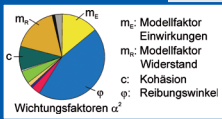
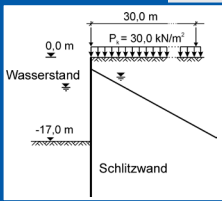
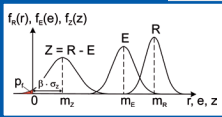




Berichte des Instituts für Massivbau



Judith Böckmann

Probabilistische Analyse der Zuverlässigkeit von Ufereinfassungen aus Stahlbeton-Schlitzwänden

## **Berichte**

des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover  
Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover – Institut für Massivbau  
Heft 8, Mai 2012

Fraunhofer IRB Verlag

## **Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Massivbau  
Appelstraße 9 A  
30167 Hannover

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2012 by Univ.-Prof. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Massivbau  
ISBN (Print): 978-3-8167-8700-6  
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0260-3

## **Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 60, 70504 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Telefax 0711 970-2508  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
URL <http://www.baufachinformation.de>

## Kurzfassung

In den letzten Jahren wurde ein einheitliches Europäisches Regelwerk, die Euronormen, für das Bauwesen unter Leitung des Europäischen Komitees für Normung (CEN) erarbeitet. Den zurzeit gültigen Bemessungsnormen liegt zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit von Bauwerken das semiprobabilistische Sicherheitskonzept zugrunde, das durch Teilsicherheitsbeiwerte gekennzeichnet ist. Diese ermöglichen eine Berücksichtigung der zufallsbedingten Variation der Materialparameter und Einwirkungen. Für die Bemessung von Ufereinfassungen werden sie bisher aus Erfahrung abgeleitet. Eine probabilistische Kalibrierung der Teilsicherheitsbeiwerte unter Berücksichtigung ihrer Streuung wurde für Ufereinfassungen in den gültigen deutschen Normen bisher nicht durchgeführt. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Ufereinfassungen ist jedoch eine Untersuchung auf probabilistischer Basis erforderlich. In der Zuverlässigkeit spiegelt sich die Qualität einer baulichen Anlage wider.

Die theoretischen Ansätze zur probabilistischen Analyse von Bauwerken sind grundsätzlich gut entwickelt, eine Umsetzung auf praxisgerechte Konstruktionen ist aber insbesondere für geotechnische Fragestellungen schwierig. Aus diesem Grund beruhen die derzeitigen Berechnungsvorschriften und Bemessungsregeln im Grundbau allgemein und im Hafenanbau im besonderen auf jahrelanger Erfahrung.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der probabilistischen Analyse von Ufereinfassungen. Das Vorgehen wird allgemein gültig vorgestellt und am Beispiel einer Stahlbeton-Schlitzwand präsentiert. Hierfür werden die Streuungen der Variablen, die in die probabilistische Analyse eingehen, auf Grundlage einer Literaturrecherche abgeschätzt. Anhand der Widerstandsmodelle des Biege- und Querkraftversagens werden die probabilistischen Analysen am Beispiel einer Stahlbeton-Schlitzwand durchgeführt. Die Beschreibung des Grenzzustands der Biegetragfähigkeit in der probabilistischen Analyse wird für die Untersuchung der Schlitzwände um einen Normalkraftanteil erweitert, da diese Konstruktion zwar vorwiegend auf Biegung, aber gleichzeitig auch durch Normalkräfte beansprucht wird, z. B. durch am Wandkopf einwirkende Kranlasten. Anhand der berechneten Zuverlässigkeit wird die Versagenswahrscheinlichkeit für den Grenzzustand bestimmt und mit Zielwerten aus der Literatur verglichen.

Die Zuverlässigkeitsmethoden First und Second Order Reliability Method ermöglichen eine Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten, die auf statistisch abgesicherten Methoden basieren. Hierfür werden der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  sowie die Wichtungsfaktoren der Einwirkungen  $\alpha_E$  und Widerstände  $\alpha_R$  der wesentlichen Einflussgrößen benötigt. Unter Ansatz der stochastischen Eigenschaften der eingehenden Basisvariablen ist eine erste probabilistische Abschätzung der Teilsicherheitsbeiwerte und ein Vergleich mit den normativen Ansätzen möglich.



## Abstract

During the last years uniform European standards based on semi-probabilistic design approaches have been developed under the leadership of the European Committee for Standardization (CEN). The partial safety factors may be based on stochastic distributions of strength parameters and loads. For the dimensioning of waterfront structures the specifications for calculation and design regulations have been based on the results of years of experience in foundation and harbor engineering. Up to now the partial factors in actual German standards are not calibrated with respect to probabilistic methods considering the stochastic characteristics of the basic variables. Analysis based on probability theory are required for the assessment of reliability and safety of waterfront structures. The reliability reflects the quality of the structure.

The methods of full probabilistic approaches are basically well developed for the design of structures, but full probabilistic design is difficult especially for geotechnical design processes. For this reason probabilistic verifications of the partial safety factors for the dimensioning of waterfront structures are rare and the partial safety factors are based on experiences.

This study presents full probabilistic analysis of waterfront structures. The probabilistic approach is described in general. Probabilistic analysis of diaphragm wall constructions show the application. Parameters are considered to be stochastic for the calculations. The statistical distributions of the parameters are estimated by literature research. The resistance models of the bending and shearing capacity are investigated for diaphragm wall constructions. Those constructions are primarily loaded by bending, but normal forces affect the structure simultaneously, for example concentrated vertical crane loads acting on the top of the diaphragm wall construction. Therefore, the limit state of the bending capacity is extended by a term regarding normal forces. The safety requirements are presented by safety levels that are expressed in reliability indices. The reliability indices resulting from probabilistic analysis are compared with target values published in different codes and recommendations. The probabilistic approach to safety is based on the principle that a design must satisfy a defined maximum probability of failure, quantified by reliability indices.

Reliability methods, First and Second Order Reliability Method, enable the derivation of partial safety factors based on probabilistic verifications. For the calculation of partial safety factors the reliability index  $\beta$ , the sensitivity factors for actions  $\alpha_E$  and for resistances  $\alpha_R$  are required. In summary, a first probabilistic assessment of the partial safety factors considering the stochastic characteristics of basic variables and a comparison with standard approaches is possible.

---

Stichworte:

Tragwerkszuverlässigkeit, Probabilistische Analyse, Versagenswahrscheinlichkeit, Widerstandsmodell, Ufereinfassung, Schlitzwand

Keywords:

Reliability of the structure, Probabilistic analysis, Probability of failure, Resistance model, Waterfront structure, Diaphragm wall construction

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover. Sie wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie 2011 als Dissertation angenommen und genehmigt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grünberg für die Unterstützung, die Anregungen und wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit während meiner Zeit am Institut.

Über das Interesse und die Aufgeschlossenheit für das Thema meiner Arbeit von Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus habe ich mich gefreut. Ich danke für die sorgfältige Durchsicht und die Übernahme des Korreferats.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Hothan für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission und den damit verbundenen Aufwand.

Weiterhin danke ich allen Kollegen und Freunden am Institut und der Fakultät, für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung während meiner Arbeit am Institut für Massivbau.

Meinen Eltern und meiner ganzen Familie danke ich von Herzen für die liebevolle Unterstützung und Motivation in all den Jahren meiner Ausbildung sowie meinem Mann Oliver für sein Verständnis und seine Geduld, ohne die diese Arbeit wohl nicht entstanden wären.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung, Stand der Forschung .....	1
1.2	Motivation .....	2
1.3	Probabilistische Methoden und Modellbildung.....	3
1.4	Gliederung .....	5
<b>2</b>	<b>Konstruktionstypen für Ufereinfassungen.....</b>	<b>7</b>
2.1	Funktionen von Ufereinfassungen .....	7
2.2	Einflussfaktoren für die Wahl von Kaimauerkonstruktionen.....	8
2.3	Konstruktionstypen für Kaimauern.....	10
2.4	Kaimauern in deutschen Häfen .....	21
2.4.1	Umschlagsentwicklung an den Hafenstandorten.....	21
2.4.2	Verwendete Kaimauerkonstruktionen in deutschen Häfen .....	23
2.5	Konstruktion und Ausführung von Stahlbeton-Schlitzwänden .....	27
<b>3</b>	<b>Zuverlässigkeit von Ufereinfassungen .....</b>	<b>30</b>
3.1	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie .....	32
3.2	Lösungsverfahren in der Zuverlässigkeitstheorie .....	35
3.3	Herleitung von Sicherheitselementen und Bewertung der Zuverlässigkeit.....	39
3.3.1	Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten nach FORM .....	40
3.3.2	Zielzuverlässigkeiten .....	43
3.4	Sicherheitsformate in der Normung .....	50
<b>4</b>	<b>Probabilistische Beschreibung der Einwirkungen .....</b>	<b>57</b>
4.1	Ständige Einwirkungen .....	57

4.1.1	Eigengewicht.....	57
4.1.2	Erddruck.....	59
4.1.2.1	Modellierung der Bodenparameter.....	63
4.1.2.2	Korrelation der Bodenparameter.....	67
4.1.3	Wasserdruck.....	74
4.1.3.1	Zeitlicher Verlauf der Pegelganglinie.....	74
4.1.3.2	Näherungsansatz zur Bestimmung des Wasserüberdrucks nach [EAU-05] .....	76
4.1.3.3	Beurteilung der säkularen Veränderung der Scheitelwasserstände für den Hamburger Hafen .....	78
4.1.3.4	Bestimmung der Verteilung und ihrer Parameter für die Wasser- standsdifferenz.....	80
4.1.3.5	Einflüsse von Grundwasserströmungen.....	89
4.1.3.6	Wellenbelastung .....	91
4.2	Veränderliche Einwirkungen .....	92
4.2.1	Nutzlasten / Erddruck infolge von Nutzlasten.....	92
4.2.2	Zusatzlasten.....	96
<b>5</b>	<b>Widerstandsmodelle .....</b>	<b>97</b>
5.1	Widerstandsmodell Biegung .....	97
5.1.1	Modellierung der Basisvariablen für den Grenzzustand Biegung.....	98
5.1.2	Grenzzustand der Biegetragfähigkeit unter gleichzeitiger Wirkung von Längskräften .....	104
5.1.2.1	Allgemeingültige Grenzzustandsgleichung für die Biegetragfähigkeit	111
5.2	Widerstandsmodell Querkraft.....	116
5.2.1	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit biegebewehrter Bauteile ohne Querkraftbewehrung .....	116
5.2.2	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit Querkraft- bewehrung - Nachweis Zugstrebe .....	118

5.2.3	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit Querkraftbewehrung - Nachweis Druckstrebe .....	119
5.2.4	Basisvariablen für die Grenzzustände der Querkrafttragfähigkeit.....	120
5.2.5	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit unter gleichzeitiger Wirkung von Längskräften .....	120
5.3	Widerstandsmodell Baugrund.....	121
<b>6</b>	<b>Modellbildung für eine Stahlbeton-Schlitzwand .....</b>	<b>123</b>
6.1	Gesamtmodell Tragwerk und Baugrund .....	124
6.2	Partialmodell Tragwerk mit Einwirkungen und Reaktionen des Baugrunds .....	128
6.3	Mechanisches Modell der Schlitzwand.....	137
6.4	Stochastisches Modell .....	144
6.4.1	Stochastisches Modell für die Biegetragfähigkeit .....	144
6.4.1.1	Maximales Moment im Feldbereich .....	144
6.4.1.2	Minimales Moment im Bereich der Einbindetiefe.....	151
6.4.1.3	Minimales Moment im Bereich der Verankerung .....	153
6.4.2	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit.....	153
6.4.2.1	Querkraftbeanspruchung im Bereich der Verankerung und im Feld bereich (Schnitt I-III) .....	153
6.4.2.2	Querkraftbeanspruchung im Einbindebereich der Schlitzwand (Schnitt IV) .....	155
6.4.3	Basisvariablen der Grenzzustandsgleichungen.....	156
<b>7</b>	<b>Probabilistische Analyse von Stahlbeton-Schlitzwänden .....</b>	<b>159</b>
7.1	Grenzzustand der Biegetragfähigkeit unter gelichzeitiger Wirkung von Längskräften .....	159
7.1.1	Wertung der Grenzzustandsgleichung für Biegung mit Normalkraft .....	160
7.1.2	Auswirkungen einer Variation der Parameter auf die Zuverlässigkeit... ..	163
7.1.3	Wichtung der Einflussgrößen.....	171

7.1.4	Berücksichtigung einer Druckbewehrung.....	177
7.1.5	Beanspruchung der Schlitzwand durch Kranlasten.....	179
7.1.6	Variation des angesetzten Erddrucks.....	182
7.2	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit .....	185
<b>8</b>	<b>Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten und Bewertung der Zuverlässigkeit.....</b>	<b>193</b>
8.1	Grenzzustand der Biegetragfähigkeit mit Berücksichtigung der Normalkraft .....	194
8.1.1	Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände .....	194
8.1.2	Auswirkungen der Variation der Parameter auf die Sicherheitselemente.....	203
8.1.3	Festlegung der Teilsicherheiten mit Zuverlässigkeitsmethoden des Levels III.....	208
8.2	Grenzzustand der Querkrafttragfähigkeit .....	209
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>216</b>
9.1	Zusammenfassung.....	216
9.2	Ausblick.....	222
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>225</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>239</b>