

# **Schubtragverhalten von Mauerwerk aus großformatigen Steinen**

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

**DISSERTATION**

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Eric Simon**  
aus Darmstadt

D 17

Darmstadt 2002

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau  
Alexanderstraße 5  
64283 Darmstadt

Simon, Eric  
Schubtragverhalten von Mauerwerk  
aus großformatigen Steinen

1. Auflage Darmstadt, Eigenverlag, Heft 4

ISBN

Dr.-Ing. Eric Simon

Geboren 1970 in Darmstadt. Von 1990 bis 1996 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt. Von 1996 bis 1997 Tragwerksplaner im Ingenieurbüro Mann & Bernhardt in Darmstadt. Von 1997 bis 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 1997 bis 2002 freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König, Heunisch und Partner in Frankfurt am Main. Seit 1998 Partner der Ingenieursozietät Bau in Wiesbaden. Seit 2002 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Cischek in Heidelberg.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1997 bis 2002 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Ein Großteil der Arbeit entstand im Rahmen eines von der Forschungsgemeinschaft Kalk-Sand e.V. geförderten Forschungsvorhabens wofür ich mich an dieser Stelle sehr herzlich bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die vielfältigen Anregungen und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Walther Mann danke ich ganz besonders für die Übernahme des Korreferates und die damit verbundene Mühe.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Massivbau danke ich für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit und für die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion.

Bedanken möchte ich mich auch bei den vielen Studenten, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend gilt hier mein besonderer Dank den Herren Dipl.-Ing. Alexander Fischer, Dipl.-Ing. Christian Gies und Dipl.-Ing. Karl Thöne.

Den Herren Dr.-Ing. R. Cordes, Dr.-Ing. P. Langer und Dipl.-Ing. G. Meyer danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen und insbesondere für die Bereitstellung von Versuchsdaten.

Für das kritische Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich ganz besonders bei Frau Dipl.-Ing. Ulrike Betz und Herrn Dr.-Ing. Michael Cischek.

Meinen Eltern Brigitte und Siegfried Simon danke ich sehr für die wichtige Unterstützung die sie mir in all den Jahren zuteil werden ließen.

Abschließend bedanke ich mich ganz besonders herzlich bei meiner Freundin Ulrike Betz für ihre Bereitschaft zur fachlichen Diskussion, ihr Verständnis und ihre Geduld an vielen Tagen, wodurch die vorliegende Arbeit erst möglich geworden ist.

Referent: Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Mann

Tag der Einreichung: 21.06.2002

Tag der mündlichen Prüfung: 12.12.2002



## Inhaltsverzeichnis

Symbole

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Entwicklungen im Mauerwerksbau	1
1.2	Veranlassung und Zielsetzung	3
1.3	Übersicht	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Beanspruchung und des Tragverhaltens von Mauerwerk</b>	<b>6</b>
2.1	Vorbemerkungen	6
2.2	Tragverhalten unter Druckbeanspruchung	6
2.2.1	Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	6
2.2.2	Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	13
2.2.3	Last-Verformungs-Verhalten	13
2.3	Tragverhalten unter Zug- und Biegezugbeanspruchung	19
2.3.1	Zugbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	19
2.3.2	Zugbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	20
2.3.3	Biegezugbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge	22
2.3.4	Biegezugbeanspruchung parallel zur Lagerfuge	23
2.4	Tragverhalten unter Schubbeanspruchung	26
2.4.1	Allgemeines	26
2.4.2	Versagensformen unter zweiachsiger Beanspruchung	27
<b>3</b>	<b>Modelle für das Schubtragverhalten von Mauerwerkscheiben</b>	<b>28</b>
3.1	Vorbemerkungen	28
3.2	Versagenskriterien und Berechnungsmodelle	28
3.3	Schubbruchtheorie nach Mann/Müller	39
3.3.1	Vorbemerkungen	39
3.3.2	Gleichgewichtszustände am Einzelstein	40
3.3.3	Gleichgewichtsbetrachtungen nach Mann/Müller	42
3.3.4	Versagenskriterien nach Mann/Müller	44

3.4	Schubbruchtheorie nach Schneider/Wiegand/Jucht	47
3.4.1	Vorbemerkungen	47
3.4.2	Spannungsverläufe auf Grundlage von FE-Untersuchungen	49
3.4.2.1	Vorbemerkungen	49
3.4.2.2	Zusatznormalspannung $\Delta\sigma_y$ bei reiner Schubbeanspruchung	50
3.4.2.3	Normalspannung $\sigma_y$ infolge reiner Normalkraftbeanspruchung	53
3.4.2.4	Spannungsverteilung bei kombinierter Verteilung	55
3.4.2.5	Vereinfachung der Spannungsverläufe	56
3.5	Schubbemessung nach DIN 1053-1	58
3.5.1	Vorbemerkungen	58
3.5.2	Bemessungskonzept	58
3.6	Schubbemessung nach EC 6	60
3.6.1	Vorbemerkungen	60
3.6.2	Bemessungskonzept	61
3.7	Zulassungen für großformatige Steine	63
3.7.1	Vorbemerkungen	63
3.7.2	Bemessungskonzept	63
<b>4</b>	<b>Erweiterung bestehender Schubbruchtheorien auf Mauerwerk mit variablem Überbindemaß</b>	<b>65</b>
4.1	Vorbemerkungen	65
4.2	Erweiterung der Theorie von Mann/Müller	66
4.2.1	Vorbemerkungen	66
4.2.2	Vereinfachter Gleichgewichtszustand für ein veränderliches Überbindemaß und ungerissene Lagerfuge	66
4.3	Erweiterung der Ansätze von Schneider/Wiegand/Jucht	68
4.3.1	Vorbemerkungen	68
4.3.2	Mathematische Formulierung des Spannungsverlaufs infolge Querkraftbeanspruchung	68
4.3.3	Mathematische Formulierung des Spannungsverlaufs infolge Normalkraftbeanspruchung	73
4.3.4	Lokale Risslänge $r$ am Einzelstein	78

---

4.3.5	Gleichgewichtszustand für ein variables Überbindemaß und teilweise gerissener Lagerfuge	83
4.3.6	Vereinfachter Gleichgewichtszustand für ein variables Überbindemaß und teilweise gerissener Lagerfuge	85
4.3.7	Spannungszustand am Einzelstein	86
4.4	Zusammenfassung der erweiterten Schubbruchtheorien	88
<b>5</b>	<b>Innerer Spannungszustand im Einzelstein unter kombinierter Beanspruchung</b>	<b>89</b>
5.1	Vorbemerkungen	89
5.2	Scheibentheorie und AIRYsche Spannungsfunktion	89
5.3	Mathematische Formulierung der Spannungsverhältnisse im Mauerstein	96
5.3.1	Prinzipielle Vorgehensweise	96
5.3.2	Herleitung der Spannungsfunktionen	99
5.4	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	116
5.4.1	Vorbemerkungen	116
5.4.2	Spannungsverläufe an den Bereichsrändern	116
5.4.3	Hauptzugspannungen im Steininneren	122
5.4.4	Ort der maximalen Hauptzugspannung im Steininneren	129
<b>6</b>	<b>Bemessungskonzept für die Schubtragfähigkeit von Mauerwerk aus großformatigen Steinen</b>	<b>131</b>
6.1	Herleitung von Versagensbedingungen	131
6.1.1	Vorbemerkungen	131
6.1.2	Lokales Klaffen der Lagerfugen	132
6.1.3	Versagen infolge Überschreiten des Reibwiderstandes	134
6.1.4	Versagen infolge Überschreiten der Steinzugfestigkeit	136
6.1.5	Versagen infolge Überschreiten der Druckfestigkeit	140
6.1.6	Zusammenfassung	141
6.2	Bemessungsrelevante Randbedingungen	142
6.2.1	Vorbemerkungen und grundlegende Annahmen	142
6.2.2	Berücksichtigung des Versagens infolge Klaffen der Lagerfugen	142
6.2.3	Praktikabler Bemessungsalgorithmus für das Versagen infolge Überschreiten des Reibwiderstandes	145
6.2.4	Berücksichtigung des Versagens infolge Überschreiten der Druckfestigkeit	149

6.3	Verifikation der Versagenskriterien anhand von Versuchsergebnissen an geschosshohen Mauerwerkswänden und an Wandelementen	150
6.3.1	Vorbemerkungen	150
6.3.2	Darstellung des Versuchsaufbauten	151
6.3.3	Darstellung der Versuchsergebnisse	152
6.3.4	Gegenüberstellung mit den Bemessungsansätzen	155
6.3.5	Zusammenfassung	164
6.4	Erweiterung des Bemessungskonzeptes für Mauerwerk mit vermörtelten Stoßfugen	165
6.4.1	Vorbemerkungen	165
6.4.2	Tragverhalten bei vollständiger Tragfähigkeit der Stoßfuge	166
6.4.3	Tragverhalten bei Überschreitung der Haftscherfestigkeit in der Stoßfuge	167
<b>7</b>	<b>Bemessungsvorschlag für künftige normative Regelungen</b>	<b>174</b>
7.1	Vorbemerkungen	174
7.2	Sicherheitskonzepte	175
7.2.1	Vorbemerkungen	175
7.2.2	Auswirkungen unterschiedlicher Sicherheitskonzepte auf die Schubtragfähigkeit von Mauerwerk	178
7.3	Bemessungsvorschlag	180
7.3.1	Vorbemerkungen	180
7.3.2	Bemessungsansatz für das Reibungsversagen	181
7.3.3	Bemessungsansätze für das Steinzugversagen	182
7.3.4	Bemessungsansatz für das Druckversagen	183
7.3.5	Zusammenfassung	184
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>185</b>
	<b>Literatur</b>	<b>L1 – L11</b>
	<b>Anhang</b>	<b>A1 – A13</b>