

Tragfähigkeit nichttragender Wände aus Mauerwerk

Ein nichtlineares Berechnungsverfahren und Bemessungsmodell für biegebeanspruchte Innen- und Außenwände

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Lars Richter

aus

Wolmirstedt / Sachsen-Anhalt

Darmstadt 2009

D 17

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Fachgebiet Massivbau
Petersenstraße 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Richter, Lars:

Tragfähigkeit nichttragender Wände aus Mauerwerk –
Ein nichtlineares Berechnungsverfahren und Bemessungsmodell für biegebeanspruchte
Innen- und Außenwände

1. Auflage, Darmstadt, Eigenverlag, Heft 18

ISBN 978-3-9811881-5-8

Dr.-Ing. Lars Richter

Geboren am 06.03.1976 in Wolmirstedt/Sachsen-Anhalt. Von 1996 bis 2002 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin. Von 2002 bis 2004 Tragwerksplanung und Projektleitung bei der Bilfinger Berger AG in Wiesbaden. Von 2004 bis 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Seit 2008 Mitarbeiter bei der Bilfinger Berger Nigeria GmbH in Wiesbaden.

VORWORT

Zu Beginn meines Studiums des Bauingenieurwesens stand ich am Fuße eines Berges, der aus Lernen und Prüfungen bestand. Nach mehr als fünf Jahren hatte ich den Gipfel erklommen und konnte zum einen mein gewonnenes Wissen in die Bilfinger Berger AG einbringen und zum anderen neues Wissen und neue Erfahrungen sammeln. Nach zwei Jahren kreuzte Herr Prof. Dr.-Ing. Graubner zunächst nur kurz meinen Weg, bevor ich mit Unterstützung von Dr.-Ing. Thomas Kranzler im Oktober 2004 am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt meine Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter aufnahm. Der nächste Berg wollte bestiegen werden und es zeigte sich, dass er aus vielen einzelnen Bergen bestand, denen ab und zu auch ein tiefes Tal folgte. Ob dies ein Fluch oder Segen war, vermag ich bis zum heutigen Zeitpunkt nicht zu beurteilen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich für seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen, das mir die Möglichkeit zu einer selbstständigen und eigenverantwortlichen Forschungstätigkeit eröffnete.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Seim danke ich neben seiner Bereitschaft zur Übernahme des Korreferates vor allem für sein Interesse an der Arbeit. Seine fachliche Kompetenz und die mit Ihm geführte fachliche Diskussion haben mich in meiner Vorgehensweise bestärkt.

Für die sorgfältige und kritische Durchsicht meines Manuskriptes danke ich meinem Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Markus Spengler, meinem Kollegen Dipl.-Ing. Frank Ritter und insbesondere Frau Dorit Richter.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit, aber hauptsächlich für die weit über die berufliche Arbeit am Institut hinausgehenden freundschaftlichen Beziehungen, die nicht nur zu meiner Motivation beitrugen, sondern mir auch eine schöne Zeit am Institut bereiteten, an deren Momente ich mich gerne zurückerinnern werde.

Den unauffälligsten, aber nicht unwesentlichsten Beitrag leisteten meine Familie sowie Frau Gisela Gediga und Herr Hubert Gediga. Ihnen danke ich besonders herzlich.

Darmstadt, Mai 2009

Lars Richter

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner (TU Darmstadt)

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Werner Seim (Universität Kassel)

Tag der Einreichung: 19.11.2008

Tag der mündlichen Prüfung: 15.05.2009

*Nicht nur die Kräfte in einem Tragwerk stehen im Gleichgewicht,
sondern auch die Ereignisse im Leben.*

ABSTRACT

Flexural capacity of non-loadbearing masonry walls

Method for the non-linear analysis and design model for infill and interior walls

Both wind loaded infill walls and interior masonry walls are primarily subjected to out-of-plane biaxial bending. Today, the design of these non-loadbearing walls in Germany is based on limited wall dimensions determined by experimental investigations. The design standards with their associated boundary conditions do not consider newly developed masonry types, e.g. masonry with unfilled head joints. Furthermore, existing design methods for masonry walls subjected to uniformly distributed lateral loading and simply supported on more than two edges are based on the yield line method or a modification thereof (e.g. British Standard, European Standard, Canadian Standard). In the yield line method, plastic behaviour of the material is assumed, as shown by steel and reinforced concrete. The complex load-bearing behaviour of masonry shows that the analysis of flexural wall panels using the yield line theory depends on the axial load and the material strength of the units and mortar as well as their bond. Presently, there is no design model using realistic assumptions of the material behaviour. To overcome these shortcomings, a new method for the non-linear analysis of flexural masonry wall panels has been developed and a simplified design model for both infill masonry walls and interior walls has been provided.

The analysis of the load-bearing behaviour of masonry has to be divided into two directions. Normal to the bed joint, the plastic behaviour depends on the ratio of the axial load to the corresponding flexural tensile strength of masonry. The transfer of horizontal bending moment depends on the available flexural strength of the units and torsional shear strength of the bed joints. Therefore, two different failure modes with unequal plastic behaviour have to be considered. On the one hand, the unit can fail due to flexural tensile stress (brittle failure), and no residual load-bearing capacity exists after cracking. On the other hand, failure can occur due to the torsional failure in the bed joints, and a plastic moment can transfer depending on the level of normal stresses in the bed joints.

This dissertation begins with a short introduction to the material behaviour of masonry and an evaluation of various established theoretical methods for the structural analysis of walls. Subsequently, the different residual post-cracking load-bearing capacities were investigated and new material models are presented in Chapter 4 for bending normal to the bed joint and in Chapter 5 for bending horizontal to the bed joint.

Additionally, the complete description of the structural behaviour subject to out-of-plane biaxial bending walls required an analysis of twisting moments. In Chapter 6, the development of failure criteria and corresponding load-bearing capacities considering combined stresses in the wall is described. For the subsequent numerical investigation,

the deformation behaviour of the cracked cross section had to be analysed separately for both stepped and line failure of masonry.

Based on the new analytical equations for the material behaviour, a numerical model for the calculation of flexural capacity of non-loadbearing masonry walls was developed using the finite element method as explained in Chapter 7. A simplified design equation for the flexural capacity, without a non-linear iterative analysis, was also developed for use in practise. The simplified equation takes into consideration the support conditions, wall dimensions and the ratio of flexural tensile strength perpendicular and parallel to the bed joint. In addition to the design model established for interior walls, new tables with limited wall dimensions for two selected masonry types have also been provided.

The realistic description of the behaviour of masonry subjected to out-of-plane biaxial bending and the implementation in a numerical model based on the finite-element method, allows the load-bearing capacity of walls with different support conditions and all types of masonry to be determined. In addition, the simplified design model and equation presented here may be used in practise for the design of non-loadbearing walls.

INHALTSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN UND VARIABLEN.....	V
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 WERKSTOFFVERHALTEN VON MAUERWERK	5
2.1 Einführung.....	5
2.2 Mauerstein und Mauermörtel.....	5
2.3 Mauerwerk unter Druckbeanspruchung.....	7
2.4 Mauerwerk unter Biegebeanspruchung	8
2.4.1 Beanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	8
2.4.2 Beanspruchung parallel zur Lagerfuge	11
2.5 Verbundverhalten zwischen Mörtel und Stein.....	15
2.5.1 Einleitung	15
2.5.2 Zugbeanspruchung	16
2.5.3 Schubbeanspruchung.....	17
2.5.4 Interaktion von Zug- und Schubbeanspruchung	20
2.6 Zusammenfassung.....	21
3 ANALYSE AUSGEWÄHLTER BERECHNUNGSMODELLE	23
3.1 Einführung.....	23
3.2 Berechnungsverfahren für nichttragende Außenwände	24
3.2.1 Einführung.....	24
3.2.2 Bruchlinientheorie	25
3.2.2.1 Allgemeines.....	25
3.2.2.2 Bruchlinien und Bruchfigur	25
3.2.2.3 Betrachtung lokaler Versagensformen	27
3.2.2.4 Berechnungsverfahren.....	28
3.2.2.5 Anwendung der Bruchlinientheorie auf Mauerwerk.....	29
3.2.2.6 Bemessung nach der Bruchlinientheorie.....	33

3.2.3	Ausfachungswände nach DIN 1053-1	36
3.2.4	Britische Norm BS 5628-1 und Europäische Norm EC 6-1	37
3.2.5	Kanadische Mauerwerksnorm CSA S304.1-04	39
3.2.6	Australische Mauerwerksnorm AS 3700-2001	40
3.2.7	Verfahren nach Willis et al.	44
3.2.7.1	Allgemeines	44
3.2.7.2	Biegetragfähigkeit parallel zur Lagerfuge	44
3.2.7.3	Biegetragfähigkeit senkrecht zur diagonalen Risslinie	46
3.2.7.4	Auswertung der Systemtragfähigkeit	48
3.2.8	Verfahren nach Jäger	50
3.2.9	Verfahren nach Tonn	51
3.2.10	Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren für Außenwände ...	56
3.3	Bemessung von nichttragenden Innenwänden	61
3.3.1	Allgemeines	61
3.3.2	Einwirkungen nach DIN 4103-1	61
3.3.3	Nachweis der Trennwände über Grenzmaße	63
3.4	Zusammenfassung	66
4	TRAGVERHALTEN VON MAUERWERK MIT EINER BIEGEBEANSPRUCHUNG SENKRECHT ZUR LAGERFUGE	69
4.1	Einführung	69
4.2	Berechnung der Querschnittstragfähigkeit	70
4.3	Momenten–Verdrehungs–Beziehung für Biegung mit Normalkraft... 71	
4.3.1	Grundlagen	71
4.3.2	Berechnung der Steifigkeit	76
4.4	Vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der Systemtragfähigkeit ... 78	
4.5	Zusammenfassung	84
5	TRAGVERHALTEN VON MAUERWERK MIT EINER BIEGEBEANSPRUCHUNG PARALLEL ZUR LAGERFUGE	85
5.1	Einführung	85
5.2	Grundlagen	86
5.3	Einfluss einer vermörtelten Stoßfuge	89

5.4	Bestimmung der orthotropen Steifigkeitseigenschaften von Mauerwerk.....	92
5.5	Tragverhalten von Mauerwerk infolge von Schubversagen in der Lagerfuge	96
5.5.1	Grundlagen	96
5.5.2	Bestimmung der Bruchenergie.....	99
5.5.3	Plastisches Moment für eine unvermörtelte Stoßfuge.....	105
5.5.4	Plastisches Moment für eine vermörtelte Stoßfuge.....	106
5.5.5	Interaktion von Moment und Querkraft im plastischen Zustand .	109
5.5.6	Berechnung der Steifigkeit.....	110
5.6	Tragverhalten von Mauerwerk infolge von Steinzugversagen	110
5.7	Zusammenfassung.....	115
6	ALLGEMEINES TRAGVERHALTEN VON BIEGEBEANSPRUCHTEM MAUERWERK.....	117
6.1	Einführung.....	117
6.2	Tragfähigkeit von Mauerwerk unter ausschließlicher Drillbeanspruchung	118
6.2.1	Modell	118
6.2.2	Einfluss einer vermörtelten Stoßfuge.....	120
6.2.3	Querschnittstragfähigkeit infolge von Steinzugversagen.....	123
6.2.4	Querschnittstragfähigkeit infolge von Schubversagen in der Lagerfuge	130
6.3	Bruchbedingungen für Mauerwerk unter mehrachsiger Biegung....	135
6.3.1	Allgemein	135
6.3.2	Bruchbedingung für den Punkt 1 (Steezugversagen).....	137
6.3.3	Bruchbedingung für den Punkt 2 (Steezugversagen).....	137
6.3.4	Bruchbedingungen für den Punkt 3 (Lagerfugenversagen)	138
6.3.5	Bruchbedingungen auf der Grundlage der Biegezugfestigkeit des Mauerwerks.....	140
6.4	Nachbruchverhalten von Mauerwerk.....	143
6.4.1	Allgemeines.....	143
6.4.2	Versagen der Lagerfuge	143
6.4.3	Zugversagen des Mauersteines.....	146
6.5	Zusammenfassung.....	150

7	NICHTLINEARES BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR ZWEIACHSIG LASTABTRAGENDE WÄNDE	151
7.1	Einführung	151
7.2	Berechnungsmethode zur Bestimmung der Systemtragfähigkeit.....	152
7.3	Verifizierung der Systemtragfähigkeit	157
7.3.1	Einführung	157
7.3.2	Versuche von Jäger (2007)	158
7.3.3	Versuche von Anstötz (1990)	162
7.3.4	Zusammenfassung	167
7.4	Sensitivitätsstudie	168
7.4.1	Allgemeines	168
7.4.2	Einfluss der Steindicke	169
7.4.3	Einfluss des Elastizitätsmoduls von Mauerwerk	171
7.4.4	Einfluss der Bruchenergie und der Biegezugfestigkeit	173
7.5	Zusammenfassung	176
8	BEMESSUNG VON NICHTTRAGENDE WÄNDEN	179
8.1	Einführung	179
8.2	Allgemeines Bemessungsmodell	180
8.3	Berechnung und Approximation der Systemtragfähigkeit	182
8.3.1	Grundlagen	182
8.3.2	Nichttragende Außenwände.....	182
8.3.3	Nichttragende Innenwände	186
8.4	Auswertung	187
8.4.1	Nichttragende Außenwände.....	187
8.4.2	Nichttragende Innenwände	192
8.5	Zusammenfassung	195
9	RESÜMEE UND AUSBLICK.....	197
	LITERATURVERZEICHNIS	201
	ANHANG A	A-1
	ANHANG B	A-4
	ANHANG C	A-17