

Markus Obel

Ein konsekutives Konzept zur probabilistischen Risikobewertung setzungsinduzierter Bauwerks- schädigungen



SFB 837
Interaktionsmodelle für den
maschinellen Tunnelbau

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2019-01

Ein konsekutives Konzept zur probabilistischen Risikobewertung setzungsinduzierter Bauwerksschädigungen

vorgelegte

Dissertation

zur

**Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

der

**Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum**

von

Markus Obel, M. Sc.

Bochum, im Januar 2019

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2019-1

Markus Obel

**Ein konsekutives Konzept zur
probabilistischen Risikobewertung
setzungsinduzierter Bauwerksschädigungen**

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6735-4

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Eltern

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden ein konsekutives Schadensbewertungskonzept sowie dessen probabilistische Erweiterung entwickelt. Ziel ist es, präzise und effizient in nahezu Echtzeit die Kosten sowie den Nutzen von Instandsetzungs- und Kompensationsmaßnahmen infolge tunnelbauinduzierter Schäden an Mauerwerksbauten entlang ganzer Trassen zu bewerten und so deren optimale Führung zu bestimmen.

Zunächst wird dazu ein allgemeines Konzept aus den vier Komponenten Setzungsprognose, Tragwerksidealisierung, Schadensprognose sowie Schadensbewertungskriterien vorgestellt. Es umfasst alternative Genauigkeitsstufen der Methoden und Modelle auf allen Ebenen. Hieraus kann je nach Bauvorhaben und Projektstand ein individuelles Bewertungsvorgehen ausgewählt werden, um eine effiziente Analyse zu ermöglichen. Insbesondere die in der Praxis etablierten Schadensbewertungskriterien auf Basis rein ingenieurtechnischer Kennzahlen - welche Schädigungen über entsprechende Dehnungen abbilden - wurden fortentwickelt, da sie den Nutzen sowie eventuelle Folgekosten durch Instandsetzungsmaßnahmen nicht quantifizieren können. Mit den erweiterten Kennzahlen kann hingegen ein Aufwand-Nutzen-Vergleich zwischen Instandsetzungs- sowie Kompensationsmaßnahmen durchgeführt werden.

Zunächst auf deterministischer Grundlage abgeleitet wird das Konzept probabilistisch erweitert. Darauf aufbauend können mittels globaler Sensitivitätsanalysen, wie den elementaren Effekten und den Sobol-Indizes, relevant streuende Eingangsparameter identifiziert und irrelevant streuende fixiert werden. Mit einer entsprechend reduzierten Anzahl an Parametern können je nach Ansatz, also analytischem oder numerischem Modell, die Auftretenswahrscheinlichkeiten potentieller Tragwerksschädigungen direkt oder über entsprechende Ersatzmodelle wie Antwortflächen bzw. künstlichen neuronalen Netzen prognostiziert werden. Die Ersatzmodelle reduzieren hierbei die Rechenzeit numerischer Modelle deutlich.

Mit den ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeiten können in eigens entwickelter probabilistischer Risikosimulation die erforderlichen Aufwendungen ihrem Nutzen gegenübergestellt und bewertet werden. Das Vorgehen wird am Referenzprojekt U-Bahn-Strecke Wehrhahn-Linie in Düsseldorf demonstriert. Der Fokus liegt auf einem Bewertungsansatz zur Verbesserung der Schadensprognosemodelle.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2015 bis 2019 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark für die Möglichkeit an seinem Lehrstuhl zu Forschen sowie für seine kontinuierliche Förderung und Motivation. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn o. Univ.-Prof. Dr. techn. Dr. phil. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. h. M. Sc. Ph. D. Konrad Bergmeister für die freundliche Übernahme des zweiten Gutachtens sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Wichern für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Mark Alexander Ahrens für die wertvollen Anregungen bei der fachlichen Durchsicht des Manuskripts. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Mario Smarslik für die fachlichen und außerfachlichen Diskussionen bedanken, dessen Ideen und Anregungen waren für mich stets eine große Unterstützung. Ebenso bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für die angenehme Zeit.

Schließlich bedanke ich mich ganz herzlich bei meiner Familie für ihre Unterstützung, ihr Verständnis und den bedingungslosen Rückhalt in der Entstehungszeit dieser Arbeit.

Bochum, im Mai 2019

Markus Obel

Tag der Einreichung: 23. Januar 2019

Tag der mündlichen Prüfung: 18. April 2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum
2. Gutachter: o. Univ.-Prof. Dr. techn. Dr. phil. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. E. h. M. Sc. Ph. D. Konrad Bergmeister, Universität für Bodenkultur Wien
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marc Wichern, Ruhr-Universität Bochum

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielstellung	1
1.2 Struktur der Arbeit	4
2 Grundlagen der Setzungs- und Schadensprognosemodelle	7
2.1 Methoden der Setzungsprognose	7
2.2 Analytische Setzungsberechnung in Querrichtung	9
2.3 Modelle zur Schadensbewertung und Schadenskriterien	14
2.4 Balkenmodelle	16
2.4.1 Verknüpfung tunnelbauinduzierter Setzungen mit den Balkenmodellen	18
2.4.2 Verhältnis von Elastizitäts- zu Schubmodul	19
2.4.3 Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion	20
2.5 Scheibenmodelle der Fassade	22
2.5.1 Materialverhalten Mauerwerk	22
2.5.2 Materialverhalten Beton	24
2.5.3 Materialverhalten Betonstahl und Stahlbeton	26
2.5.4 Baugrundabbildung über nichtlineare Federelemente	28
3 Stochastische Grundlagen	31
3.1 Methoden zur Abbildung von Unschärfen	31
3.2 Probabilistische Ansätze	32
3.3 Sampling Methoden	36
3.3.1 Latin-Hypercube Sampling	37

3.3.2	Sobol-Sequenz	38
3.4	Sensitivitätsanalysen	38
3.4.1	Elementar-Effekt Methode	39
3.4.2	Sobol-Methode	42
3.5	Metamodelle	46
3.5.1	Antwortflächenverfahren	46
3.5.2	Künstliche neuronale Netze	53
3.5.3	Kreuzvalidierung	55
3.6	Risikoanalysen	56
3.6.1	Risikokennzahlen	57
3.6.2	Risikoaggregation	57
4	Entwicklung gestuft probabilistischer Bewertungsansätze	59
4.1	Konsekutives Schadensbewertungskonzept	59
4.1.1	Tragwerksidealisierung	62
4.1.2	Anpassung der Schadenskategorisierung von BOSCARDIN & CORDING	63
4.1.3	Herleitung erweiterter Schadensbewertungskennzahlen	63
4.2	Erweiterung der Balkenmodelle	69
4.2.1	Ansatz zur Bestimmung relativer Setzung	70
4.2.2	Berücksichtigung des Fassadenöffnungsanteils	70
4.3	Ermittlung von Auftretenswahrscheinlichkeiten	71
4.4	Risikosimulationskonzept	73
5	Verifikation und Validierung der Modelle	75
5.1	Validierung der FE-Modelle	75
5.1.1	Materialmodell Mauerwerk	76
5.1.2	Materialmodell Stahlbeton	79
5.1.3	Nichtlineare Bettungsfedern	81
5.2	Gegenüberstellung der Schadensprognoseverfahren	82
5.3	Vergleich der Sampling Methoden	87
5.4	Validierung Sensitivitätsanalysemethoden	88
5.4.1	Gegenüberstellung quantitativer und qualitativer Methoden	88
5.4.2	Einfluss der Verteilungsfunktion	90
5.5	Sensitivitätsanalysen der analytischen Schadensbewertungsmodelle	91
5.5.1	PECK's Modell der Setzungsmulde	91
5.5.2	Balkenmodelle	93
5.6	Metamodellbasierte Bestimmung von Auftretenswahrscheinlichkeiten	95
5.6.1	FE-Modell der Fassade	95
5.6.2	Elementar-Effekt Methode	97
5.6.3	Ersatzmodelle	99

5.6.4	Sobol-Indizes	105
5.6.5	Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeiten	106
6	Risikoanalysen am Referenzprojekt	109
6.1	Referenzprojekt	109
6.2	Konsekutives Schadensbewertungskonzept	110
6.3	Vorabbewertung	112
6.3.1	Trassenwahl	112
6.3.2	Risikoanalyse	114
6.4	Detailuntersuchung	117
6.5	Gegenüberstellung von Vor- und Detailuntersuchung	118
7	Schlussfolgerungen	121
	Literaturverzeichnis	125
A	Herleitung LTSM	147
B	Ergänzung Schadensbewertungskonzept	149
C	Untersuchte Tragwerksfassaden	151
D	Ergänzende Sensitivitätsanalysen	159