

**Kenngrößen zur Prognose des Verhaltens von Geschossbauwerken in
Erdbebengebieten und Kriterien für den Ertüchtigungsbedarf**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der
Fakultät Bauingenieurwesen

der
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Lars Abrahamczyk
geboren in Leipzig

Weimar 2013

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke
2. Dr.-Ing. Jochen Schwarz
3. Prof. Dr. Polat Gülkan
4. Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling

Tag der Disputation: 25. Oktober 2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden an der Bauhaus-Universität Weimar. Wesentliche Teile des wissenschaftlichen Inhaltes stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den Forschungsaktivitäten und sind in dem SERAMAR – Projekt integriert.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Jochen Schwarz für die professionelle Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie der gewährten Unterstützung, Anregungen und Initiativen das Thema im Rahmen konkreter Projekte zu entwickeln.

Sehr herzlich bedanke ich mich bei Prof. Dr. Polat Gülkan. Für seine Bereitschaft als Gutachter und seiner Unterstützung bei den Forschungsaufenthalten in der Türkei sowie den fachlichen Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke danke ich besonders für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen kritischen Anmerkungen zu dieser Arbeit.

Weiterhin gilt mein Dank den Kolleginnen und Kollegen am Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden der Bauhaus-Universität Weimar. Die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit und Unterstützung bei den Feldeinsätzen und Datenerhebungen hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Zahlreiche Studenten des Master Kurses „*Natural Hazards and Risks in Structural Engineering*“ haben im Rahmen von Projekt- und Masterarbeiten Beiträge zur Fokussierung der realen Problemstellungen beigetragen.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Frau, meinen Eltern und Familie für ihre Unterstützung.

Weimar, Mai 2014

Lars Abrahamczyk

BAUHAUS
UNIVERSITÄTSVERLAG

Kurzfassung

Auf Grundlage der mit den Normengenerationen veränderten Zonenkarten wird eine Methodik zur Identifikation seismisch betroffener Gebiete und kritischer Gebäude entwickelt. Durch Auswertung aktueller Angaben der Statistischen Landesämter und mittels Geografischer Informations-Systeme (GIS) können mehrere Stufen der Betroffenheit und die für den Ertüchtigungsbedarf prioritären Zielgebiete eingegrenzt werden.

Systematische Arbeiten zur Klärung der Anforderungen an Stahlbetontragwerke in gering seismischen Gebieten, im Kontext mit der Einführung harmonisierter europäischer Baunormen, werden aufgegriffen. Stahlbeton-Modellrahmen werden unter Ansatz der aktuellen Einwirkungsvorgaben für die deutschen Erdbebengebieten neu bemessen.

Die Zielstellung der Arbeit besteht in der Entwicklung und Anwendung einer hybriden, instrumentell-analytischen Vorgehensweise zur Beschreibung der Verletzbarkeit von Geschossbauwerken und der Bereitstellung der daraus durch Szenarien ableitbaren Kriterien für den Ertüchtigungsbedarf. Das Konzept erfordert die Entwicklung einer Bauwerkstypologie, die bei den Stahlbetontragwerken zwischen Geschossklassen und der Ausprägung von verletzbarkeitserhöhenden Entwurfsmerkmalen unterscheidet.

Die Modellansätze und Vorgehensweisen werden auf hoch seismische Gebiete der Türkei übertragen. Für das Testgebiet Antakya wurde der gesamte Bauwerksbestand (ca. 22.000 Gebäude) aufgenommen; nach Zuordnung der objektkonkreten Verletzbarkeitsklasse liegt er in einer für empirische Szenarien anwendbaren Form vor.

In Abhängigkeit von der statistischen Relevanz werden mittels der GIS-Datenebenen Repräsentanten für die analytischen und instrumentellen Untersuchungen herausgearbeitet. Die für analytische Schadensprognosen erforderlichen Verletzbarkeitsfunktionen werden auf Grundlage instrumentell kalibrierter Bauwerksmodelle aufbereitet. Der Vergleich mit herkömmlichen, aus Datenbanken abrufbaren Funktionen erfolgt über Szenarien, in denen die Zusammenhänge zwischen Einwirkungsintensität und Schadenserwartung auf den Gebäudebestand der Testregion übertragen werden.

Über den Vergleich der Ergebnisse aus analytischer und empirischer Vorgehensweise werden signifikante Einflussparameter diskutiert und der Bedarf an regionaltypischen bzw. bauweisenspezifischen Verletzbarkeitsfunktionen nachgewiesen. Es wird gezeigt, wie ihre Streubreiten reduziert und Modellunschärfen berücksichtigt werden können.

Die Beurteilung des inelastischen Gebäudeverhaltens erfolgt auf der Grundlage von klar definierten Schadensgraden, die sich sowohl im globalen Verhalten, als auch ihrem lokalen Auftreten, aus realen Schadensfällen ableiten lassen und eine unterschiedliche Einwirkungsintensität erfordern. Der Übergang vom globalen in den lokalen Schadensgrad auf Faserebene ermöglicht einen direkten Bezug zur numerischen Modellierung, in der Ergebnisse von Bauteilversuchen verallgemeinert und implementiert werden.

Mit der vorgeschlagenen hybriden Vorgehensweise können einwirkungsabhängige Schadensmuster und Versagensformen ermittelt werden, die einen direkten Bezug zu einer erforderlichen Maßnahme der Ertüchtigung bzw. aufwandseffizienten Verstärkung ermöglichen. Im Hinblick auf die Vorgehensweise wird zwischen mehrgeschossigen Bestandsgebäuden und Gebäuden mit besonderer Bedeutung (Schulen) unterschieden.

Abstract

A methodology is presented enabling the identification of seismically affected areas and critical buildings by considering the change of seismic zoning maps proposed over the time for different code generation. The elaboration of current statistical data for building stock and inhabitant allows the quantification of those areas, which are identified to be affected by the code development. Different grades of the concernment are defined, leading to a prioritization of areas with increased strengthening demand.

Systematic works for the review of the demands for reinforced concrete frame structures in low seismicity regions will be taken; previously studied model frames are redesigned according to the current seismic requirements for German earthquake regions.

The aim of the work is the development and application of a hybrid (instrumental-analytical) approach for the evaluation of the vulnerability of multistory buildings and the provision of unified criteria for the strengthening demand on the basis of risk scenarios. The concept requires the introduction of a building typology for reinforced concrete structures, which should distinguish at least between three story classes and should consider different vulnerability affecting building characteristics.

The model approaches and concepts will be adapted to high seismicity regions in Turkey. For this purpose, the whole building stock of the test area Antakya was surveyed, and the most likely vulnerability class has been assigned to each building. Thus, the harmonized dataset of the City is available for empirical risk scenarios.

In dependence on the statistical relevance and on the basis of the prepared GIS data layers, representative buildings for the analytical and instrumental investigations will be identified. A set of new fragility functions will be derived from instrumentally calibrated building models. The comparison with existing fragility functions is demonstrated by their application to analytical damage prognosis and the outcome of scenarios.

Results from analytical and empirical approaches are compared and discussed with respect to the significance of influence parameters and the further refinement of these vulnerability functions and their adoption to regional and individual particularities of the predominant building types. It will be shown, how the uncertainties can be considered and reduced.

The evaluation of the non-linear building performance is based on clearly defined damage grades, derived from observations and based on the behavior of the materials. By the use of fiber elements for the modeling of the cross sections, the damage grade description can be directly linked to the individual material components and response of the reinforced concrete. Real scale laboratory tests on single elements (columns) and 2D frame structures are generalized and implemented into the model assumptions for damage prognosis of the selected test structures.

The proposed procedure and the developed tools provide the basis for an analytical damage prognosis including the assignment of damage pattern and failure mechanism in dependence on the level of seismic action. This enables a direct link to decisions on the appropriateness of strengthening measure and a consideration of their efficiency.

Within the frame of the general concept will be distinguished between multistory residential buildings and those of higher importance (e.g. schools).

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	15
1.1 Motivation	15
1.2 Einordnung der Arbeit	16
1.3 Problemstellung	18
2 Identifikation der seismischen „Betroffenheit“ und Erfassung von Bestandsgebäuden	21
2.1 Vorgehensweise	21
2.2 Anwendung auf deutsche Erdbebengebiete	22
2.2.1 Entwicklung der Erdbebenbaunormung und Zonenkarten	22
2.2.2 Vergleich der Erdbebenzonen und Kenngrößen	24
2.2.2.1 Als Erdbebenzonen ausgewiesene Gebiete	24
2.2.2.2 Vergleich der Einwirkungs-Referenzgrößen	25
2.2.2.3 Qualitative Bewertung	26
2.2.2.4 Schlussfolgerung für den Ertüchtigungsbedarf	28
2.2.3 bebauung bzw. Bevölkerung in den Zonen	28
2.2.3.1 Datenbasis	28
2.2.3.2 Betrachtung auf der Ebene der Bundesländer	29
2.2.3.3 Ballungszentren	34
2.2.4 Seismisch „betroffene“ Gebiete in Deutschland	36
2.2.4.1 Baden-Württemberg	36
2.2.4.2 Sachsen und Thüringen	38
2.2.4.3 Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Hessen und Bayern	40
2.3 Anwendung auf türkische Erdbebengebiete	43
2.3.1 Entwicklung der Erdbebenbaunormung und Zonenkarten	43
2.3.2 Vergleich der Erdbebenzonen und Kenngrößen	44
2.3.2.1 Gebiete ausgewiesener Erdbebenzonen	44
2.3.2.2 Vergleich der Einwirkungs-Referenzgrößen	44
2.3.2.3 Qualitative Bewertung	47

	Seite
2.3.2.4 Schlussfolgerung für den Ertüchtigungsbedarf	48
2.3.3 Seismisch „betroffene“ Gebiete in der Türkei	48
3 Identifikation von bestandsrepräsentativen Einzelobjekten	51
3.1 Konzept	51
3.2 Vorgehensweisen zur Klassifikation und Einteilungsschemata	52
3.2.1 European Macroseismic Scale (EMS-98)	52
3.2.2 World Housing Encyclopedia (WHE)	52
3.3 Untersuchungsgebiet Deutschland	53
3.3.1 Modellstandorte	53
3.3.2 Einfluss des Bedeutungsfaktors auf die Einwirkungsveränderungen	53
3.3.3 Identifikation einzelner Gebäude in den Gebieten mit den größten Veränderungen ($F_{ra} \geq AF1$)	55
3.3.3.1 Wohngebäude	55
3.3.3.2 Krankenhäuser	58
3.3.3.3 Schulgebäude	59
3.4 Untersuchungsgebiet Türkei	59
3.4.1 Erkundungsmissionen der Ingenieurgruppe der Deutschen TaskForce Erdbeben	59
3.4.2 Ableitung von Modellstandorten	60
3.4.3 Testregion Antakya	60
3.4.4 Typenprojekt für Schulgebäude	62
4 Grundlagen der analytischen Verletzbarkeitsbewertung von Stahlbetonrahmenstrukturen	64
4.1 Elemente	64
4.2 Modellbildung	64
4.2.1 Komponenten und deren Interaktion	64
4.2.2 Bewehrungsstahl	66
4.2.3 Beton	71
4.2.4 Mauerwerk	74

	Seite
4.2.5 Einflüsse auf das Verformungsverhalten	75
4.2.5.1 Verankerungsschlupf (<i>Anchorage slip</i>)	75
4.2.5.2 Effekt der Balkenstreckung (<i>Beam growth</i>)	76
4.3 Ermittlung der Bauwerkskapazität	76
4.3.1 Grundlagen (Elemente) und Bearbeitungsschritte	76
4.3.2 Annahmen zum nichtlinearen Verhalten von Stahlbetonrahmenelementen	77
4.3.2.1 Verwendung von Fließgelenken (auf Makroebene)	77
4.3.2.2 Verwendung von Faserelementen (auf Mikroebene)	78
4.3.3 Lastverteilung für die statisch nichtlineare <i>pushover</i> Analyse	79
4.4 Prognose der Bauwerksschädigung	81
4.4.1 Methoden zur Bewertung des inelastischen Bauwerksverhaltens	81
4.4.2 Definition von Verhaltenszuständen und Kriterien zur analytischen Schadensbeschreibung	84
4.4.3 Definition von lokalen Schadensgraden (LDG)	85
4.4.4 Definition von globalen Schadensgraden (GDG)	86
4.4.5 Bestimmung von Verletzbarkeitskurven	87
4.4.5.1 Eingangskenngrößen	87
4.4.5.2 Beispiel	87
4.4.5.3 Anwendung in Risikostudien	88
4.5 Methoden zur Identifikation des Ertüchtigungsbedarfs	89
4.5.1 Strategien der Ertüchtigung	89
4.5.2 Verstärkungsmethoden	91
4.5.2.1 Stahlbetonummantelung	91
4.5.2.2 Ummantelung durch Stahlprofile und FRP (<i>jacketing</i>)	91
4.5.2.3 Einfügung von Tragwänden	93
4.5.3 Erfahrungswerte aus der Schweiz	93
4.5.4 Entscheidungskriterien nach Eurocode	94
4.5.5 Untersuchungsbedarf	95

	Seite
5 Ableitung eines erfahrungs- und verhaltensbasier- ten Berechnungsmodells für Stahlbetonrahmentrag- werke	96
5.1 Datenbasis von experimentellen Einzelementuntersuchungen	96
5.1.1 Bestands-Stahlbetonstützen	98
5.1.2 Modifizierte (verstärkte) Stahlbetonstützen	102
5.1.3 Berücksichtigung der Modellunsicherheiten	104
5.2 Beschreibung des Bauwerkverhaltens auf der Grundlage von experimentellen Einzelementuntersuchungen	105
5.2.1 3-geschossiger Stahlbetonrahmen nach Dolšek <i>et al.</i> (2002)	105
5.2.2 ISPra – Rahmen (u.a. nach Rocha <i>et al.</i> , 2004)	106
5.3 Zulässigkeit der Übertragung des Modells bzw. Einschränkung der Anwendungsgebiete	109
6 Konzept zur Beschreibung der Verletzbarkeit für seismische Risikoanalysen	111
6.1 Übersicht	111
6.2 Erfahrungsbasierter Ansatz (Level 1.1)	112
6.2.1 Empirische Vorgehensweise auf der Grundlage von Verletzbar- keitsklassen	112
6.2.2 Definition von Schadensgraden und beobachtete Schadens- verteilung	113
6.3 Instrumenteller Ansatz (Level 1.3)	115
6.3.1 Vorgehensweise auf der Grundlage von Messdaten	115
6.3.2 Kenngrößen für die Bewertung von Messdaten	116
6.3.3 Festlegung von Schwellwerten für die Beurteilung des globalen Bauwerkverhaltens	116
6.4 Verhaltensbasierter Ansatz (Level 2.1)	118
6.4.1 Hybrid- bzw. semi-empirische Vorgehensweise auf der Grund- lage von Verletzbarkeitskurven	118
6.4.2 Datenbestand	118

	Seite
6.5 Instrumentell validierter analytischer Ansatz (Level 2.2)	119
6.5.1 Hybride Vorgehensweise auf der Grundlage von Bauwerksmessungen und Verletzbarkeitskurven	119
6.5.2 Bewertung der Verletzbarkeit (<i>Vulnerability assessment</i>)	123
6.5.2.1 Konfigurationen für die Bauwerksinstrumentierung	123
6.5.2.2 Strukturmodell	125
6.5.2.3 Modellkalibrierung	125
6.5.3 Bauwerksverhalten und Schadensprognose (<i>performance and risk assessment</i>)	127
6.5.3.1 Reaktionskenngrößen	127
6.5.3.2 Schadensprognose unter Verwendung von Erfahrungswerten	127
6.5.3.3 Schadensprognose für Bauwerke bzw. Bauwerksbestand ohne vorliegender Erfahrungswerte	128
6.6 Vergleich der Schadensprognose infolge empirischer und analytischer Vorgehensweise	130
6.7 Schlussfolgerungen und Untersuchungsbedarf	132
7 Anwendungsgebiete	134
7.1 Bewertung der Verletzbarkeit und Bauwerkskapazität von 2-dimensionalen Rahmentragwerken in gering seismischen Gebieten ohne Erfahrungswerte	134
7.1.1 Systeme und Annahmen zur Modellbildung	134
7.1.2 Ergebnisse	135
7.1.2.1 4-geschossiger 2D Stahlbetonrahmen	135
7.1.2.2 6-geschossiger 2D Stahlbetonrahmen	140
7.1.3 Streubreiten infolge unsicherer Eingangsgrößen	142
7.1.3.1 Variation der Modellannahmen	142
7.1.3.2 Variation der Einwirkungen	146
7.1.3.3 Variation von Modell- und Einwirkungsparametern	149
7.1.4 Schlussfolgerungen	150

	Seite
7.2 Bewertung der Verletzbarkeit von Typenobjekten in Starkbeben- gebieten	152
7.2.1 Schulgebäude in Bingöl	152
7.2.1.1 Modellbildung	152
7.2.1.2 Schadensprognose und Vergleich mit den Beobachtungen	153
7.2.1.3 Verstärkung mittels Stützenummantelung	154
7.2.2 Schulgebäude in Antakya	155
7.3 Bewertung eines Bauwerksbestandes in seismisch exponierten Großstädten	157
7.3.1 Problemstellung	157
7.3.2 Entwicklung einer Bauwerkstypologie	158
7.3.2.1 Stahlbetongebäude	158
7.3.2.2 Mauerwerksgebäude	159
7.3.3 Identifikation repräsentativer Objekte	159
7.3.4 Instrumentelle Untersuchungen	161
7.3.5 Modellbildung und Kalibrierung	162
7.3.6 Berücksichtigung von Modellunsicherheiten (in der Schadens- prognose)	163
7.3.7 Ermittlung der Verletzbarkeitskurven	165
8 Überführung der Ergebnisse auf die Modellregion Antakya	166
8.1 Einordnung	166
8.2 Seismische Gefährdung und Modellerdbeben zur Begründung der Szenarien	167
8.3 Ergebnisse der Gebäudeaufnahme	168
8.4 Verletzbarkeitsfunktionen	170
8.5 Schadensszenarien	172
9 Zusammenfassung	175

	Seite
Literaturverzeichnis	178
Tabellenverzeichnis	190
Abbildungsverzeichnis	193
Abkürzungsverzeichnis	204
Anhang A2 zu Abschnitt 2: Identifikation der seismischen „Betroffenheit“ und Erfassung von Bestandsgebäuden	207
Anhang A2.1 Anwendungsgebiet Deutschland	207
Anhang A2.2 Anwendungsgebiet Türkei	215
Anhang A3 zu Abschnitt 3: Identifikation von bestandsrepräsentativen Einzelobjekten	217
Anhang A3.1 Untersuchungsgebiet Deutschland	217
Anhang A4 zu Abschnitt 4: Grundlagen der analytischen Verletzbarkeitsbewertung von Stahlbetonrahmen	224
Anhang A4.1 Bewehrungsstahl	224
Anhang A4.2 Beton	226
Anhang A4.3 Mauerwerk	229
Anhang A4.4 Lastverteilung für <i>pushover</i> Analyse	231
Anhang A4.5 Vergleich der Methoden zur Bewertung des inelastischen Bauwerksverhaltens	232
Anhang A4.6 Bestimmung von Verletzbarkeitskurven	233
Anhang A4.7 Ertüchtigungsbedarf	234
Anhang A5 zu Abschnitt 5: Ableitung eines erfahrungs- und verhaltensbasierten Berechnungsmodells	235
Anhang A5.1 Ergebnisse Nachrechnung Stützenversuche	235
Anhang A5.2 Modellannahmen und Materialparameter	240
Anhang A5.3 Schadensverteilung für Stahlbetonrahmen nach Dolšek <i>et al.</i> (2002)	245
Anhang A6 Modelle	246
Anhang A6.1 Modellgrundlagen 2D Stahlbetonrahmen	246
Anhang A6.2 Modellobjekte Antakya	247

	Seite
Anhang A7 zu Abschnitt 7: Anwendungsgebiete	256
Anhang A7.1 4-geschossiger 2D - Stahlbetonrahmen	256
Anhang A7.2 6-geschossiger 2D - Stahlbetonrahmen	259
Anhang A7.3 Streubreiten infolge unsicherer Eingangsgrößen	260
Anhang A7.4 Schulgebäude Türkei (nach Gebäudeaufnahme in Bingöl, 2003; Schwarz <i>et al.</i> , 2004)	262
Anhang A7.5 Verletzbarkeitskurven für Stahlbetonrahmensysteme	269
Anhang A7.6 Verteilung der Bauweisen im Untersuchungsgebiet Antakya	273
Anhang A7.7 Verletzbarkeitskurven für regionale Bauweisen	274
Anhang A8 zu Abschnitt 8: Überführung der Ergebnisse auf die Modellregion Antakya	276

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Gewährleistung einer ausreichenden Erdbebensicherheit in einem gefährdeten Gebiet ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die über die Erdbebensicherung eines einzelnen Bauwerkes hinausgeht. So können die volkswirtschaftlichen Folgen durch die Schädigung individueller Bauwerke, aufgrund der vielschichtigen wirtschaftlichen Verflechtungen und Abhängigkeiten, weitreichend sein. Aber auch der Schaden am einzelnen Bauwerk kann im Einzelfall für das betreffende Objekt verheerende, wirtschaftliche Konsequenzen nach sich ziehen.

Beispiele hierfür stellen die Schadensbeben des letzten Jahrzehntes, u.a.

- Izmit (Türkei) M_w 7.4 am 17. August 1999 [Schwarz *et al.*, 2000],
- Molise (Italien) M_w 5.9 am 31. Oktober 2002 [Decanini *et al.*, 2004a, b],
- Bingöl (Türkei) M_w 6.4 am 1. May 2003 [Abrahamczyk *et al.*, 2003]

dar, bei denen neben vielfältigen strukturellen Schäden und einstürzenden Schul- und Internatsgebäuden Menschenleben zu verzeichnen waren.

Die Identifikation des Antwort- und Schädigungsverhaltens seismisch beanspruchter Bauwerke, spielt eine entscheidende Rolle für die Begründung von Verstärkungsmaßnahmen und/ oder für die Entwicklung geeigneter Entwurfsphilosophien für die betroffenen Bauwerkstypen. Den Ausgangspunkt bilden hierfür verlässliche Strukturmodelle, die das zu untersuchende Gebäude möglichst wirklichkeitsgetreu abbilden.

Die Notwendigkeit nach Konzepten zur Bewertung des Verhaltens von Geschossbauwerken in Erdbebengebieten und Kriterien für den Ertüchtigungsbedarf auf der Grundlage verlässlicher, realitätsentsprechender Modelle, zeigt auch die aktuelle Rechtsprechung in Italien nach dem L'Aquila Erdbeben in 2009. Eine Schadensprognose für ein Untersuchungsgebiet muss daher auf belastbaren Daten und Modellen basieren, um dem Anspruch der Überprüfbarkeit auch nach einem Schadensereignis zu genügen.