

Sicherheitskonzept für nichtlineare Traglastverfahren im Betonbau

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. Michael Six
aus Langen / Hessen

D 17

Darmstadt 2001

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Alexanderstrasse 5
64283 Darmstadt

Six, Michael:
Sicherheitskonzept für nichtlineare
Traglastverfahren im Betonbau

1. Auflage Darmstadt, Eigenverlag, Heft 3

ISBN 3-00-009788-0

Dr.-Ing. Michael Six

Geboren 1968 in Langen / Hessen. Von 1990 bis 1996 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt. Von 1996 bis 1997 Tragwerksplaner im Technischen Büro der Hochtief AG in Frankfurt am Main. Von 1997 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 1997 bis 2001 freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König, Heunisch und Partner in Frankfurt am Main. Seit 1998 Partner der Ingenieursozietät Bau in Wiesbaden. Seit 2002 Teamleiter Brückenbau im Technischen Büro München der Bilfinger Berger AG, Tragwerksplanung Ingenieurbau.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1997 bis 2001 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die vielfältigen Anregungen und das entgegengebrachte Vertrauen. Seine stete Bereitschaft zur Diskussion verbunden mit vielen Hinweisen und Ratschlägen waren mir eine wertvolle Hilfe.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. techn. h.c. Josef Eibl danke ich ganz besonders für die Übernahme des Korreferates und die damit verbundene Mühe.

Meinen Kollegen bin ich für das freundschaftliche Verhältnis dankbar, das meine Tätigkeit am Institut für Massivbau zu einer unvergesslichen Zeit werden ließ.

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei allen Studenten, die im Rahmen von Diplom- und Vertieferarbeiten zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Mein besonderer Dank gilt hier Frau Regine Schneider, Herrn Martin Bimschas, Herrn Guido Hausmann und Herrn Jochen Volz.

Meinen Eltern Carla und Paul Six bin ich sehr dankbar für die wichtige Unterstützung während des Studiums und das Korrekturlesen des Manuskripts. Meiner Schwester Martina Six danke ich, dass sie jederzeit ein offenes Ohr für mich hat.

Meiner Frau Angelika Six und meinen Kindern Jan Niklas und Emily Viktoria danke ich ganz besonders herzlich für ihr Verständnis und ihre Geduld, wodurch sie die vorliegende Arbeit ermöglichten.

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. techn. h.c. Josef Eibl
Tag der Einreichung:	20. Dezember 2001
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Februar 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise	4
2	Diskussion vorhandener Lösungskonzepte.....	5
2.1	Sicherheitsformate innerhalb des Teilsicherheitskonzepts	5
2.2	Lösungskonzept von <i>Eibl</i>	6
2.3	Lösungskonzept von <i>König et al.</i>	8
3	Grundlagen der Tragwerkszuverlässigkeit	11
3.1	Einführung	11
3.1.1	Vorbemerkung	11
3.1.2	Risiko, Sicherheit, Zuverlässigkeit – eine Begriffsdefinition	11
3.1.3	Historischer Überblick	13
3.2	Zufallsvariablen	15
3.2.1	Allgemeine Definitionen.....	15
3.2.2	Verteilungsfunktionen stetiger Zufallsvariablen.....	16
3.2.3	Zufallsvektoren	20
3.2.4	Zufallsfelder	25
3.2.5	Funktionen von Zufallsvariablen	26
3.3	Mathematische Formulierung des Zuverlässigkeitsproblems.....	29
3.3.1	Das R–S–Modell	29
3.3.2	Das verallgemeinerte Zuverlässigkeitsproblem	33
3.3.3	Besonderheiten der Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen.....	34
3.3.4	Klassifizierung der zuverlässigkeitstheoretischen Methoden	38
3.4	Probabilistische Näherungsverfahren	39
3.4.1	Die Momentenmethode.....	39
3.4.2	Zuverlässigkeitstheorie erster Ordnung	42
3.4.3	Zuverlässigkeitstheorie zweiter Ordnung	43
3.4.4	Antwortflächenverfahren	43
3.5	Probabilistisch exakte Verfahren	44
3.5.1	Numerische Integration.....	44
3.5.2	Die „direkte“ Monte Carlo Methode.....	44
3.5.3	Gewichtete Monte Carlo Simulation.....	46
3.5.4	Gewichtete Simulation mit adaptiven Stichprobenfunktionen	48
3.6	Stochastische Finite Elemente	50
3.7	Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept der Normen.....	51
3.7.1	Einleitung.....	51
3.7.2	Angestrebtes Zuverlässigkeitsniveau	52
3.7.3	Herleitung von Sicherheitselementen	54

4	Mechanische und stochastische Modelle.....	57
4.1	Einführung.....	57
4.2	Modellierung des Materialverhaltens.....	58
4.2.1	Verhalten von Betonstahl unter Zug- und Druckbeanspruchung.....	58
4.2.2	Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchung.....	59
4.2.3	Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung.....	65
4.2.4	Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen.....	67
4.3	Modellierung des Querschnittstragverhaltens.....	80
4.3.1	Grundlagen.....	80
4.3.2	Die Momenten-Krümmungs-Beziehung – ein integrales Materialgesetz.....	84
4.3.3	Die Momenten-Normalkraft-Interaktion.....	87
4.4	Modellierung des Tragverhaltens schlanker Stahlbetonstützen.....	88
4.4.1	Grundlagen.....	88
4.4.2	Berechnungsmethode.....	90
4.4.3	Modellstützenverfahren.....	93
4.5	Stochastisches Modell.....	97
4.5.1	Vorbemerkung.....	97
4.5.2	Betonstahl.....	97
4.5.3	Beton.....	98
4.5.4	Geometrische Abmessungen.....	100
4.5.5	Einwirkungen.....	101
4.5.6	Modellunsicherheiten.....	102
4.5.7	Zusammenstellung der statistischen Eigenschaften der Basisvariablen.....	102
5	Kritische Analyse bestehender Sicherheitskonzepte.....	103
5.1	Einleitung.....	103
5.2	Globales Sicherheitskonzept.....	103
5.2.1	Sicherheitselemente.....	103
5.2.2	Defizite des globalen Sicherheitskonzepts.....	104
5.3	Bemessungswert-Konzept.....	106
5.3.1	Sicherheitselemente.....	106
5.3.2	Auswirkungen des Sicherheitskonzepts auf die mechanischen Modelle.....	109
5.4	Load and Resistance Factor Design (<i>LRFD</i>).....	113
5.5	Schlussfolgerungen.....	114
6	Kalibrierung eines neuartigen Teilsicherheitsfaktors bezogen auf mittlere Baustoffeigenschaften.....	115
6.1	Allgemeiner Lösungsansatz.....	115
6.2	Grundlagen der Kalibrierung.....	120
6.3	Deterministische Parameterstudie.....	122
6.4	Statistische Analyse des Querschnittswiderstandes.....	130
6.5	Probabilistische Kalibrierung auf Querschnittsebene.....	136
6.5.1	Vorgehensweise.....	136

6.5.2	Analyse und Bewertung des Zuverlässigkeitsniveaus nach Eurocode 2	137
6.5.3	Bestimmung des erforderlichen Teilsicherheitsfaktors.....	141
6.5.4	Überprüfung des erreichten Zuverlässigkeitsniveaus	146
6.5.5	Berücksichtigung von Geometriestreungen über additive Sicherheitselemente..	149
6.6	Vorschlag für die Festlegung des neuen Teilsicherheitsfaktors.....	151
7	Verifizierung des neuen Teilsicherheitsfaktors.....	155
7.1	Vorbemerkung	155
7.2	Implementierung der Adaptive Importance Sampling Methode (<i>AIS</i> -Methode)...	156
7.2.1	Vorgehensweise	156
7.2.2	Schätzfunktionen der <i>AIS</i> -Methode	157
7.2.3	Startprozedur der <i>AIS</i> -Methode	159
7.2.4	Verifizierung anhand des <i>R-S</i> -Modells.....	161
7.2.5	Erweiterungsmöglichkeiten hinsichtlich der Analyse komplexerer Systeme.....	162
7.3	Zuverlässigkeitsanalysen schlanker Druckglieder	167
7.3.1	Einleitung	167
7.3.2	Untersuchungsprogramm	168
7.3.3	Tolerierbarer statistischer Fehler und Effizienz.....	170
7.3.4	Diskussion der Ergebnisse	170
8	Zusammenfassung.....	181
9	Literaturverzeichnis.....	185
 Anhang.....		 197