

# **Reliability of Unreinforced Masonry Bracing Walls**

Probabilistic Approach  
and Optimized Target Values

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

DISSERTATION

von

**Dipl.-Ing. Eric Brehm**

aus  
Seeheim-Jugenheim / Hessen

**D 17**

**Darmstadt 2011**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Marc A. Maes, PhD

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau  
Petersenstrasse 12  
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Brehm, Eric:

Reliability of Unreinforced Masonry Bracing Walls  
Probabilistic Approach and Optimized Target Values

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 24

ISBN 978-3-942886-02-4

Dr.-Ing. Eric Brehm

Geboren 1981 in Seeheim-Jugenheim. Von 2001 bis 2007 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt und der University of Calgary, Alberta, Kanada. Von 2007 bis Anfang 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main und Ingenieurbüro Brehm Bauconsult GmbH in Bensheim tätig. Seit 2011 angestellt als „Experte Bautechnik“ bei der TÜV SÜD Industrieservice GmbH in Mörfelden-Walldorf.

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten. Sie haben mir viel beigebracht.

Herrn Prof. Marc A. Maes, PhD, möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Meinen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche und angenehme Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Meinen Zimmerkollegen Herrn Dr.-Ing. Frank Ritter, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Torsten Mielecke und Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske danke ich für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit. Frau Renate Mohr danke ich für die vielfache Unterstützung im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut. Diesen Personen danke ich außerdem besonders für die aus unserer gemeinsamen Zeit am Institut erwachsene Freundschaft.

Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Simon Glowienka, der mich bei der Anfertigung der Arbeit in besonderem Maße unterstützt hat und bereits als Betreuer meiner Diplomarbeit Begeisterung für die Zuverlässigkeitstheorie in mir geweckt hat.

Ein weiterer, ganz besonderer Dank geht an Prof. Shelley Lissel, PhD, für die Beratung bei der Erstellung und Durchsicht meiner Arbeit.

Der größte Dank gilt meiner lieben Frau Elisabeth und meinen Eltern, Dipl.-Ing. Wolfgang und Uta Brehm. Ohne Euch wäre dies alles nicht möglich gewesen.

Darmstadt, September 2011

Eric Brehm

## Zusammenfassung

Aussteifungsscheiben sind integrale Bauteile in Mauerwerksgebäuden, werden in der Bemessungspraxis jedoch selten nachgewiesen. Dies liegt an einer in DIN 1053-1 enthaltenen Regelung, die es erlaubt den Aussteifungsnachweis auszulassen. Diese Regelung basiert jedoch auf gänzlich anderen Bauweisen als sie aktuell im Stand der Technik sind. Des Weiteren sind die Tragfähigkeiten auf Basis aktuellen Bemessungsnormen an den Vorgängernormen und Erfahrungswerten kalibriert worden. Daher stellt sich die Frage nach dem tatsächlich vorhandenen Zuverlässigkeitsniveau dieser Wandscheiben.

Diese Arbeit enthält eine systematische Analyse der vorhandenen Zuverlässigkeit von Aussteifungsscheiben in üblichen Mauerwerksgebäuden. Dabei werden verschiedene analytische Modelle zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von Aussteifungsscheiben untersucht und deren Modellunsicherheit bestimmt über eine Auswertung von Versuchsdaten. Ziel ist die Identifikation des realistischsten Modells.

Ein vollständiges stochastisches Modell wird anschließend aufgestellt und die vorhandene Zuverlässigkeit einer Vielzahl von Wandscheiben bestimmt. Dabei wird zwischen rechnerischer und „eigentlicher“ Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades der Wandscheiben unterschieden.

Abschließend wird ein volkswirtschaftlich optimaler Wert der Zuverlässigkeit mit der Methode der voll-probabilistischen Optimierung bestimmt, um so einen Vergleichswert für die vorhandene Zuverlässigkeit zu erhalten. Eine wirtschaftliche Ausnutzung des Mauerwerks bei Bemessung nach DIN 1053-1 kann dabei nachgewiesen werden.

## Abstract

Bracing walls are essential members in typical masonry structures. However, design checks are only performed rarely in Germany. The reason for this is a paragraph in the German design code DIN 1053-1 which allows for neglect of this design check. This paragraph is based on different construction methods than they are the current state of the art. Additionally, the capacities according to current design codes have been calibrated on basis of previous design codes and experience. Consequently, the provided level of reliability remains unknown.

In this thesis, a systematic analysis of the provided level of reliability is conducted. Analytical models for the prediction of the shear capacity of the walls are analyzed and assessed with test data to identify the most realistic model. A complete stochastic model is set up and the reliability of typical bracing walls is determined. It is differed between the theoretical level of reliability and the “actual” level of reliability taking into account the realistic utilization of the walls.

Finally, an optimal target value for the reliability is derived by full-probabilistic optimization to be able to assess the previously determined provided reliabilities. An efficient use of masonry in the design according to DIN 1053-1 can be verified.

---

**Table of Contents**

|  |          |
|--|----------|
| <b>Notation and Abbreviations .....</b>                          | <b>V</b> |
| <b>1 Introduction .....</b>                                      | <b>1</b> |
| 1.1 Motivation and Goal .....                                    | 1        |
| 1.2 Thesis Organization .....                                    | 3        |
| <b>2 Basics of Reliability Analysis.....</b>                     | <b>5</b> |
| 2.1 General .....  | 5        |
| 2.2 Introduction.....  | 5        |
| 2.3 Stochastic Modelling of Random Variables .....               | 6        |
| 2.3.1 Mutual Distributions in Typical Engineering Problems ..... | 6        |
| 2.3.2 Stochastic Moments .....                                   | 7        |
| 2.4 Parameter Estimation .....                                   | 9        |
| 2.4.1 General .....  | 9        |
| 2.4.2 Method of Moments .....                                    | 9        |
| 2.4.3 Maximum Likelihood.....                                    | 10       |
| 2.4.4 Bayes' Theorem .....                                       | 12       |
| 2.5 Structural Reliability .....                                 | 16       |
| 2.5.1 General Idea and History of Reliability Analysis .....     | 16       |
| 2.5.2 Limit States and Basic Variables .....                     | 18       |
| 2.5.3 Methods of Analysis.....                                   | 22       |
| 2.5.3.1 General.....   | 22       |
| 2.5.3.2 Mathematical Exact Approaches .....                      | 22       |
| 2.5.3.3 Simplified Approaches.....                               | 24       |
| 2.6 Target Reliability and Risk-Based Optimization .....         | 25       |
| 2.6.1 General .....  | 25       |
| 2.6.2 Optimization of the Target Reliability .....               | 25       |
| 2.6.3 Societal Risk Acceptance and Life Quality Index .....      | 29       |
| 2.6.4 Classification of Failure Consequences .....               | 31       |
| 2.6.5 Target Reliability in the Literature .....                 | 32       |
| 2.7 Safety Concepts in Structural Design .....                   | 33       |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.8      | Summary .....  | 34        |
| <b>3</b> | <b>Loads on Masonry Shear Walls .....</b>                              | <b>37</b> |
| 3.1      | Introduction .....   | 37        |
| 3.2      | Methods for the Stochastic Modelling of Load Actions .....             | 37        |
| 3.3      | Dead Load .....  | 41        |
| 3.4      | Live Load .....  | 44        |
| 3.5      | Wind Load.....   | 48        |
| 3.6      | Model Uncertainty in the Determination of the Load Effects .....       | 52        |
| 3.7      | Summary .....  | 54        |
| <b>4</b> | <b>Load-Carrying Behaviour and Material Properties of Masonry.....</b> | <b>55</b> |
| 4.1      | General .....  | 55        |
| 4.2      | Typology .....   | 55        |
| 4.3      | Load-Carrying Capacity of Masonry Subjected to Axial Compression ..... | 57        |
| 4.4      | Load-Carrying Capacity of Masonry Subjected to In-Plane Loads .....    | 60        |
| 4.4.1    | General .....  | 60        |
| 4.4.2    | Load-Carrying Behaviour and Failure Modes.....                         | 60        |
| 4.5      | Material Properties .....  | 63        |
| 4.5.1    | General .....  | 63        |
| 4.5.2    | Compressive Strength of the Unit .....                                 | 64        |
| 4.5.3    | Compressive Strength of Mortar .....                                   | 66        |
| 4.5.4    | Compressive Strength of Masonry .....                                  | 67        |
| 4.5.4.1  | General .....  | 67        |
| 4.5.4.2  | Experimental Determination of the Compressive Strength of Masonry      | 67        |
| 4.5.4.3  | Analytical Prediction of the Compressive Strength of Masonry .....     | 68        |
| 4.5.5    | Tensile Strength of Units.....   | 72        |
| 4.5.6    | Cohesion and Friction Coefficient .....                                | 76        |
| 4.6      | Summary .....  | 78        |
| <b>5</b> | <b>Prediction of the Load-Carrying Capacity .....</b>                  | <b>81</b> |
| 5.1      | General .....  | 81        |
| 5.2      | Notation.....  | 82        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.3      | Classical Beam Theory .....                                      | 82         |
| 5.3.1    | Pre-Assumptions and Structural System .....                      | 82         |
| 5.3.2    | Tip over of the Entire Wall .....                                | 84         |
| 5.3.3    | Flexural Failure .....   | 84         |
| 5.3.4    | Shear Capacity.....  | 85         |
| 5.3.4.1  | Historical development .....                                     | 85         |
| 5.3.4.2  | Shear Model according to <i>Mann &amp; Müller (1973)</i> .....   | 88         |
| 5.3.4.3  | Shear Model according to <i>Jäger &amp; Schöps (2004)</i> .....  | 91         |
| 5.3.4.4  | Shear Model according to <i>Kranzler (2008)</i> .....            | 94         |
| 5.4      | Plastic Limit Analysis .....                                     | 95         |
| 5.5      | Design models.....   | 97         |
| 5.5.1    | Notation .....   | 97         |
| 5.5.2    | Design Model according to DIN 1053-1 and DIN 1053-100.....       | 97         |
| 5.5.3    | Design Model according to DIN EN 1996-1-1/NA .....               | 103        |
| 5.5.4    | Comparison of DIN 1053-1, -100 and DIN EN 1996-1-1/NA .....      | 107        |
| 5.5.5    | Design Model according to SIA 866.....                           | 112        |
| 5.6      | Assessment and Model Uncertainties .....                         | 113        |
| 5.6.1    | General .....  | 113        |
| 5.6.2    | Test Data .....  | 113        |
| 5.6.3    | Comparison and Assessment.....                                   | 115        |
| 5.6.4    | Determination of Model Uncertainties.....                        | 119        |
| 5.7      | Summary .....  | 121        |
| <b>6</b> | <b>Reliability of URM walls Subjected to In-Plane Shear.....</b> | <b>123</b> |
| 6.1      | Introduction.....  | 123        |
| 6.2      | General.....   | 123        |
| 6.3      | Structural System .....  | 125        |
| 6.4      | Masonry Members to be Examined .....                             | 126        |
| 6.5      | Design Check .....   | 127        |
| 6.6      | Reliability Analysis.....  | 128        |
| 6.6.1    | General .....  | 128        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.6.2    | Limit State Function and Probability of Failure.....                       | 128        |
| 6.6.3    | Stochastic Model .....   | 131        |
| 6.6.4    | Method of Analysis .....   | 132        |
| 6.7      | Theoretical Reliability of Masonry Shear Walls Subjected to Wind Load..... | 133        |
| 6.7.1    | General .....  | 133        |
| 6.7.2    | DIN 1053-1.....  | 133        |
| 6.7.3    | DIN 1053-100.....  | 144        |
| 6.7.4    | DIN EN 1996-1-1 and National Annex.....                                    | 153        |
| 6.8      | Assessment.....  | 158        |
| 6.8.1    | General .....  | 158        |
| 6.8.2    | Theoretical Level of Reliability .....                                     | 158        |
| 6.8.3    | Actual Level of Reliability .....  | 162        |
| 6.9      | Summary .....  | 167        |
| <b>7</b> | <b>Optimization of the Target Reliability .....</b>                        | <b>169</b> |
| 7.1      | Introduction.....  | 169        |
| 7.2      | Modelling.....   | 170        |
| 7.2.1    | General .....  | 170        |
| 7.2.2    | Modelling of the Benefit .....   | 171        |
| 7.2.3    | Modelling of the Structural Cost.....                                      | 173        |
| 7.2.4    | Classification of Failure Consequences .....                               | 174        |
| 7.2.5    | Targeting Function and Procedure .....                                     | 178        |
| 7.3      | Results of the Optimization.....   | 179        |
| 7.4      | Conclusion .....   | 183        |
| 7.5      | Summary .....  | 184        |
| <b>8</b> | <b>Summary and Outlook.....</b>  | <b>185</b> |
| <b>9</b> | <b>References .....</b>  | <b>191</b> |
|          | <b>Appendix.....</b>   | <b>201</b> |