

Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände

**Nichtlineares Berechnungsmodell und
konsistentes Bemessungskonzept
für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung**

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

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Glock

aus Bensheim / Hessen

D 17

Darmstadt 2004

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Massivbau

Petersenstraße 12

64287 Darmstadt

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

Glock, Christian:

Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerkswände –

Nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung

1. Auflage, Darmstadt, Eigenverlag, Heft 9

ISBN 3-9808875-6-1

Dr.-Ing. Christian Glock

Geboren 1974 in Bensheim / Hessen. Von 1993 bis 1999 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt und der Universität Oulu / Finnland. 1996 Aufnahme in die Studienstiftung des deutschen Volkes. 2000 Verleihung des VBI-Preises für die Diplomarbeit. Von 1999 bis 2000 Bauleitung und Tragwerksplanung bei der Bilfinger Berger AG in Frankfurt und Mannheim. Von 2001 bis 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 2001 bis 2003 Lehrbeauftragter für Technische Mechanik an der Berufsakademie Mannheim. Von 2002 bis 2004 freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König, Heunisch und Partner in Frankfurt am Main. Seit 2004 Projektmanager bei der Bilfinger Berger BOT GmbH in Wiesbaden.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2001 bis 2004 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Eine entscheidende Motivation zur Behandlung des gewählten Themenkomplexes war ein gemeinsames Forschungsvorhaben des Institutes und der Forschungsvereinigung Kalksand e. V., das aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V. (AiF) gefördert worden ist. Für die finanzielle Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit während des Forschungsvorhabens bin ich sehr dankbar.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für das mir entgegengebrachte große Vertrauen, für seine intensive Förderung, die vielfältigen Anregungen verbunden mit einer großen Diskussionsfreude sowie seiner ansteckenden Leidenschaft für das Bauingenieurwesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange danke ich für sein großes Interesse an dieser Arbeit, seine fachlichen Anregungen sowie für die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kolleginnen und Kollegen bin ich für das vertrauensvolle und freundschaftliche Verhältnis in beruflicher und privater Hinsicht sehr dankbar, das mir die Zeit am Institut für Massivbau unvergesslich werden ließ.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studentinnen und Studenten, die durch ihre fachlichen Diskussionen im Rahmen von Diplom- und Vertiefararbeiten zum Gelingen der Arbeit beitrugen.

Für ihren fachlichen Rat und ihre kritischen Anregungen in zahlreichen Diskussionen danke ich meinem Vater Dipl.-Ing. Helmut Glock, meinem Bruder Dr.-Ing. Alexander Glock, meinem Onkel Dr.-Ing. Dieter Glock und Herrn Dr.-Ing. Holger Schmidt sehr herzlich.

Für die sehr sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes dieser Arbeit danke ich meiner Freundin Sina Jenal, meiner Schwester Stephanie Glock sowie Herrn Dipl.-Ing. Rainer Schwalbe.

Vor allem aber richtet sich mein Dank an meine Eltern Ingrid und Helmut Glock, die mich in all den Jahren liebevoll unterstützten, und an meine liebe Freundin Sina Jenal, die mir den zum Gelingen dieser Arbeit notwendigen privaten Rückhalt gab.

Bensheim, November 2004

Christian Glock

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange
Tag der Einreichung:	7. Juli 2004
Tag der mündlichen Prüfung:	25. Oktober 2004

ABSTRACT

Load-bearing capacity of unreinforced concrete and masonry walls

Model for non-linear analysis and consistent design concept for slender walls under compression

Most concrete and masonry walls do not need reinforcement. Due to external vertical loads common wall structures resist significant bending moments without reinforcement or prestressing. While unreinforced masonry walls are common in many countries, concrete walls are usually reinforced to limit cracks caused by shrinkage. If crack limitation is guaranteed by improved curing or the use of fibre concrete, unreinforced concrete walls are economic, too. Today the design of unreinforced concrete and masonry walls is based on different design methods, although the load-deformation behaviour of both materials is similar. The existing analysis and design methods do not consider the varying non-linear material behaviour of different concrete strengths and of different masonry types accurately. They are based on rough approximations of the material properties and on idealised structural systems. The non-linear stress-strain relationship of compressed concrete or masonry and the tensile strength are neglected. Furthermore the influence of lateral wall deformation, i. e. Theory of 2nd Order, is considered on the basis of simplistic approximations. Therefore the load-bearing capacity of walls rather depend on the design standard used than on the provided structural material. To overcome this shortage a new model for the non-linear analysis and a new consistent design concept for unreinforced concrete and masonry walls have been developed in this doctoral thesis (similar to PhD thesis). These are based on realistic assumptions for the material behaviour and the effect of lateral wall deformations.

Following a short introduction the material behaviour of concrete and masonry is being analysed in chapter 2 of this doctoral thesis. The load-deformation behaviour of concrete mainly depends on the compression strength and has been examined in many research projects. Today the stress-strain relationship of concrete can be modelled very accurately. The load-deformation behaviour of masonry depends on the material properties of the masonry units and the mortar. The great variety of different masonry units, materials, and mortar types makes it difficult to describe the stress-strain relationship of masonry. An internationally approved stress-strain relationship is not available, yet. Therefore the non-linear constitutive equations given in DIN 1045-1 (2001) and Eurocode 2 (2003) for compressed concrete are applied for masonry, too. The specific material parameters of common masonry types could be determined on the basis of existing experimental data. The load-deformation behaviour of concrete and masonry for tension is assumed to be linearly elastic.

In the following chapter 3 various established theoretical methods for the structural analysis have been modified and evaluated on the basis of standardised parameters. Furthermore the theoretical background is being analysed. Due to rough approximations concerning material properties and wall deformations the computed load-bearing capacity varies significantly. The evaluation of various international design standards for concrete and masonry approves these deviations and gives a review of existing normative requirements.

The new model for the non-linear analysis of the load-bearing capacity of concrete and masonry walls is being presented in chapter 4. Because of the non-linear stress-strain relationship of compression forces and the limited tensile strength, the resistance of the cross section to axial loads generally has to be calculated by an iterative process. Analytical equations for the load-bearing capacity of the cross section are possible only for the non-linear constitutive equations given in DIN 1045-1 (2001) and Eurocode 2 (2003). For the design of slender unreinforced concrete and masonry walls, lateral wall deformations have to be considered by a structural analysis according to Theory of 2nd Order. Due to the non-linear stress distribution in the compression zone and cracks caused by tensile stresses, usually iterative calculation methods are required. In this doctoral thesis a numeric method has been developed, calculating the load-bearing capacity of walls on the basis of any stress-strain relationship for compression stresses and a limited tensile strength. The objective of these numeric analyses was to identify the effect of varying material behaviours on the load-bearing capacity of slender unreinforced walls, as a basis for simplified design equations. Besides the dominant influence of the compressive strength on the load-bearing capacity of walls, significant influences of the strain at the peak stress and the curvature of the stress-strain relationship have been detected. If the tensile strength of concrete and masonry is considered for wall design the load-bearing capacity can be increased significantly for very slender walls. In addition to the numeric method analytical equations have been developed on the basis of a linear stress-strain relationship for compression and tension. These have been verified by the design methods given in DIN 18800-2 (1990) and Eurocode 3 (1993) for steel structures.

The new consistent design concept is presented in chapter 5. It is based on the new model for non-linear analysis and the normative requirements given in German and European design standards. Therefore the new design concept can be applied throughout Europe right away. In terms of an easy application analytical design equations for the load-bearing capacity of the cross section and the slender wall have been developed. Hereby the realistic non-linear material behaviour of different concrete strengths and masonry types may be considered by highly simplified equations or by more sophisticated equations, depending on the designer's aim. Design diagrams are provided, too, illustrating the possible enhancement of the load-bearing capacity of concrete and masonry walls by using the new consistent design concept.

The last chapter of this publication gives a summary and an outlook. The new model for non-linear analysis and the consistent design concept for unreinforced concrete and masonry walls allow to model the material behaviour of all kinds of materials realistically, by easy-to-use equations. The realistic stress-strain relationship of different masonry materials and concrete strengths may be modelled by a few input parameters without a time-consuming non-linear structural analysis. The presented simplified approximation equations and diagrams may be used for wall design and the more sophisticated equations may be used for scientific purpose. Due to the realistic assumptions of the material behaviour, a reduction of the safety factors for the design of concrete and masonry walls may be possible in the future. In addition the general approach of the new consistent design concept allows all kinds of structural materials, e. g. fibre concrete, to be modelled.

INHALTSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN UND VARIABLEN	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise.....	4
2 WERKSTOFFVERHALTEN VON BETON UND MAUERWERK	7
2.1 Einführung	7
2.2 Beton	8
2.2.1 Grundlagen	8
2.2.2 Ausgangsstoffe Zuschlag und Zement	8
2.2.3 Tragverhalten von Beton unter Druckbeanspruchung.....	12
2.2.4 Tragverhalten von Beton unter Zug- und Biegezugbeanspruchung.....	15
2.2.5 Last- und zeitabhängige Verformungskenngrößen von Beton.....	17
2.3 Mauerwerk.....	18
2.3.1 Grundlagen	18
2.3.2 Ausgangsstoffe Mauerstein und Mörtel	19
2.3.3 Tragverhalten von Mauerwerk unter Druckbeanspruchung.....	21
2.3.4 Tragverhalten von Mauerwerk unter Zug- und Biegezugbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge.....	26
2.3.5 Tragverhalten von Mauerwerk unter Zug- und Biegezugbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	31
2.3.6 Last- und zeitabhängige Verformungskenngrößen von Mauerwerk.....	33
2.4 Modellierung der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Beziehung.....	34
2.4.1 Grundlagen	34
2.4.2 Bezogene Werkstoffkennwerte der Spannungs-Dehnungs- Beziehung.....	35

2.4.3	Kritische Analyse ausgewählter Werkstoffgesetze.....	39
2.4.3.1	Allgemeines.....	39
2.4.3.2	Werkstoffgesetz nach Angervo	39
2.4.3.3	Werkstoffgesetz nach Lewicki	40
2.4.3.4	Werkstoffgesetz nach Sargin.....	41
2.4.3.5	Werkstoffgesetz nach Jäger.....	41
2.4.3.6	Werkstoffgesetz nach DIN 1045-1 (S).....	42
2.4.3.7	Werkstoffgesetz nach DIN 1045-1 (B)	43
2.4.3.8	Gegenüberstellung der Werkstoffgesetze.....	43
2.4.3.9	Analyse der Werkstoffgesetze nach DIN 1045-1 (S) und (B)	45
2.4.4	Werkstoffkennwerte für Beton	48
2.4.5	Werkstoffkennwerte für Mauerwerk.....	50
2.4.5.1	Allgemeines.....	50
2.4.5.2	Auswertung bestehender Forschungsarbeiten.....	51
2.4.5.3	Auswertung vorliegender Messwerte der einaxialen Druckprüfung	53
2.5	Zusammenfassung.....	62
3	KRITISCHE ANALYSE AUSGEWÄHLTER BERECHNUNGS- UND BEMESSUNGSVERFAHREN	63
3.1	Einführung.....	63
3.2	Historische Entwicklung der Berechnung schlanker Druckstützen	65
3.3	Theoretische Berechnungsverfahren.....	69
3.3.1	Grundlagen.....	69
3.3.2	Verfahren von Angervo	71
3.3.2.1	Allgemeines.....	71
3.3.2.2	Linear-elastische Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung.....	72
3.3.2.3	Nichtlineare Druckspannungs-Dehnungs-Beziehung	76

3.3.3	Verfahren auf Grundlage der Differenzialgleichung.....	80
3.3.3.1	Lewicki und Kukulski & Lugez.....	80
3.3.3.2	Mann und Leicher	82
3.3.3.3	Jäger	84
3.3.4	Verfahren auf Grundlage des Ansatzes der Wandverkrümmung.....	87
3.3.4.1	Haller und Kirtschig.....	87
3.3.4.2	Kordina & Quast und Bastgen	90
3.3.4.3	Führer	92
3.3.4.4	Furler und Schwartz.....	93
3.3.4.5	Graubner	95
3.3.5	Gegenüberstellung der theoretischen Berechnungsverfahren	98
3.4	Normative Bemessungsverfahren	103
3.4.1	Grundlagen	103
3.4.2	Bemessung unbewehrter Betonwände.....	105
3.4.2.1	Deutsche Norm DIN 1045-1	105
3.4.2.2	Europäische Norm Eurocode 2	106
3.4.2.3	Amerikanische Norm ACI 318	106
3.4.2.4	Kanadische Norm CSA A 23-3.....	108
3.4.2.5	Britische Norm BS 8110-1.....	109
3.4.2.6	Australische Norm AS 3600	109
3.4.3	Bemessung unbewehrter Mauerwerkswände	109
3.4.3.1	Deutsche Normen DIN 1053-1 und DIN 1053-100.....	109
3.4.3.2	Europäische Norm Eurocode 6	113
3.4.3.3	Amerikanische Norm ACI 530	114
3.4.3.4	Kanadische Norm CSA S 304-1	115
3.4.3.5	Britische Norm BS 5628-1.....	116
3.4.3.6	Australische Norm AS 3700	117
3.4.4	Gegenüberstellung der normativen Bemessungsverfahren	118
3.5	Zusammenfassung	121

4	NICHTLINEARES BERECHNUNGSMODELL FÜR DIE WANDTRAGFÄHIGKEIT	123
4.1	Einführung.....	123
4.2	Berechnung der Querschnittstragfähigkeit.....	125
4.2.1	Grundlagen.....	125
4.2.2	Linear-elastisches und starr-plastisches Werkstoffverhalten.....	127
4.2.2.1	Allgemeines.....	127
4.2.2.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten	128
4.2.2.3	Starr-plastisches Werkstoffverhalten	131
4.2.3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	133
4.2.3.1	Allgemeines.....	133
4.2.3.2	Analytische Berechnung der Querschnittstragfähigkeit.....	136
4.2.3.3	Iterative Berechnung der Querschnittstragfähigkeit.....	139
4.3	Berechnung der Biegesteifigkeit	144
4.3.1	Grundlagen.....	144
4.3.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten.....	146
4.3.2.1	Zusammenhang von Biegemoment und Querschnittskrümmung	146
4.3.2.2	Effektive Biegesteifigkeit.....	151
4.3.3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	153
4.3.3.1	Zusammenhang von Biegemoment und Querschnittskrümmung	153
4.3.3.2	Effektive Biegesteifigkeit.....	157
4.4	Berechnung der Systemtragfähigkeit.....	159
4.4.1	Grundlagen.....	159
4.4.2	Linear-elastisches Werkstoffverhalten.....	161
4.4.2.1	Allgemeines.....	161
4.4.2.2	Druckversagen der ungerissenen Wand	164
4.4.2.3	Druckversagen der gerissenen Wand	165
4.4.2.4	Stabilitätsversagen der gerissenen Wand	167
4.4.2.5	Stabilitätsversagen beim Aufreißen der Wand.....	168

4.4.2.6	Analyse der Systemtragfähigkeit	169
4.4.2.7	Sonderfall der Elastizitätstheorie für Druckglieder aus Stahl	172
4.4.3	Nichtlineares Werkstoffverhalten	175
4.4.3.1	Allgemeines	175
4.4.3.2	Iterative Berechnung der Systemtragfähigkeit	175
4.4.3.3	Analyse der Systemtragfähigkeit	179
4.5	Zusammenfassung	185
5	KONSISTENTES BEMESSUNGSKONZEPT FÜR SCHLANKE WÄNDE	187
5.1	Einführung	187
5.2	Bemessung nach der deutschen und europäischen Normung	188
5.2.1	Grundlagen	188
5.2.2	Semiprobabilistisches Teilsicherheitskonzept	189
5.2.3	Bemessungswerte der Werkstoffeigenschaften	190
5.2.4	Idealisierung des Tragwerkes	194
5.2.5	Besonderheiten bei Mauerwerk aus großformatigen Steinen	197
5.2.5.1	Allgemeines	197
5.2.5.2	Einachsig lastabtragende Mauerwerkswände	198
5.2.5.3	Zweiachsig lastabtragende Mauerwerkswände	198
5.3	Bemessung mit wirklichkeitsnahen Werkstoffgesetzen	204
5.3.1	Grundlagen	204
5.3.2	Approximation der Querschnittstragfähigkeit	205
5.3.2.1	Allgemeines	205
5.3.2.2	Approximation mit expliziter Fallunterscheidung des ungerissenen und gerissenen Querschnittes	206
5.3.2.3	Approximation ohne explizite Fallunterscheidung des ungerissenen und gerissenen Querschnittes	207

5.3.3	Approximation der Systemtragfähigkeit.....	210
5.3.3.1	Allgemeines.....	210
5.3.3.2	Systemtragfähigkeit bei Annahme einer vollständig gerissenen Wand.....	211
5.3.3.3	Berücksichtigung kleiner Lastausmitten	213
5.3.3.4	Berücksichtigung eines duktilen Druckversagens.....	215
5.3.3.5	Berücksichtigung der Biegezugfestigkeit für große Lastausmitten und Schlankheiten	217
5.3.3.6	Vergleich der Approximationsgleichungen mit der numerischen Lösung.....	218
5.3.4	Anwendung der Approximationsgleichungen zur Bemessung.....	225
5.3.4.1	Allgemeines.....	225
5.3.4.2	Bemessungswert der Querschnittstragfähigkeit	225
5.3.4.3	Bemessungswert der Systemtragfähigkeit.....	227
5.3.4.4	Vergleich mit der deutschen und europäischen Normung	228
5.4	Verifikation des Bemessungskonzeptes für Mauerwerk	232
5.4.1	Grundlagen.....	232
5.4.2	Verifikation der Querschnittstragfähigkeit	233
5.4.3	Verifikation der Systemtragfähigkeit.....	234
5.5	Vereinfachte Bemessung mit wirklichkeitsnahen Werkstoffgesetzen.....	238
5.6	Zusammenfassung.....	240
6	RESÜMEE UND AUSBLICK.....	243
	LITERATURVERZEICHNIS.....	247
	ANHANG A.....	A-1
	ANHANG B.....	A-6
	ANHANG C.....	A-15