmt. Zusätzlich erfolgte eine Auswertung für nichttragende Innenwände analog zu den Tabellen von Kirschig & Anstötz (1984), in denen in Abhängigkeit des Einbaubereiches und der Wanddicke bzw. -höhe die Grenzlängen vertafelt wurden.

3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens lag in der Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Abschätzung der Systemtragfähigkeit von Ausfachungswänden sowie nichttragenden Innenwänden. Auf der Grundlage der zuvor hergeleiteten Materialgesetze konnte ein nichtlineares Berechnungsmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode erarbeitet und im Anschluss verifiziert werden. Im Hinblick auf eine praxistaugliche Anwendung wurde ein Bemessungsvorschlag auf Basis des bezogenen Traglastfaktors Y_w vorgestellt. In Abbildung 3-1 ist der Traglastfaktor für die umlaufend gelenkig gelagerte Ausfachungswand für verschiedene Verhältnisse der Biegezugfestigkeiten ausgewertet.

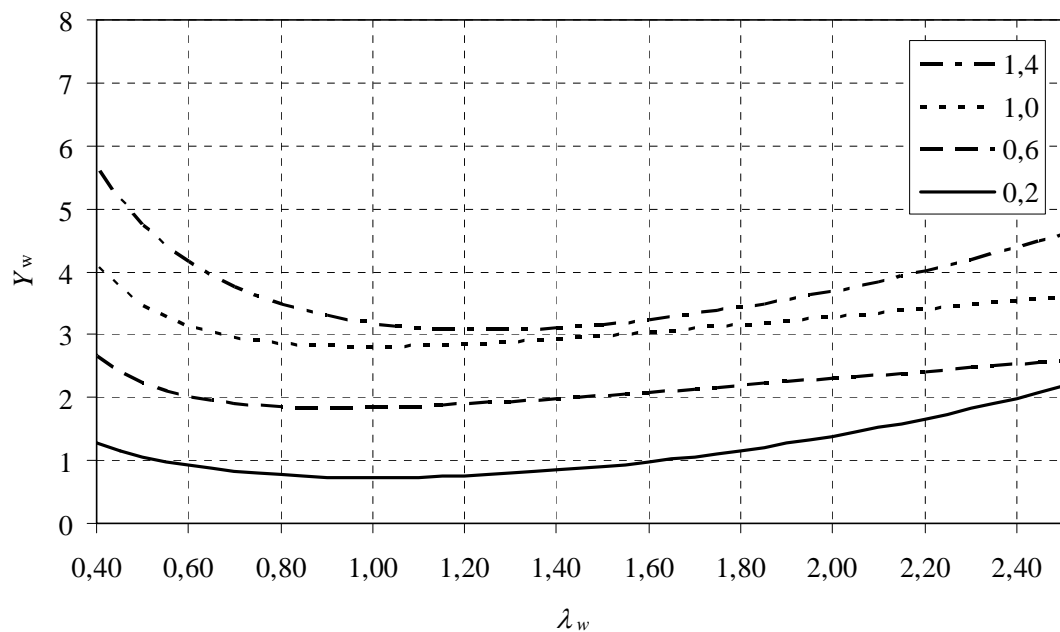


Abbildung 3-1 Bezogener Traglastfaktor für verschiedene Verhältnisse μ_t der Biegezugfestigkeit für eine umlaufend gelenkig gelagerte Wand

In Tabelle 3-1 wurde exemplarisch für eine vierseitig gehaltene Wand mit unvermörtelten Stoßfugen Gl. 2-1 für zwei Werte der Biegezugfestigkeit ausgewertet. Als Bezugswert wurde die charakteristische Biegezugfestigkeit f_{tk1} senkrecht zur Lagerfuge gewählt, da diese bei kleinen Wandschlankheiten maßgebend ist. Der Teilsicherheitsbeiwert für die horizontale Last q_H wurde entsprechend DIN 1055-100 (2001) für eine außergewöhnliche Einwirkungen mit $\gamma_Q = 1,0$ angenommen.

Tabelle 3-1 Maximale Länge von vierseitig gehaltenen Wänden mit $\mu_t \leq 1,0$

Einbau- bereich	H [m]	f_{ikl} [N/mm ²]	Wanddicke [cm]		
			11,5	17,5	24
1	2,50	0,10	3,2	∞ (12)	∞ (12)
		0,25	∞ (12)		
	3,50	0,10	5,9		
		0,25	∞ (12)		
	4,50	0,10	∞ (12)		
		0,25	∞ (12)		
2	2,50	0,10	-	5,2	
		0,25	∞ (12)	∞ (12)	
	3,50	0,10	-	10,0	
		0,25	∞ (12)	∞ (12)	
	4,50	0,10	-	∞ (12)	
		0,25	∞ (12)	∞ (12)	

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass neue Materialgesetze zur Beschreibung des Tragverhaltens von Mauerwerk entwickelt und in einem nichtlinearen Berechnungsmodell umgesetzt werden konnten. Entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens wird für die ausfachenden Wände und für die nichttragenden Innenwände ein praxistauglicher Bemessungsvorschlag auf der Grundlage der Biegezugfestigkeiten senkrecht und parallel zur Lagerfuge vorgestellt.