

Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung der verformungsbasierten Membranwirkung

Ein nichtlineares Berechnungsverfahren und ein
Bemessungsmodell für unbewehrte vorwiegend flächenbelastete
Wände unter Einbeziehung der Lagerungsbedingungen

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

DISSERTATION

von

Michael Schmitt M.Sc.

aus
Steinbach / Hessen

D 17

Darmstadt 2017

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Werner Seim
Tag der Einreichung:	05. April 2017
Tag der mündlichen Prüfung:	18. September 2017

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

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

Schmitt, Michael:

Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände unter Berücksichtigung
der verformungsbasierten Membranwirkung
Ein nichtlineares Berechnungsverfahren und ein Bemessungsmodell für unbewehrte vorwiegend
flächenbelastete Wände unter Einbeziehung der Lagerungsbedingungen

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 39

ISBN 978-3-942886-16-1

Michael Schmitt

Geboren 1981 in Hünfeld. Von 2001 bis 2005 Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Darmstadt. Von 2005 bis 2007 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2007 bis 2010 Mitarbeiter der HOCHTIEF Construction AG - Consult Building in Frankfurt/Main. Von 2011 bis Anfang 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter für das Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH in Frankfurt/Main tätig. Ab 2011 nebenberuflich tätig im Ingenieurbüro BauConsult Michael Schmitt. Seit 2016 Mitarbeiter im Ingenieurbüro bauart Konstruktions GmbH in Lauterbach / Hessen.

Zusammenfassung

Obwohl die Konstruktion von Brücken und Sakralbauten aus Mauerwerk aus künstlichen Steinen seit der Antike erfolgreich angewandt wird, liegen für diverse Konstruktionen keine auf geometrischen, mechanischen oder mathematischen Grundlagen aufbauende und hinreichend validierte Lösungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit inkl. der Versagensarten und Verformungszustände vor. Zu diesen wenig erforschten Fällen zählt die verformungsbasierte Membranwirkung, welche bei unbewehrten ausfachenden Mauerwerkswänden unter bestimmten Randbedingungen auftreten und das Tragverhalten maßgeblich beeinflussen kann. Heutzutage werden diese vorwiegend biegebeanspruchten Mauerwerkswände gerade in der Stahlbetonskelettbauweise im Hoch-, Industrie- und Kraftwerksbau eingesetzt. Durch eine Verformungsbehinderung mittels einer kraftschlüssigen Ausbildung der Fugen zwischen den Mauerwerkswänden und den angrenzenden Stahlbetonbauteilen können die Membrandruckkräfte in nennenswerter Größe aktiviert werden. Zu beachten ist, dass in diesem Fall eine z. B. durch Wind belastete, in Plattenrichtung biegebeanspruchte Mauerwerkswand durch die horizontale Belastung zu einer zusätzlich in vertikaler Richtung normalkraftbelasteten Wand wird. Die entstehende Druckkraft ist dabei keine im klassischen Sinn verstandene Auflast, sondern eine durch Zwang entstehende Normalkraft, eine Reaktion, zu deren Entstehung jedoch horizontale und dadurch auftretende vertikale Verformungen der Wand notwendig sind. Neben den Gleichgewichtsbedingungen sind daher auch die Verträglichkeitsbedingungen wie die Verformungen der Wand zu betrachten. Wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Wand hat die Federsteifigkeit der angrenzenden Stahlbetondecken. Hinzu kommt, dass nicht nur ein Phänomen Theorie II. Ordnung, sondern durch das entstehende Durchschlagproblem des statisch unbestimmten Systems Aspekte aus der Theorie III. Ordnung berücksichtigt werden müssen. Durch umfangreiche analytische und numerische Untersuchungen unter Berücksichtigung der aufgeführten Aspekte und Einflüsse wird ein analytisches nichtlineares Berechnungsverfahren sowie ein Bemessungsmodell entwickelt, mit welchen das Tragverhalten sowie die Versagensarten dieser Wände bestimmt werden können. Ein grafisch aufgetragener normierter Traglastfaktor in Abhängigkeit wichtiger System- und Werkstoffkennwerte ermöglicht mit wenigen Diagrammen die praxisnahe und übersichtliche Bemessung dieser Wände für eine Vielzahl der in der Anwendung vorkommenden Geometrie-, Werkstoff- und Lastkonfigurationen.

Abstract

Man-made bricks have been successfully applied in masonry constructions like bridges and sacred buildings for millennia. Nevertheless, no validated methods to determine the load carrying capacity including the failure modes and deformation states for some special masonry constructions, which are based on geometrical, mechanical or mathematical backgrounds, are available. One of the unsolved problems is the membrane effect in unreinforced infill masonry walls, which significantly influences the load bearing behaviour of the masonry structure. Today, infilled masonry walls are often used in reinforced concrete frame constructions of buildings, industry and power stations. Through a friction connection between the non-load-bearing masonry wall and the adjacent reinforced concrete structural elements, membrane compressive stresses can be activated. In this case, an additional normal force in vertical direction, which is an in-plane constrained displacement caused by bending, e.g. due to wind load, should be taken into account in the analysis of load bearing capacity of the masonry wall. Besides the equilibrium of forces, the compatibility conditions, e.g. the deformation of the wall, has to be analysed. In structural systems made of concrete elements and masonry walls, flexural stiffness of reinforced concrete slabs strongly influences the carrying capacity of the infilled masonry walls. Additionally, not only a phenomenon of the second order theory, but also, due to the snap through aspects, the third order theory has to be taken into account as well. With extensive analytical and numerical analyses and under consideration of the decisive aspects and influences, an analytical model and a design model for infilled masonry walls have been developed. With this new calculation model the maximum horizontal load and the failure modes of the masonry walls can be determined. Through a defined normalized load carrying capacity factor, which depends on system types and material parameters, it is possible to determine the dimensions of walls for a wide variety of geometrical, material and load configurations with few diagrams.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Variablen	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	3
1.3 Vorgehensweise.....	5
2 Werkstoffeigenschaften von Mauerwerk	7
2.1 Einführung	7
2.2 Aktuelle Mauerwerksentwicklungen	8
2.3 Ausgangsstoffe	9
2.3.1 Mauerstein	9
2.3.2 Mauermörtel	11
2.3.3 Verbund zwischen Mauerstein und Mauermörtel.....	11
2.4 Mauerwerk unter Druckbeanspruchung.....	13
2.4.1 Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	13
2.4.2 Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	16
2.5 Mauerwerk unter Zug- und Biegezugbeanspruchung	18
2.5.1 Allgemeines.....	18
2.5.2 Zugbeanspruchung senkrecht und parallel zur Lagerfuge	18
2.5.3 Biegezugbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	19
2.5.4 Biegezugbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	20
2.6 Mauerwerk unter Schubbeanspruchung.....	22
2.7 Beschreibung des Last-Verformungs-Verhaltens von Mauerwerk	22
2.8 Zusammenfassung	27
3 Querschnittstragfähigkeit und Biegesteifigkeit von unbewehrtem Mauerwerk .	29
3.1 Einführung	29
3.2 Berechnung der Querschnittstragfähigkeit.....	30
3.2.1 Allgemeines.....	30
3.2.2 Linear-elastisches Werkstoffverhalten.....	30
3.2.3 Bilineares Werkstoffverhalten.....	34
3.2.4 Starr-plastisches Werkstoffverhalten	38
3.3 Berechnung der Biegesteifigkeit	40
3.3.1 Grundlagen	40
3.3.2 Linear-elastisches Werkstoffverhalten.....	40
3.3.3 Bilineares Werkstoffverhalten.....	44
3.4 Zusammenfassung	46

4	Analyse ausgewählter Berechnungsverfahren für vorwiegend biegebeanspruchtes Mauerwerk.....	49
4.1	Einführung	49
4.2	Einwirkungen auf ausfachende Wände aus Mauerwerk	49
4.3	Systemmodelle zur Bestimmung der einachsigen Tragfähigkeit unbewehrter vorwiegend biegebeanspruchter Mauerwerkswände	51
4.4	Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit	53
4.4.1	Allgemeines	53
4.4.2	Bemessung von nichttragenden Außenwänden nach DIN EN 1996-1-1	53
4.4.3	Bemessung von nichttragenden Außenwänden nach DIN EN 1996-3/NA.....	53
4.4.4	Berechnungsverfahren nach Richter	54
4.5	Berechnungsverfahren unter Vernachlässigung der Biegezugfestigkeit.....	56
4.5.1	Allgemeines	56
4.5.2	Mindestauflast nach DIN EN 1996-3.....	56
4.5.3	Mindestauflast nach DIN EN 1996-3/NA	58
4.5.4	Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der Mindestauflast	61
4.6	Berechnungsverfahren unter Verwendung des Bogenmodells.....	62
4.6.1	Einführung	62
4.6.2	Ansatz der Bogentragwirkung nach DIN EN 1996-1-1 und BS 5628-1	62
4.6.3	Untersuchungen von Jäger zu Mauerwerkswänden unter geringen Auflasten	63
4.7	Berechnungsverfahren unter Verwendung der Membranwirkung	65
4.7.1	Einführung	65
4.7.2	Historische Entwicklung der Theorie der Membrandruckkräfte	65
4.7.3	Verfahren nach McDowell et al.	67
4.7.4	Verfahren nach Anderson	68
4.7.5	Weitere Verfahren	70
4.7.6	Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Anstötz	71
4.8	Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren.....	74
4.9	Zusammenfassung.....	75
5	Allgemeine Formulierungen zur Ermittlung der verformungsbasierten Membrandruckkraft	77
5.1	Einführung	77
5.2	Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Membrandruckkräfte.....	78
5.3	Berücksichtigung von teilaufliegenden Decken	79
5.4	Berechnung der Membrandruckkraft für unterschiedliche Werkstoffgesetze.....	81
5.4.1	Allgemein.....	81

5.4.2	Erläuterung der Systemzustände.....	82
5.4.3	Linear-elastisches Werkstoffverhalten.....	83
5.4.4	Bilineares Werkstoffverhalten.....	101
5.4.5	Starr-plastisches Werkstoffverhalten.....	102
5.5	Zusammenfassung.....	104
6	Modellierung der Systemtragfähigkeit unter Berücksichtigung der Membranwirkung.....	105
6.1	Einführung.....	105
6.2	Grundlagen.....	106
6.2.1	Überblick über die Verformungstheorien.....	106
6.2.2	Auftretende Versagensarten.....	107
6.3	Systemtragfähigkeitsbeeinflussende Parameter.....	110
6.3.1	Berücksichtigung des Eigengewichts.....	110
6.3.2	Berücksichtigung einer Auflast.....	110
6.3.3	Berücksichtigung des Schwindens.....	111
6.3.4	Berücksichtigung einer ungewollten Ausmitte.....	113
6.4	Berechnung der vertikalen Systemtragfähigkeit.....	114
6.4.1	Grundlagen.....	114
6.4.2	Zusatzbeanspruchung infolge Theorie II. Ordnung.....	118
6.4.3	Linear-elastisches und bilineares Werkstoffverhalten.....	125
6.4.4	Starr-plastisches Werkstoffverhalten.....	135
6.4.5	Iterative Berechnung der Systemtragfähigkeit.....	139
6.5	Numerische Untersuchungen zum Last-Verformungs-Verhalten der angrenzenden Stahlbetonbauteile.....	143
6.5.1	Allgemein.....	143
6.5.2	Modellierung der zu untersuchenden Systeme.....	144
6.5.3	Belastungsreihenfolge.....	146
6.5.4	Ergebnisse der Parameterstudie.....	147
6.6	Zusammenfassung.....	151
7	Verifizierung des Berechnungsverfahrens und Analyse der Systemtragfähigkeit	153
7.1	Einführung.....	153
7.2	Verifizierung mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode.....	154
7.2.1	Modellierung.....	154
7.2.2	Verifizierung des analytischen Modells an Versuchsergebnissen.....	157
7.2.3	Verifizierung des analytischen Modells mit FE-Modellierungen.....	160
7.2.4	Bewertung der Qualität des Finiten-Elemente-Modells.....	164

7.3	Verifizierung der Systemtragfähigkeit mit einem Berechnungsverfahren für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung	165
7.4	Analyse der Systemtragfähigkeit	167
7.4.1	Einführung	167
7.4.2	Einfluss des Werkstoffverhaltens.....	168
7.4.3	Einfluss der Auflagerfeder im Vergleich zur konstanten Auflast im System ohne Feder.....	174
7.4.4	Einfluss der maximalen Membrandruckkraft	178
7.4.5	Einfluss von Schwindfugen	181
7.4.6	Einfluss der teilaufliegenden Decke.....	183
7.4.7	Auswertung der auftretenden Versagensarten	185
7.4.8	Auswertung des Integrationsfaktors für den Systemzustand 3.....	185
7.5	Zusammenfassung.....	187
8	Bemessungsmodell	189
8.1	Einführung.....	189
8.2	Sicherheitskonzept mit Mittelwerten der Baustoffeigenschaften	190
8.3	Berechnung der Biegetragfähigkeit	193
8.4	Berechnung der Querkrafttragfähigkeit	194
8.5	Durchbiegungsbeschränkung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	195
8.6	Auswertung der Tragfähigkeit ausfachender Mauerwerkswände	198
8.7	Sicherstellung der Mindestauflast bei tragenden Mauerwerkswänden	204
8.8	Zusammenfassung.....	210
9	Resümee und Ausblick	211
10	Literaturverzeichnis	215
Anhang	223