

# Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit von Gebäudeverstärkungsmaßnahmen zur Erdbebenertüchtigung

**Grundlagen und Lösungsansatz unter besonderer  
Berücksichtigung der Situation in Bukarest, Rumänien**

**Dipl.-Ing. Maria Boştenaru Dan**

Marie Curie Intra-European Fellow  
Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia  
European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk

c/o EUCENTRE  
Via Ferrata 1  
27100 Pavia  
Italien

*für meine Mutter, meinen Vater  
und  
meine Großmutter*

Berichte aus dem Bauwesen

**Maria Bostenaru Dan**

**Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit von Gebäude-  
verstärkungsmaßnahmen zur Erdbebenertüchtigung**

Grundlagen und Lösungsansatz unter besonderer  
Berücksichtigung der Situation in Bukarest, Rumänien

Shaker Verlag  
Aachen 2006

**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.

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5727-6

ISBN-13: 978-3-8322-5727-9

ISSN 0945-067X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort und Danksagung

Das Graduiertenkolleg „Naturkatastrophen“ wurde 1998 durch eine Initiative der Deutschen Forschungsgemeinschaft für eine maximale Förderdauer von 9 Jahren ins Leben gerufen. Zweck ist die interdisziplinäre Kooperation in der Forschung von Naturkatastrophen, von wissenschaftlicher Grundlagenforschung bis hin zu Anwendungen in den Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. Ich bin im Oktober 2000 in das Kolleg eingetreten und habe mit der Forschung über das Thema „Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit von Gebäudeverstärkungsmaßnahmen zur Erdbebenertüchtigung“ angefangen.

Ein Doktorandenstipendium innerhalb eines Graduiertenkollegs zu haben, erlaubt eine größere Freiheit als eine projektbezogene Einstellung in einem wissenschaftlichem Institut, und somit habe ich von der Möglichkeit eines Auslandssemesters Gebrauch gemacht. Zwei Monate im 2002 und vier Monate in 2003 bin ich Gaststudentin an die European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk an der Universität Pavia, Italien, gewesen. Das Vorhaben wurde im Rahmen des RP5 der Europäischen Union mit einem „Marie Curie Fellowship“ unterstützt. Ich bedanke mich bei Professor Gian Michele Calvi für die Annahme als Gaststudentin. Ich bedanke mich ganz herzlich für die finanzielle Unterstützung unter diesen Programmen.

Mein ständiger Dank gilt meiner Mutter, für ihre unermüdliche Unterstützung die ganze Zeit.

Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, für die Freiheit in der Bearbeitung des Themas, die er mir erlaubt hat, ebenso für die Erlaubnis Vertiefer des Institutes bei ihren Abschlussarbeiten zu betreuen und nicht zuletzt für die Unterstützung bei meinem Vorhaben ein Auslandsforschungssemester anzugehen. Mein besonderer Dank gilt Dr. Rui Pinho aus Pavia, Italien, und ebenso bedanke ich mich bei meinem früherem Student, jetzt Dipl.-Ing. Gregor Bourlotos in Athen, Griechenland. Es waren die kompetenten Diskussionen mit ihnen die geholfen haben, im Abstand einiger Jahre, meinen Weg in der Erdbebenforschung zu finden. Vielen Dank an Dr. Rui Pinho für die Zeit, die er sich genommen hat, um meine relativ langen Fragen zu beantworten, für die sehr klare Erläuterung der tragwerksbezogenen Aspekte, für die raschen Aktualisierungen der in dieser Arbeit verwendeten Software, für die Offenheit gegenüber architektonischen Aspekten im Erdbebeningenieurwesen und für die verwaltungstechnische Hilfe während meines Aufenthaltes in Pavia. Vielen Dank an Herrn Bourlotos für den gewährten Zugang zu Literatur aus einer Sprache, die ich nicht kenne, dem Griechischen. Mein Dank gilt auch der anderen Studentin, die ich betreut habe, jetzt Frau Dipl.-Ing. Gülay Öztürk. Ich bedanke mich bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Kauffmann aus dem Graduiertenkolleg für die Hilfe während der Laufzeit des Stipendiums bei der Digitalisierung und Bildbearbeitung sowie für die Korrektur des Manuskripts in einem sehr engen Zeitrahmen. Ebenfalls für die Neukorrektur des Manuskripts bedanke ich mich bei Frau Mirela Șerban aus Bukarest, Rumänien. Ich bedanke mich bei Dr. Sever Georgescu von INCERC Bucharest sowie bei Charles D. James von der Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, für den Erlaubnis, zwei, bzw. fünf Photos der Schäden im 1977 Erdbeben in dieser Arbeit zu verwenden.

Diese Veröffentlichung wäre nicht möglich gewesen ohne die Druckbeihilfe, die innerhalb des Projektes CA'REDIVIVUS „Preservation of historic reinforced concrete housing buildings in Europe“, Vertrag MEIF-CT-2005-009765 gesichert wurde.

Ich hoffe, mit dieser Arbeit, eine neue interdisziplinäre Richtung in der Erforschung der ertüchtigungsbezogenen Aspekte von Altbauten, insbesondere bezogen auf das architektonische Erbe des XXten Jahrhunderts, eröffnet zu haben.

Maria Boștenaru  
Karlsruhe, November 2006

## Zusammenfassung

Die Reduzierung des seismischen Risikos durch die Ertüchtigung von Altbauten dient der Katastrophenvorbeugung. Die Eingriffsplanung auf Altbauten unterscheidet sich von der Neubauplanung durch eine wichtige Randbedingung: der Altbau bildet die Basis für alle Planungs- und Bauvorhaben. An der Umsetzung der Maßnahmen sind Akteure aus den Sphären der passiven Öffentlichkeit und dem Expertenbereich sowie aktive Betroffene beteiligt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Planungsmanagement im Expertenbereich, mit einer detaillierten Sicht auf den Entscheidungsraum zwischen Zielen, Mitteln, Nutzen und Kosten. Die Forschung wurde hauptsächlich bezogen auf die Bausubstanz in Bukarest, Rumänien, durchgeführt, aber die Korrelation mit möglichen Ergebnissen an anderen Orten, nämlich Griechenland, wurde auch in Betracht gezogen. Die Motivation wird vom Bedarf an spezifischen Ertüchtigungsmaßnahmen an historischen Bauten in Bukarest, der Hauptstadt Rumäniens gebildet. Bukarest ist von einer Mischung an Gebäuden, unterschiedlich in ihrem Tragwerk, Alter, Zustand und Maßstab, charakterisiert. Die Arbeit beschreibt die architektonischen und technischen Charakteristiken und auch die Tragwerksschäden an Bauten mit verschiedenem Alter am Beispiel von Gebäudetypen in Bukarest.

Die Bausubstanz in Bukarest wurde sowohl typologisch als auch teilflächendeckend analysiert. Nach der Bewertung aller historischen Wohnbautypen stellte sich heraus, dass am meisten vulnerabel der Typ der mehrgeschossigen Stahlbetonrahmenbauten der Zwischenkriegszeit ist. Es wurden fünf Gebäudemodelle dieses Typs entworfen und zusammen mit geeigneten Ertüchtigungsmaßnahmen für FE Simulation modelliert. Statt mit FE Modellen konzentrierter Plastizität heranzugehen, wurde für die Nichtlinearität des Baustoffes ein Modell verteilter Inelastizität (SeismoStruct, 2003) eingesetzt: die Elementschnitte bestehen aus Fasern. Die Gebäudemodelle waren:

- vereinfachte regelmäßige Modelle, mit Höhen, Spannweiten, Anzahl der Rahmen und Felder, die für die Mehrheit der Zwischenkriegswohnbauten in Bukarest charakteristisch sind;
- Wohngebäudeentwürfe, nach den Regelungen der Zwischenkriegszeit;
- ein reales Wohngebäude aus der Zwischenkriegszeit.

Kriterien, um die Merkmale der gebauten Substanz so aufzunehmen, dass solche Modelle erstellt werden können, wurden festgelegt. Die allgemeine Gültigkeit der Vorhersagen wurde vertieft erforscht, durch den Vergleich der berechneten Schäden mit den realen, und sie haben sich als nah an der Wirklichkeit erwiesen. Für diesen Zweck wurde eine Matrix der an realen Gebäuden erlittenen Schäden entwickelt und eingesetzt. Die beschriebene Pathologie wurde von Skizzen unterstützt. Einige Ertüchtigungsmethoden wurden analysiert: sowohl konservative (Stahlummantelung, Hinzufügen von Stahlbetontragwänden, Stahlstreben) als auch innovative (Glas- und Karbonfaserlamellen).

Das Konzept der *Ertüchtigungselemente* wurde eigens dafür entwickelt, um Entscheidungen bezüglich der Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit der Strategie zu unterstützen. Diese sind räumliche Elemente, welche für die Bauaufnahme charakteristisch sind, typische Erdbeschäden zei-

gen und ein besseres seismisches Verhalten im Fall der Ertüchtigung ergeben. Ein *Ertüchtigungselement* besteht aus allen Arbeiten, die gemacht werden, um ein Tragwerkselement zu verstärken, zu reparieren, wieder aufzubauen oder sogar neu zu bauen. Jedem *Ertüchtigungselement* werden:

- Erkennungsmerkmale,
- Baumaßnahmen mit Dauer/benötigten Ressourcen,
- mit der Reparatur verbundenen Kosten für Ertüchtigung/Reparatur,
- erdbebenresistente Eigenschaften, seismische Mängel und Erdbebenschadensmuster

zugewiesen. Mit der Hilfe von *Ertüchtigungselementen* wird ein interdisziplinäres Herangehen an die Gebäudeertüchtigung möglich gemacht.

Ein Ertüchtigungssystem wird durch eine passende technische Strategie sowie durch eine passende Managementstrategie umgesetzt. Die Wechselwirkungen zwischen den Bau-, Nutzungs- und Ästhetikeigenschaften eines Gebäudes und die gewählte Ertüchtigungsstrategie wurden untersucht. In der Tragwerksstudie wurde die seismische Leistung von Stahlbetonrahmenbauten unter zyklischer Biegung untersucht. Hinausschauend auf die allgemeine Methodologie, die Kosten für die Reparatur vorbeschädigter Bauten denen für vorbeugende Ertüchtigung gegenüberzustellen, wurden Beschädigungen in den folgenden Fällen untersucht:

- nicht ertüchtigtes Gebäude;
- Ertüchtigung eines unbeschädigten Gebäudes;
- Ertüchtigung eines vorher beschädigten Gebäudes.

Während der Auswertung wurden einige Computerprogramme dafür eingesetzt, um Ergebnisse bezüglich der Anteile und der Lage von Bauelementen, welche Schäden in unterschiedlichem Ausmaß aufweisen, zu erzielen. Der innovative Teil liegt in der Anwendung eines Spannung-Dehnung-basierten Ansatzes auf Modelle für Gesamtgebäude. Solch eine Analyse erlaubt nicht nur die Beschreibung der Versagensarten und die Bestimmung der Grenzzustände, die von dem Gebäude eventuell erreicht werden, sondern auch die spezifische Bestimmung der Anzahl und Lage der Tragwerksglieder, die eine bestimmte Art von Schäden erleiden. Diese Art von Ergebnissen kann die Eingabe für interdisziplinäre Studien bilden, z.B. für wirtschaftliche Studien. In einem leistungs-basiertem Herangehen wurden dann die so genannten Kostenkurven erstellt und die Ertüchtigungs-/Reparaturkosten mit verschiedenen Bemessungsbeben in Bezug gesetzt. Weiterhin werden verschiedene Aspekte des ‚Nutzens‘ der Ertüchtigungsmaßnahmen (Dauer, Veränderung der historischen Substanz, Bewohnerumzug) in Betracht bezogen und hierfür das für deren Auswahl entwickelte Modell auch präsentiert. Es handelt sich um ein integriertes Entscheidungsunterstützungssystem, das die Bauaufnahme, die Tragwerksaspekte und die Kostenberechnung umfasst, und das dieselben *Ertüchtigungselemente* als Basis benutzt. Somit konnten die Sichtweisen aller beteiligten Akteure auf einen gemeinsamen Nenner abgewogen und in die Entscheidung einbezogen werden.

## Abstract

The reduction of seismic risk through retrofitting of existing buildings serves catastrophe prevention. Planning interventions on existing buildings differs from planning of new buildings through an important condition: the existing building is the base for all planning and construction efforts. Actors from the spheres of passive publicity, experts as well as active affected people participate in the application of the measures. The focus of this work lays on the planning management in the experts' field, with a detailed view on the decision space between goals, instruments, benefits and costs.

Research was conducted concerning mainly the building stock in Bucharest, Romania, but correlation with possible results in other locations is taken into account, namely in Greece. The motivation is the necessity to develop specific retrofit measures for historic buildings in the capital of Romania. Bucharest is characterised through a maze of buildings with different structure, age, state and scale. The work also describes the architectural and engineering characteristics of, as well as the structural damage on buildings of different ages exemplified on building types in Bucharest.

The building stock in Bucharest was analysed both typologically and area based. After evaluating all historical residential building types, the multi-storey reinforced concrete frame buildings from interwar time were found to be the most vulnerable. Five building models of this type were designed and modelled together with suitable retrofit measures for FE simulation. Instead using a concentrated plasticity approach to the FE models, a model of distributed inelasticity (SeismoStruct, 2003) was employed for material non-linearity: the elements sections are subdivided into fibres. The building models were:

- simplified regular models of block of flats with the height, spans, number of bays and frames, which were characteristic for the majority of interwar buildings in Bucharest;
- residential building projects following the regulations of the interwar time;
- a real housing building from the interwar time.

Criteria to survey characteristics of the building stock in order to construct such models were established. The general validity of the prediction has been studied extensively, comparing the computed damage types with real ones and proved to be close to reality. For this purpose a matrix of damages suffered by typical buildings has been used. The pathology described is supported by sketches. Several retrofit measures were analysed: both conservative (steel jacketing, addition of structural walls, braces) and innovative (glass and carbon fibre application).

The concept of *retrofit elements* has been developed, specially to support decision regarding the applicability and economic efficiency of the strategy. These are spatial elements which are characteristic for the survey, present typical earthquake damages and are decisive for a better seismic

behaviour in case of retrofitting. A *retrofit element* consists of all works which have to be done in order to strengthen, repair, rebuild or even build a structural member. To each *retrofit element*

- recognition characteristics,
- construction works with duration/needed resources,
- implied costs for retrofit/repairation,
- earthquake resilient features, seismic deficiencies and earthquake damage patterns

were assigned. With the help of *retrofit elements* an interdisciplinary approach to building retrofit is made possible.

A retrofit system is implemented through an adequate technical as well as an adequate management strategy. Interdependencies between constructive, functional and aesthetic characteristics of a building and the chosen retrofit strategy were investigated.

Within the structural study the seismic performance of reinforced concrete frame buildings subjected to cyclic bending was assessed. Outlooking to the general methodology to assess the costs for post-damage repair of buildings versus the costs for their preventive retrofit, damage in following cases was considered:

- unretrofitted building;
- retrofit of an undamaged building;
- retrofit of previously damaged building.

Several computer programs were employed during the analysis, in order to obtain results regarding the percents and the position of structural members which show damages to different extents. The innovative part lies in a stress-strain based approach applied to models of whole buildings. Such an analysis allows not only the description of failure modes and determination of limit states eventually reached by the building, but also the specific determination of the number and position of structural members suffering different types of damage. This kind of output can build the input for interdisciplinary studies, like economic ones. In a performance based retrofit approach the so-called 'costs curves' were computed and the retrofit/repair costs related for different design earthquakes.

Further, different aspects of 'benefit' of retrofit measures (duration, alteration of historic substance, relocation of inhabitants) were taken into consideration and the hitherto developed model for choice among these is also presented. It is an integrated decision support system comprising building survey, structural aspects and calculation of costs, and uses the same *retrofit elements* as planning basis. This way the points of view of all participating actors can be balanced on a common denominator in the decision process.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Kapitel 1. EINFÜHRUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Besondere Aspekte der Umsetzung</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 Konzept</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Wirtschaftlichkeit .....	3
1.2.2 Umsetzbarkeit.....	3
<b>1.3 Stand der Forschung</b> .....	<b>4</b>
1.3.1 Bauaufnahmefethoden.....	8
1.3.2 Kostenermittlungsmethoden in der allgemeinen wirtschaftlichen Gebäudeplanung	10
1.3.3 Richtlinien zur Erdbebenertüchtigung historischer Bauten .....	11
1.3.4 Performance Levels .....	12
1.3.5 Wirtschaftlichkeitsstudien von Ertüchtigungsmaßnahmen.....	12
1.3.6 Entscheidungstechnik .....	13
1.3.6.1 Die Modelle von Richter und Fingerhuth/Koch.....	15
1.3.6.2 Das Modell von Strassert .....	16
1.3.6.3 Das Modell in ATC-40 .....	18
1.3.6.4 Das von Ottokar Uhl in Hollabrunn (Österreich) eingesetzte Modell.....	19
1.3.6.5 Das bei der Weißenhof Siedlung (Deutschland) eingesetzte Modell .....	22
<b>1.4 Städtebaulicher Rahmen</b> .....	<b>23</b>
<b>Kapitel 2. Fallstudie Bukarest: Probleme und Potentiale</b> .....	<b>27</b>
<b>2.1 Maßstab der Studie</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2 Flächenhafte Aufnahme</b> .....	<b>28</b>
2.2.1 Relevante Information in der qualitativen Bauaufnahme .....	30
2.2.2 Relevante Information in der quantitativen Bauaufnahme .....	32
<b>2.3 Typologische Aufnahme</b> .....	<b>34</b>
2.3.1.1 Die Bauten vor 1850 .....	35
2.3.1.2 Der Eklektismus.....	35
2.3.1.3 Die rumänische Art Nouveau .....	40
2.3.1.4 Das rumänische Neue Bauen.....	45
2.3.1.5 Die Bauten der Nachkriegszeit .....	49
2.3.1.6 Die rumänische Moderne .....	51
2.3.1.7 Die rumänische sozialistische Architektur .....	56
2.3.1.8 Zeitgenössische Baustile .....	58
<b>2.4 Diskussion</b> .....	<b>60</b>
<b>2.5 Schlussfolgerung</b> .....	<b>63</b>
<b>Kapitel 3. Diagnose: Die Methode der Ertüchtigungselemente</b> .....	<b>64</b>
<b>3.1 Ertüchtigungselemente in der Bauaufnahme</b> .....	<b>67</b>
3.1.1 Gebäudemerkmale und ihre seismische Einschätzung .....	68
3.1.1.1 Vertikale tragende Elemente: Rahmen .....	68
3.1.1.2 Vertikale tragende Elemente: Wände .....	69
3.1.1.3 Horizontale tragende Elemente .....	71
3.1.1.4 Nichttragende Elemente .....	72
<b>3.2 Ertüchtigungselemente und Projektmanagement</b> .....	<b>72</b>

<b>3.3</b>	<b>Ertüchtigungselemente in der Kostenberechnung .....</b>	<b>76</b>
3.3.1.1	Leistungsniveaus.....	76
3.3.1.2	Ertüchtigungselemente und Ertüchtigungsebenen.....	78
3.3.1.3	Kostenebenen.....	80
<b>3.4</b>	<b>Ertüchtigungselemente in der Tragwerksuntersuchung.....</b>	<b>81</b>
3.4.1	Modellierung .....	82
3.4.2	Untersuchung realer Schadensbilder .....	87
<b>3.5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>90</b>
<b>3.6</b>	<b>Schlussfolgerung.....</b>	<b>92</b>
<b>Kapitel 4.</b>	<b><i>Entscheidungsaspekte in der Nutzen-Kosten-Analyse .....</i></b>	<b><i>94</i></b>
<b>4.1</b>	<b>Akteure und Kriterien.....</b>	<b>96</b>
<b>4.2</b>	<b>Tragwerksmodellierung .....</b>	<b>106</b>
4.2.1	Regelmäßige Modelle .....	111
4.2.2	Modell eines realen Gebäudes.....	113
4.2.3	Modelle selbst entworfener Gebäude des untersuchten Bautyps .....	115
4.2.4	Angesetzte Lasten.....	117
<b>4.3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>120</b>
4.3.1	Ergebnisse aus der Tragwerksanalyse .....	121
4.3.2	Wirtschaftliche Berechnungen .....	125
<b>4.4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>134</b>
4.4.1	Übertragbarkeit der Ergebnisse aus architektonischer Sicht.....	135
4.4.2	Übertragbarkeit der Ergebnisse aus tragwerkplanerischer Sicht.....	141
4.4.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Sicht der Wirtschaftlichkeit.....	142
<b>4.5</b>	<b>Schlussfolgerung.....</b>	<b>145</b>
<b>Kapitel 5.</b>	<b><i>Ausblick .....</i></b>	<b><i>148</i></b>
<b>5.1</b>	<b>Ertüchtigungsstrategie: operative Mittel.....</b>	<b>148</b>
<b>5.2</b>	<b>Aktionsplan: Übergang auf den Gebäudemaßstab .....</b>	<b>150</b>
<b>5.3</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>152</b>
<b>Kapitel 6.</b>	<b><i>Schlusswort.....</i></b>	<b><i>153</i></b>
	<b>LITERATUR .....</b>	<b>156</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>162</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>164</b>
	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>165</b>
	<b>TAFELVERZEICHNIS.....</b>	<b>166</b>
	<b>ANHANG .....</b>	<b>170</b>