Originally published as:

Tyagunov, S., Grünthal, G., Wahlström, R., Stempniewski, L., Zschau, J., Münich, J. C.
(2006): Erdbebenrisiko-Kartierung für Deutschland. - Beton- und Stahlbetonbau, 101, 10,
769-782

DOI: 10.1002/best.200600503.

Sergey Tyagunov
Gottfried Grünthal
Rutger Wahlström
Lothar Stempniewski
Jochen Zschau
Johannes Christian Münich

Erdbebenrisiko-Kartierung für Deutschland

Anspruch dieser Studie ist die Beurteilung und Darstellung des seismischen Risikos für Deutschland in Bezug auf die zu erwartenden Verluste durch Schäden an Wohngebäuden. In bestimmten Regionen des Landes sind Erdbeben mit M_L Magnituden von über 6 beobachtet worden. Dies entspricht einer makroseismischen Intensität von VIII nach der EMS-98 Skala. Die zerstörende Wirkung wird umso deutlicher, wenn zusätzlich die Daten über die Bevölkerungs- und Industriedichte mit den Erdbebendaten verschnitten werden. In Deutschland treffen - wie in vielen Industrienationen - die Gefährdungen mit einer hohen Konzentration von gefährdeten Werten zusammen. In dieser Studie wird eine Methode vorgestellt und angewendet, mit deren Hilfe das seismische Risiko in Form erwarteter monetärer Verluste berechnet werden kann. Dies geschieht anhand [1] intensitätsbasierter probabilistischer seismischer Gefährdung, [2] Vulnerabilitätsmodelle, die auf der Verteilung von Wohngebäuden unterschiedlicher struktureller Typen in repräsentativen Gemeinden basieren und [3] der Verteilung der Werte durch Angabe der Wiederherstellungskosten für Wohngebäude. Die Schätzungen des Risikos werden durch Angabe des primären ökonomischen Schadens aufgrund struktureller Schäden an Wohngebäuden für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit der Gefährdung von 90% in 50 Jahren (entspricht einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren) dargestellt. Die erhaltenen Resultate werden kartographisch durch Schadens- und Risikoverteilungen dargestellt. Für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren ist die mittlere Schadensrate bis 20%, das Risiko in besonders betroffenen Gemeinden beträgt bis zu mehreren hundert Millionen Euro. Die entwickelten Modelle wurden anhand beobachteter Daten einiger Schadenerdbeben der letzten 30 Jahren in Deutschland und des näheren Umfelds validiert.

Earthquake Risk Assessing and Mapping for Germany

The aim of this study is to assess and map the seismic risk for Germany. there are several earthquake prone region in the country which have produced M_L magnitudes above 6 corresponding to ground shaking intensity VIII (EMS-98). Combined with the fact that some of these earthquake prone areas are densely populated and highly industrialized and where therefore the hazard coincides with high concentration of exposed assets, the damaging implications from earthquakes must be taken seriously. In this study a methodology is presented and pursued to calculate the seismic risk from [1] intensity based probabilistic seismic hazard, [2] vulnerability composition models, which are based on the distribution of residential buildings of various structural types in representative communities and [3] distribution of assets in

terms of replacement costs for residential buildings, which are estimated for all communities of the country. The estimates of risk are treated as primary economic losses due to structural damage to residential buildings. The obtained results are presented as maps of the damage and risk distributions. For a probability level of 90% non-exceedence in 50 years (corresponding to a mean return period of 475 years) the mean damage ration is up to 20% and the risk up to hundreds of millions of Euro in the most endangered communities. The developed models have been validated with observed data from several damaging earthquakes in Germany and the nearby area in the past 30 years.

1 Einleitung

Deutschland ist ein verhältnismäßig dicht bevölkertes Land mit mehr als 80 Millionen Einwohnern, die überwiegend in städtischen Bereichen wohnhaft sind. Trotz der von tektonischen Plattengrenzen entfernten Lage, kann ein relativ großer Teil des Landes von Erdbeben betroffenen werden. Dies hat Einfluss auf die Katastrophenvorsorge sowie Aktivitäten zur Risikominimierung. Allerdings sind zerstörerische seismische Ereignisse sehr selten. Die seismische Historie (Tabelle 1) belegt jedoch die Ernsthaftigkeit der Bedrohung durch Erdbeben. Aktuelle Schätzungen weisen ungefähr ein Viertel der gesamten Fläche des Landes mit etwa einem Drittel der Bevölkerung Gebieten zu, in denen die seismische Intensität VI (entspricht sehr leichten Gebäudeschäden) für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird [1]. In bestimmten Gebieten wird eine Intensität von VIII für das genannte Gefährdungsniveau, das gleichzeitig die Grundlage der Erdbebenormung für normale Hochbauten ist, erreicht. Diese Studie fußt auf der makroseismischen Intensität gemäß der Definition der Europäischen Makroseismischen Skala – EMS-98 [2]. Das Risiko beschreibt in dieser Studie die ökonomischen Verluste, die aufgrund der strukturellen Schädigung von Wohngebäuden bei einer Gefährdung mit einer Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren zu erwarten sind. Der Gebäudebestand deutscher Gemeinden beinhaltet einige moderne Gebäude, die in Übereinstimmung mit den Anforderungen durch die nationale Normierung errichtet wurden. Gebäude, die vor der Einführung der Norm konstruiert wurden, sind jedoch häufiger anzutreffen. Unter Berücksichtigung des vorherrschenden niedrigen Gefährdungsgrads

Tabelle 1. Erdbeben mit zerstörerischer Wirkung im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Erdbebenparameter nach [39].

Table 1. Damaging earthquakes on the territory of Germany and close to its borders. Earthquake parameters in accordance with [39].

Zeitpunkt	Ort	Breite	Länge	Tiefe, km	Magnitude, M_w	Maximale Intensität
1356-10-18	Basel	47.47	07.60		6.6	IX
1756-02-18	Düren	50.75	06.35	14	5.8	VIII
1911-11-16	Ebingen	48.22	09.00	10	5.7	VIII
1935-06-27	Bad Saulgau	48.04	09.47	9	5.4	VII-VIII
1943-05-28	Onstmettingen	48.27	08.98	9	5.3	VIII
1951-03-14	Euskirchen	50.63	06.72	9	5.1	VII-VIII
1978-09-03	Albstadt	48.28	09.03	7	5.2	VII-VIII
1992-04-13	Roermond	51.16	05.95	18	5.3	VII

sowie der generell hochwertigen handwerklichen Ausführung weisen letztere in diesem Fall jedoch nur geringfügig erhöhte Vulnerabilitäten auf. In verschiedenen Ländern Südeuropas mit einer höheren zu erwartenden Gefährdung werden größere Differenzen der Vulnerabilitäten beobachtet. Die kombinierten Aspekte der Verteilung der seismischen Gefährdung, der seismischen Vulnerabilität und der exponierten Werte stellen die notwendigen Rahmenbedingungen für die Analyse des seismischen Risikos zur Verfügung. Solch eine Analyse für Deutschland entspricht der Zielsetzung der vorliegenden Studie, die durch zwei Gruppen der Universität Karlsruhe (TH) und des GeoForschungsZentrums (GFZ Potsdam) im Rahmen des „Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology“ (CEDIM) durchgeführt worden ist.

Die Bewertung des Risikos ist ein notwendiger und wichtiger erster Schritt im Hinblick auf Überlegungen zur Reduzierung des Risikos bis hin zu vorbeugenden Maßnahmen zum Katastrophenschutz. Die Aktualität dieses Problems ist durch zahlreiche Veröffentlichungen belegt. Die ersten systematischen Studien zur Abschätzung des Erdbebenrisikos wurden Ende der 60er und Anfang der 70er durchgeführt. Veröffentlichungen dieser Zeit (z. B. Cornell [3], Algermissen et al. [4], Grandori und Benedetti [5], Keilis-Borok et al. [6], Whitman et al. [7], Lomnitz und Rosenblueth [8]) legten den Grundstein für zukünftige Forschungsarbeit. In den folgenden Dekaden, insbesondere während des Internationalen Jahrzehnts zur Reduzierung der Naturkatastrophen (IDNDR, 1990-2000), wuchs die Aufmerksamkeit für diese Problematik. In der Folge weltweit aufgetretener zerstörerischer Erdbeben wurden weitere Methoden zur Bestimmung der seismischen Vulnerabilität und der Schaden- und Risikoanalyse auf verschiedenen geographischen Skalen entwickelt. Dies wird z. B. durch folgende Arbeiten belegt: PELEM [9], Chen et al. [10], [11], Kiremidjan [12], Papadopoulos und Arvanitides [13], King et al. [14], McCormack und Rad [15], Zonno et al. [16], FEMA-NIBS [17], Faccioli und Pessina [18], RADIUS [19], Shakhramanian et al. [20], Spence [21], Bendimerad [22], Fäh et al. [23], Coburn und Spence [24], Lang [25], Frolova et al. [26], Giovinazzi und Lagomarsino [27], Mouroux et al. [28], Schwarz et al. [29], Trendafiloski und Milutinovic [30], Di Pasquale et al. [31], Wang et al. [32]. Unterschiedliche Interpretatio-

nen von Risikokonzepten können in verschiedenen Publikationen gefunden werden, obgleich der allgemeine Zensus in der Definition des Risikos von der quantifizierten Möglichkeit des Verlusts übereinstimmt.

Prinzipiell sind zwei verschiedene Methoden in der Risikoforschung zu unterscheiden, deterministische und probabilistische Verfahren. Der wesentliche Unterschied liegt in den seismischen Eingangsparametern. Dabei verwendet erstgenannte Methode ein genau spezifiziertes Erdbebenszenario (Magnitude, Ort, Intensitätsverteilung, etc.), während letztgenanntes Verfahren auf einer probabilistischen seismischen Bewertung basiert. Dabei werden bei der deterministischen Methode die Effekte, die durch ein einzelnes Erdbeben auf eine Gemeinde oder Region wirken, berechnet. Dieses Verfahren wird häufig seitens der Versicherungsindustrie sowie von Katastrophenvorsorgeeinrichtungen herangezogen. Beide Herangehensweisen besitzen Vor- und Nachteile, die jedoch unterschiedliche Aspekte betreffen. In der Kombination beider Verfahren können sich diese jedoch ergänzen. In dieser Studie werden daher beide Methoden berücksichtigt. Eine übergreifende Diskussion und ein Vergleich zwischen probabilistischer und deterministischer Methode erfolgte von McGuire [33].

Die Auswahl einer entsprechenden Methodik zur Risikoanalyse, inklusive der Gefährdung, Vulnerabilität und der Analyse der der Gefährdung ausgesetzten Werte hängt vom geographischen Maßstab der Aufgabenstellung ab. Für lokale Studien zu städtischen Gebieten sollte der seismische Eingangsparameter die Einflüsse der lokalen Bodeneigenschaften berücksichtigen (Mikrozonierung). Der Gebäudebestand sowie die Sachwerte müssen detailliert in die Studie implementiert werden (Element für Element oder unter Zuhilfenahme von repräsentativen Objekten). Bei Studien auf regionaler oder nationaler Ebene, wie dies der Fall bei der vorliegenden Arbeit ist, werden weniger detaillierte Methoden angewandt.

Frühere Forschungsarbeiten zum Erdbebenrisiko in Teilen Deutschlands erfolgten durch Allmann et al. [34] und Schwarz et al. [29], [35], [36]. Die vorliegende Studie bezieht sich erstmalig auf die gesamte Fläche der Bundesrepublik Deutschland und vergleicht die verschiedenen Teile des Landes hinsichtlich ihrer Risikoexposition bezüglich Erdbeben.

2 Erdbeben­­tätigkeit und seismische Gefährdung

Die Erdbeben­­tätigkeit in Deutschland ist im globalen Vergleich niedrig, aber nicht vernachlässigbar. Parametrische nationale Erdbebenkataloge der historischen Beben­­tätigkeit wurden von Leydecker [37] und Grünthal [38] erstellt. Die Kataloge wurden 1990 ergänzt und vereinheitlicht. Grünthal und Wahlström [39] dehnten diesen Katalog auf Europa nördlich des Mittel­­me­­ra­­nen Raumes aus. Bei letzteren wurde die Stärke der Beben einheitlich in Form der Moment­­ma­­gnitude M_w , der heutzutage vorwiegend benutzten Definition für seismische Gefähr­­dungs­­ana­­lysen, kalibriert. Während der östliche Mittel­­me­­ra­­nen Raum die seismisch aktivste Region in Europa ist, befinden sich in Deutschland die aktivsten Zonen nördlich der Alpen bzw. des alpidischen Raumes; vorwiegend entlang des Rheins, z. B. der Oberrheingraben von Basel bis Frankfurt am Main über den Mittelrhein bis zum Nieder­­rheingebiet. Das stärkste Erdbeben fand in dieser Region 1356 in Basel ($M_w = 6,6$, $I = IX$) statt. Weitere historische Beben in Deutschland und der näheren Umgebung sind in Tabelle 1 aufgeführt. Eindeutige paläoseismische Belege prähistorischer Erdbeben im Nieder­­rheingebiet wurden von Camelbeeck und Meghraoui [40], Camelbeeck et al. [41] und Vanneste et al. [42] veröffentlicht und deuten auf Erdbeben­­stärken bis zu einer Moment­­ma­­gnitude von $M_w = 6,7$. Eine weitere Zone erhöhter seismischer Aktivität befindet sich im Osten von Sachsen/Thüringen. Norddeutschland weist die geringste seismische Aktivität auf, jedoch kann keine Region als aseismisch angesehen werden.

Bild 1. Erdbeben­­ge­­fährdung für die Bundesrepublik Deutschland in Form berechneter Intensitätswerte (EMS-98) für eine Nicht­­über­­schreitungswahrscheinlichkeit von 90 % in 50 Jahren; Epizentren tektonischer Erdbeben als Hintergrund [1], [43].
Fig. 1. Earthquake hazard in Germany in terms of European Macroseismic Scale (EMS-98) intensities for a non-exceedence probability of 90% in 50 years; epicentres of tectonic earthquakes as background [1], [43].

Die räumliche Verteilung der seismischen Gefährdung ist der Karte in Bild 1 zu entnehmen, in der makroseismische Intensitäten für eine Nicht­­über­­schreitungswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren dargestellt sind [1], [43]. Die Gefähr­­dungs­­da­­ten, auf denen die Karte basiert, sind für ein $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ Punktnetz berechnet worden. In dieser Studie werden die vorliegenden Werte interpoliert, um für jede der 13.490 verwaltungsmäßig selbstständigen Gemeinden in Deutschland repräsentative Intensitätswerte ausgeben zu können.

3 Seismische Vulnerabilität

Die seismische Vulnerabilität, wie sie in dieser Studie verwendet wird, berücksichtigt ausschließlich die Fähigkeit von Gebäuden und Strukturen, Schädigungen in struktureller Hinsicht durch Erdbeben zu erleiden. Es bestehen prinzipiell zwei unterschiedliche Vulnerabilitäten, die beobachtete und die vorausgesagte Vulnerabilität. Erstgenannte basiert auf den Statistiken der Schäden vergangener Erdbeben, während die zweite auf Untersuchungen zum erwarteten Verhalten der Struktur basiert, die auf ingenieurmäßigen Berechnungen und Konstruktionsmerkmalen bzw. bei Fehlen dieser Information auf dem Augenmaß des Ingenieurs beruhen [24]. Offensichtlich ist für Gebiete mit niedriger und moderater Erdbeben­­ge­­fährdung die zweite Möglichkeit die bessere, da im Regelfall keine oder nur ungenügende Beobachtungsdaten der Schäden vorliegen. Dies gilt insbesondere für Deutschland, da nur wenig detaillierte Beschreibungen oder Analysen früherer Schadensanalysen existieren. Dennoch hat sich ein wachsendes Interesse entwickelt, die seismische Vulnerabilität des existierenden Gebäudebestands besser zu verstehen (z. B. Sadegh-Azar [44], Schwarz et al. [29], [35], [36], [45], Meskouris und Hinzen [46], Raschke [47]). Die in diesen Studien gewonnenen Erfahrungen sind in die Vulnerabilitäts- und Schadensanalyse der vorliegenden Studie eingeflossen.

3.1. Vulnerabilitätsklassen und Vulnerabilitätsfunktionen für Gebäude

Objekt dieser Studie ist der Gebäudebestand der Wohnhäuser von Gemeinden in Deutschland. Wohngebäude überwiegen im Gebäudebestand der meisten Gemeinden. Aufgrund dessen kann deren strukturelle Vulnerabilität als Indikator zur Abschätzung des Verhaltens des gesamten Gebäudebestands auf regionaler Skala gesehen werden. Die Implementierung gewerblicher und infrastruktureller Bauwerke wurde in dieser Phase der Studie bewusst nicht vollzogen. Dies stellt für weitere Detaillierungsstufen des Modells eine wichtige Option dar.

Die Vulnerabilitätsanalyse basiert auf der EMS-98 [2]. Diese fußt auf sechs Vulnerabilitätsklassen; alphabetisch benannt von A (höchste seismische Vulnerabilität) bis F (niedrigste Vulnerabilität). Die Fähigkeiten der Gebäude, seismischen Einwirkungen zu widerstehen, werden in Widerstandsklassen eingeteilt. Damit weitere Faktoren (konstruktive und architektonische Eigenschaften sowie Alter, Qualität und lokale Boden-

eigenschaften), die das Verhalten der Gebäude neben dem Konstruktionstyp mitbestimmen, in die Klassifizierung mit einfließen können, wurde nicht nur die wahrscheinlichste Klasse genannt, weiterführend wurde eine Bandbreite möglicher Vulnerabilitätsklassen für jeden Gebäudetyp definiert. Die Vulnerabilitätsklassen A bis D repräsentieren den Gebäudebestand in Deutschland.

Für alle Vulnerabilitätsklassen wurde die Schadenswahrscheinlichkeitsmatrix (beschreibt die bedingte Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadens für eine bestimmte seismische Stärke) konstruiert und bezieht sich dabei auf die EMS-98, in der die Schadensverteilung durch „wenig“, „viele“ und „meistens“ in den Definitionen der jeweiligen Intensitätsgrade gegeben ist. Die quantitative Darstellung wird durch Klassen geprägt, die sich in schmalen Bereichen überlappen („wenig“ - 0-20%, „viele“ - 10-60% und „meistens“ - 50-100%) und beschreibt die wahrscheinliche Verteilung des Schadens an Gebäuden einer ähnlichen Vulnerabilität für bestimmte seismische Intensitäten. Die Definition der Intensität in der EMS-98 beschreibt die Schadensauftretenswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Vulnerabilitätsklassen lediglich für die höchsten Schadensstufen. Die Richtlinien zur EMS-98 empfehlen, dass in einem idealisierten Fall eine Normalverteilung des Schadensgrads d_i über dem mittleren Schadensgrad d_0 erwartet werden kann. Bild 2 zeigt eine idealisierte Schadensauftretenswahrscheinlichkeitsverteilung mit $d_0 = d_{\max} - 1,5$ und $\sigma = 0,75$, die in Übereinstimmung mit der Definition der EMS-98 modelliert wurde. Der Schadensgrad $d_{\max}$ korrespondiert dabei mit dem beobachteten Schaden einer bestimmten Vulnerabilitätsklasse von Gebäuden und einer bestimmten Intensität; d_0 und σ stellen dabei die Parameter der Normalverteilung (Mittelwert und Standardabweichung) dar. Die Bandbreite der Schadensgrade ist auf 0-5 beschränkt. Darum ändert sich die Verteilung, wenn der Mittelwert sich einer der Grenzen nähert, da diese nicht erweiterbar sind (vergleiche [2]).

Die Vulnerabilitätsfunktionen der verschiedenen Vulnerabilitätsklassen stellen die Intensität der Bodenbewegung der mittleren Schadensrate (Mean Damage Ratio), die das Verhältnis aus Reparaturkosten und Kosten für einen Neubau in Abhängigkeit der Intensi-

Bild 2. Idealisierte Schadenswahrscheinlichkeitsverteilung basierend auf der EMS-98.

Fig. 2. Idealized damage occurrence probability distributions on the base of the EMS-98.

Bild 3. Vulnerabilitätsfunktionen für die EMS-98 Vulnerabilitätsklassen A bis D.

Fig. 3. Vulnerability functions for the EMS-98 vulnerability classes A-D.

Tabelle 2. Klassifikation der Gebäudeschadensgrade und Schadensraten entsprechend der EMS-98.

Table 2. Classification of damage and damage ratio according to the EMS-98.

Schadensgrade	Schadensrate, %	Mittlere Werte, %
Grad 0: Keine Schäden	0	0
Grad 1: Unwesentliche bis leichte Schäden	0-1	0.5
Grad 2: Gemäßigte Schäden	1-20	10
Grad 3: Wesentliche bis schwere Schäden	20-60	40
Grad 4: Sehr schwere Schäden	60-100	80
Grad 5: Zerstörung	100	100

tät der Bodenbewegung darstellt, gegenüber. Die möglichen Schadensraten wurden den Schadensgraden der EMS-98 zugeteilt (Tabelle 2). Die entwickelten Vulnerabilitätsfunktionen der Vulnerabilitätsklassen A-D werden in Bild 3 präsentiert.

3.2. Vulnerabilitätsmodelle der Gemeinden

Die entwickelte großskalige Abschätzung, die auf eine vergleichende Analyse des seismischen Risikos für das gesamte Land zielt, berücksichtigt die administrativen Gemeinden durch Bildung von räumlichen Einheiten (Zellen). Vorausgesetzt werden dabei homogene Eigenschaften jeder Zelle. Dies bedeutet, dass alle Berechnungsparameter (einschließlich Gefährdung, Vulnerabilität und exponierte Werte) gleichmäßig in der Einheit verteilt gesehen werden.

Im Rahmen solch einer Untersuchung, die Gemeinden als Einheiten sieht, die einem Risiko ausgesetzt sind, liegt das Hauptaugenmerk eher bei der Vulnerabilitätszusammensetzung des gesamten Gebäudebestands und weniger bei dem Verhalten einzelner Gebäude unter seismischer Einwirkung. Dies begründet, dass die Zusammensetzung der Vulnerabilität eines Gebäudebestands als Kern dieser entwickelten Methode gesehen wird. Die Zusammensetzung der Vulnerabilität wird hier als die quantitative Verteilung der Gebäudetypen, die den verschiedenen Vulnerabilitätsklassen zugeteilt werden können, gesehen.

Zur Erstellung der zusammengesetzten Vulnerabilitätsfunktionen kamen Informationen aus Feldbeobachtungen, bestehenden Datenbanken sowie der Literatur zur Anwendung. Tabelle 3 enthält die Daten für die Gemeinden sowie der zugehörigen Gebäudebestände, die zur Erstellung der Vulnerabilitätsmodelle untersucht wurden. Die Gemeinden sind von unterschiedlicher Größe und befinden sich in von Erdbeben betroffenen Regionen. Die Daten für Köln und Schmöln (gelegen in einer Region mit erhöhter seismischer Aktivität südlich von Leipzig, siehe Bild 1), den Fallstudien im Rahmen des DFNK-Projekts (Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen) beruhen auf den Arbeiten von Schwarz et al. [29], [35], [36]. Im Falle der weiteren gelisteten Gemeinden (Tabelle 3) wurden Informationen über den Gebäudebestand durch einfache visuelle Verfahren gesammelt. Eines der Hauptanliegen dieser Feldstudien bestand, unter Berücksichtigung der Vulnerabilitätsklassifizierung der EMS-98, in der Aufnahme struktureller und architektonischer Eigenschaften der verschiedenen Gebäudetypen. Des Weiteren wurden die Feldstudien zur Ermittlung der Zusammensetzung der Vulnerabilität im Gebäudebestand unterschiedlich großer Gemeinden verwendet. Die ermittelten Daten dienen in Verbindung mit INFAS-Datenbeständen [48] als Basis zur Entwicklung des Vulnerabilitätsmodells. Eine Skizze der generellen Vorgehensweise zur Erstellung der Vulnerabilitätsanalyse des Gebäudebestands der Gemeinden kann Tabelle 4 entnommen werden.

Insbesondere die INFAS-Datenbank [48] enthält Informationen über die Zusammensetzung des Gebäudebestands jeder Gemeinde in Deutschland; so sind die verschiedenen Gebäudetypen (Ein- oder Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Terrassenhaus, Blockhaus, Reihenhaushaus, Hochhaus, Bauernhaus, Bürogebäude und industrielle Anlagen) vermerkt. Des Weiteren sind das Alter und die Qualität des Gebäudes in der Datenbank enthalten, wie die Anzahl der Gebäude der verschiedenen Klassen sowie die Anteile in Bezug auf den gesamten Gebäudebestand, - obgleich ohne Interkorrelation der verschiedenen Eigenschaften. Zum gegenwärtigen Stand der Arbeit wird nur die Angabe über den Gebäudetyp verwendet; Informationen zu Alter und Qualität der Struktur können zur Verfeinerung des Modells benutzt werden. Die INFAS-Datenbank stellt keinen direkten Bezug zur seismischen Gefährdung der Gebäude her. Deshalb müssen die INFAS-Daten zur Klassifizierung der Vulnerabilität benutzt werden um eine Risiko- und Schadensanalyse zu ermöglichen. Die oben erwähnten Gebäude werden in Abhängigkeit ihrer Baumaterialien, Konstruktionsweisen und architektonischen Eigenschaften analysiert. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren und unter Verwendung der EMS-98-Vulnerabilitätsklassifikation wurde die Verteilung der Vulnerabilität für alle Wohngebäudeklassen berechnet (Tabelle 5). Vereinfachend wird angenommen, dass die modellierten Vulnerabilitätsdiagramme repräsentativ für alle Gemeinden Deutschlands sind.

Die Verbindung der Vulnerabilitätsverteilungsdiagramme der verschiedenen Gebäudetypen mit den

Tabelle 3. Liste der Gemeinden, für die Vulnerabilitätsmodelle entwickelt wurden; die Gemeindeklassen werden in Tabelle 6 wiedergegeben und basieren auf der INFAS Datenbank [48].
Table 3. List of communities, the building stock of which was investigated for constructing the vulnerability composition models; the community classes are given in Table 6 and are based on the INFAS Databank [48].

Gemeinde	Ort		Gemeindeklasse
	Breite	Länge	
Albstadt	48°13'N	9°00'E	P4
Ettlingen	48°55'N	8°25'E	P4
Haßmersheim	49°18'N	9°08'E	P3
Karlsruhe	49°00'N	8°23'E	P4
Köln	50°56'N	6°55'E	P5
Lörrach	47°37'N	7°39'E	P4
Neckarzimmern	49°19'N	9°08'E	P2
Offenau	49°14'N	9°09'E	P2
Schmöln	50°54'N	12°22'E	P3
Simonswald	48°06'N	8°03'E	P3
St. Peter	48°01'N	8°01'E	P2
Waldkirch	48°05'N	7°57'E	P3

Tabelle 4. Schema zur Vulnerabilitätsanalyse des Gebäudebestands der Gemeinden.

Table 4. Scheme of vulnerability analysis for the building stock of communities

Tabelle 5. Vulnerabilitätsverteilung der unterschiedlichen Wohngebäudetypen.
Table 5. Vulnerability distribution of the different types of residential buildings.

Wohngebäudetyp	Vulnerabilitätsverteilungsmodell
	D C B A
Wohnhäuser im ländlichen Bereich
Ein- oder Zweifamilienhäuser
Reihenhäuser
Terrassenhäuser
Mehrfamilienhäuser
Blockhäuser
Hochhäuser

INFAS-Daten, die die Zusammensetzung im Gebäudebestand der Gemeinden beschreiben, ermöglicht die Bewertung der Vulnerabilitätszusammensetzung für alle Gemeinden und die Konstruktion der zugehörigen Vulnerabilitätshistogramme. Auf diese Weise wird das Verfahren zur Vulnerabilitätsanalyse für alle Gemeinden des Landes angewandt.

Wie zuvor angemerkt, wird der existierende Gebäudebestand in Deutschlands Gemeinden durch die Vulnerabilitätsklassen A-D nach der EMS-98 repräsentiert. Die Klassen B und C überwiegen, jedoch ist die Zusammensetzung der unterschiedlichen Gemeinden verschieden. Die mittlere strukturelle Vulnerabilität des Gebäudebestands wurde für jede der 13.490 Gemeinden im Land berechnet und ein entsprechendes GIS Layer generiert. Es hat sich herauskristallisiert, dass die mittleren Vulnerabilitäten der Gemeinden innerhalb eines Intervalls, dessen Grenzen denen der Vulnerabilitätsklassen B und C entsprechen, variieren. Aufgrund dessen ist zu erwarten, dass die integrale Vulnerabilitätsabschätzung für die Gemeinden in das

Intervall zwischen den Vulnerabilitätsfunktionen, die den Klassen B und C entsprechen, fallen wird (Bild 3). Die Kombination der Vulnerabilitätsmodelle mit den seismischen Eingangsparametern im Rahmen des entwickelten Algorithmus ermöglicht die Berechnung des zu erwartenden Schadens im Gebäudebestand für jede Gemeinde. Weiter ist es möglich die mittlere Schadensrate (Mean Damage Ratio) als integralen Parameter zu berechnen. Die mittlere Schadensrate für den gesamten Gebäudebestand einer Gemeinde wird als das arithmetische Mittel aller Gebäude der jeweiligen Gemeinde gesehen. Statistische Analysen bestätigen, worauf *Schwarz et al.* [29], [35], [36] auch hinweisen, dass der Gebäudebestand bevölkerungsreicher Gemeinden (urbane Gebiete) generell durch eine Zusammensetzung geringerer Vulnerabilität charakterisiert ist als kleinere Gemeinden (ländliche Regionen).

3.3. Repräsentative Vulnerabilitätsmodelle

Der bestätigte Sachverhalt einer relativ hohen strukturellen Vulnerabilitätszusammensetzung in kleinen ländlichen Gemeinden im Vergleich mit größeren städtischen Gemeinden legt die Herangehensweise zur Abschätzung der Vulnerabilität auf einer größeren Ebene (national oder regional) nahe, die besonders nützlich in Fällen sein kann, in denen keine detaillierten Informationen zum Gebäudebestand vorliegen. Wie in früheren Publikationen [49], [50], [51] beschrieben, basiert die Methode auf der Einteilung der Gemeinden in Bevölkerungsklassen.

Die Aufteilung der 13.490 deutschen Gemeinden in fünf Bevölkerungsklassen sowie die dazugehörigen zusammengesetzten Vulnerabilitätsmodelle werden in Tabelle 6 vorgestellt. Für jede der Gemeindeklassen wird der Gebäudebestand durch die aus den Vulnerabilitätsklassen der EMS-98 zusammengesetzten Vulnerabilitätsmodelle dargestellt.

Für die repräsentativen Gemeindeklassen wurden die Schadenswahrscheinlichkeitsmatrizen durch Kombination der strukturellen Vulnerabilitätsklassen mit den zusammengesetzten Vulnerabilitätsmodellen konstruiert. Das Histogramm in Bild 4 illustriert die wahrscheinliche Verteilung der Schadensgrade in dem

Tabelle 6. Zusammensetzung der Vulnerabilitäten für die fünf repräsentativen Klassen von Gemeinden gemäß ihrer Bevölkerungsanzahl.

Table 6. Vulnerability composition models of the buildings stock for the five representative population classes of communities.

Klassen von Gemeinden gemäß ihrer Einwohnerzahl	Prozentsatz der Gebäude entsprechend den verschiedenen Vulnerabilitätsklassen (EMS-98)			
	A	B	C	D
P1 (< 300)	Wenig	Meistens	Wenig	Wenig
P2 (300 – 3 000)	Wenig	Meistens	Viele	Wenig
P3 (3 000 – 30 000)	Wenig	Viele	Viele	Wenig
P4 (30 000 – 300 000)	Wenig	Viele	Meistens	Wenig
P5 (> 300 000)	Wenig	Wenig	Meistens	Wenig

Quantitative Definitionen: “Wenig” – 0 – 20%, “Viele” – 10 – 60%, “Meistens” – 50 – 100%

Bild 4. Schadenverteilungsdiagramme für die repräsentativen Gemeindeklassen der unterschiedlichen Intensitäten – VI (a), VII (b) und VIII (c).

Fig. 4. Damage distribution diagrams for the representative community classes for the seismic input corresponding to different intensity – VI (a), VII (b) and VIII (c).

Gebäudebestand der fünf verschiedenen Bevölkerungsklassen für drei Grade seismischer Einwirkung (Intensitäten VI, VII, VIII). Die Benutzung der Histogramme erlaubt zum einen die Abschätzung der mittleren Schadensgrade und zum anderen die mittlere Schadensrate für den gesamten Gebäudebestand durch Bestimmung des arithmetischen Mittels entsprechender Gebäude aus dem gesamten Gebäudebestand in den betroffenen Gebieten. Die entsprechenden Vulnerabilitäts-/Schadensfunktionen wurden durch die Dar-

stellung der mittleren Schadensrate über der seismischen Intensität (Bild 5) dargestellt. Die seismische Intensität wird hier als Mittelwert der seismischen Einwirkung für das gesamte Gebiet der betroffenen Gemeinde verstanden. Es kann erkannt werden, dass die Vulnerabilitäts-/Schadensfunktionen für alle repräsentativen Gemeindeklassen (Bild 5) in dem Intervall zwischen den Vulnerabilitätsfunktionen der Klassen B und C (Bild 3) zu finden sind.

4 Werte

Starke Erdbeben können Einwirkungen auf verschiedene Aspekte des gesellschaftlichen Lebens hervorrufen. Das Risiko kann sich dabei auf strukturelle (Gebäudeschäden), soziale (Verletzte und Tote) und finanzielle Verluste beziehen. In dieser Studie werden nur primäre ökonomische Verluste aufgrund struktureller Schäden am Gebäudebestand berücksichtigt. Es kann angenommen werden, dass Wohngebäude den Gebäudebestand dominieren; darum ist es möglich, die Schäden an diesen als passenden Indikator für die gesamten Erdbebeneinwirkungen auf eine Gemeinde zu identifizieren. Eine vollständigere Darstellung des zu beobachtenden Schadens könnte erreicht werden, indem weitere Elemente der strukturellen Umgebung (z. B. der gewerblichen/industriellen Strukturen, Infra-

Bild 5. Schadensfunktionen für die repräsentativen Gemeindeklassen.

Fig. 5. Vulnerability (damage) functions for the representative community classes.

struktur) sowie anderer möglicher Folgen einer Erdbebeneinwirkung, wie z. B. Verletzte, Tote, Schäden an Gebäudeinhalten und Geschäftsunterbrechung, einbezogen werden. Dies wird durch diese Studie bisher nicht berücksichtigt.

Informationen zu den Wiederherstellungskosten in allen deutschen Gemeinden wurden durch die Asset Estimation Gruppe des CEDIM ermittelt [52] und kam ebenso in den Analysen weiterer Risikoarten des Projekts zum Einsatz. Dies stellt eine einheitliche Basis zum quantitativen Vergleich des Verlusts, wie dies z. B. für Köln veröffentlicht wurde [53], zur Verfügung. Die Abschätzungen der Werte basieren auf verfügbaren statistischen Daten und sind in Form gesamter Wiederbeschaffungskosten für das Jahr 2000 quantifiziert worden. In der vorliegenden Studie sind entsprechend der verwendeten Gebäudeklassen lediglich die Wiederbeschaffungskosten der Wohngebäude zur Anwendung gekommen.

Die gesamten Werte einer Gemeinde beruhen auf der Anzahl der Bewohner und variieren zwischen wenigen Millionen Euro im Falle kleiner Dörfer und mehrere Milliarden Euro im Falle großer Städte. Der mittlere Wert μ und die Standard Abweichung σ der erwarteten Verteilung der Wiederherstellungskosten je Einwohner einer Gemeinde für das gesamte Land sind $\mu = 42.600 \text{ €}$ und $\sigma = 10.700 \text{ €}$. Die Parameter der Gemeinden, die in den seismisch gefährdeten Regio-

nen liegen (entsprechend zu den Klassen 0-3 der nationalen Erdbebennorm DIN 4149, 2005) sind $\mu = 46.000 \text{ €}$ und $\sigma = 10.200 \text{ €}$. Die Verteilung der exponierten Werte für Deutschlands Gemeinden wird in Bild 6 dargestellt.

5 Mögliche seismische Schäden und seismisches Risiko

Zur Untersuchung der möglichen seismischen Schäden und Verluste potentieller zukünftiger Erdbeben wurden die Gefährdung, die Vulnerabilität und die Werten in eine GIS-Plattform integriert. Die Schadens- und Verlustabschätzungen, die in dieser Veröffentlichung präsentiert werden, wurden unter Verwendung der in Kapitel 3.3 vorgestellten Vulnerabilitätsmodelle erstellt, die auf den repräsentativen Gemeindeklassen beruhen.

Die Verbindung der seismischen Gefährdung (Kapitel 2) mit der Verteilung der Gemeinden der verschiedenen Klassen sowie der dazugehörigen Vulnerabilitätsmodelle (Kapitel 3.3) ermöglicht die Ermittlung der Verteilung des möglichen Schadens an dem Wohngebäudebestand für jede Gemeinde als Verteilung der potentiell beschädigten Gebäude mit unterschiedlichen Schädigungsgraden (analog Bild 4), die durch die unterschiedliche Gefährdungsparameter (Bild 1) hervorgerufen werden. Der mittlere Scha-

Bild 6. Verteilung der der Gefährdung ausgesetzten Werte (Wiederherstellungskosten für Wohngebäude in Mio Euro) nach Gemeinden [52].

Fig. 6. Distribution of exposed values in terms of replacement costs for residential buildings (millions of euro) in communities of Germany [52].

Bild 7. Geschätzte Verteilung der mittleren Schadensrate (Prozentsatz) der Gemeinden für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90 % in 50 Jahren.

Fig. 7. Estimated distribution of mean damage ratio (percentage) in communities for a non-exceedence probability of 90% in 50 years.

Tabelle 7. Liste der Gemeinden mit den höchsten Werten des Erdbebenrisikos; geschätzte Verluste in Mio. Euro für den Wohngebäudebestand für eine Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeit von 90 % in 50 Jahren.
Table 7. List of communities with the highest risk values; estimated losses due to probable damage to the residential building stock for a 90% non-exceedence probability in 50 years.

Gemeinde	Ort	Bevölkerung (tausend)	Gemeinde- klasse	Seismische Gefährdung (EMS)	Mittlere Schadensrate (%)	Seismisches Risiko (Mio Euro)
Köln	50°56'N, 6°55'E	968	P5	VI-VII	1,65	790*
Aachen	50°46'N, 6°05'E	246	P4	VII-VIII	5,19	560
Tübingen	48°31'N, 9°03'E	82	P4	VII-VIII	12,1	470
Mönchengladbach	51°11'N, 6°26'E	263	P4	VII-VIII	3,87	440
Reutlingen	48°29'N, 9°12'E	111	P4	VII-VIII	8,10	430
Stuttgart	48°47'N, 9°11'E	587	P5	VI-VII	1,40	400
Albstadt	48°13'N, 9°00'E	47	P4	VIII-IX	15,2	375
Düren	50°48'N, 6°28'E	92	P4	VII-VIII	8,21	330
Freiburg im Breisgau	47°59'N, 7°50'E	208	P4	VII	2,96	290
Konstanz	47°40'N, 9°10'E	79	P4	VII-VIII	6,59	280
Karlsruhe	49°00'N, 8°23'E	280	P4	VI-VII	1,70	255
Lörrach	47°37'N, 7°39'E	46	P4	VII-VIII	8,94	220
Balingen	48°16'N, 8°51'E	34	P4	VII-VIII	12,8	210
Frankfurt am Main	50°08'N, 8°40'E	641	P5	VI-VII	0,66	200
Kerpen	50°52'N, 6°41'E	64	P4	VII-VIII	7,65	195

* In [53] wurde für Köln für das auch hier verwendete Gefährdungsniveau ein Schaden von ca. 600 Mio. Euro ermittelt.

densgrad bzw. die mittlere Schadensrate bestimmt die integrale Schadensabschätzung der Gemeinden. Die Verteilung der mittleren Schadensrate wurde unter Verwendung repräsentativer Vulnerabilitätsfunktionen (Bild 5) berechnet und wird in Bild 7 dargestellt.

Die Verteilung des seismischen Risikos ergibt sich aus der Kombination der Schadensabschätzung (Bild 7) mit den Werten (Bild 6). Die Karte des möglichen seismischen Schadens und des seismischen Risikos stimmen in der Wahrscheinlichkeit mit der Gefährdungskarte in Bild 1 überein (d. h., eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren).

Ein visueller Vergleich der Karten in Bild 1, 7 und 8 zeigt, dass naturgemäß die Verteilung des möglichen Schadens generell an die Verteilung der Gefährdung gebunden ist. Klare Unterschiede zwischen der Schadens- und Risikokarte sind trotzdem zu bemerken, da die Schadenskarte (Bild 7) die mittlere Schadensrate des Gebäudebestands der Gemeinden zeigt, während in Bild 8 die Zahl der Gebäude und der Betrag der exponierten Werte einer Gemeinde berücksichtigt.

Die beobachteten Abschätzungen der mittleren Schadensrate variieren für die verschiedenen Gemeinden zwischen 0 und 20% bei der verwendeten Wahrscheinlichkeitsstufe, die einer mittleren Wiederkehrperiode von 475 Jahren entspricht. Die entsprechenden Risikoabschätzungen variieren von null bis zu mehreren hundert Millionen Euro (Bild 8). Im Falle der hier berücksichtigten Gefährdungswahrscheinlichkeit besteht für Gebiete, in denen die zu erwartende Intensität V oder weniger beträgt, keine Gefahr, dass die Gebäude Schaden erleiden. Jedoch würde der Schadensgrad für ein höheres Gefährdungsniveau weiter ansteigen. Kein Risiko existiert hingegen in unbewohnten Regionen, da sich dort keine gefährdeten Werte befinden. Im Gegensatz dazu sind die höchsten Risikowerte (Bild 8) in Gebieten mit einer hohen seismischen Gefährdung

sowie einer großen Konzentration an exponierten Werten zu finden. Die 15 Gemeinden mit den höchsten erwarteten Risikowerten durch Erdbeben werden in Tabelle 7 aufgeführt.

6 Szenarien und Modellvalidierung

Die Möglichkeit einer vergleichenden Analyse der landesweiten Risikoverteilung zur Identifizierung der am meisten gefährdeten Regionen ist durch die probabilistische gefährdungsbasierte Untersuchung und die Kartierung des seismischen Risikos gegeben. Zur Abschätzung des möglichen Schadens und der möglichen Verluste einzelner seismischer Ereignisse kann die Szenarienbildung nützlich sein. In dieser Studie wurde die deterministische Methode zur Bild von Szenarien zur Validierung der Vulnerabilitätskomposition des Modells benutzt. Der Schaden und die ökonomischen Schäden der jüngsten drei Erdbeben liefern die nötigen Informationen zur Validierung. Daten zum Albstadt-Beben (3. September 1978), Roermond-Erdbeben (13. April 1992) und Waldkirch-Beben (5. Dezember 2004) (Tabelle 8) wurden hinzugezogen.

Die berechneten Schäden reagieren in Bezug auf ihre Höhe sehr empfindlich auf den Grad der Bodenbewegung. Die seismischen Eingangsparameter wurden unter Verwendung vorhandener makroseismischer Daten, die in den betroffenen Gebieten gesammelt wurden, modelliert. Im Falle des Roermond-Erdbebens wurden Daten verwendet, die von Haak et al. [55] und Meidow und Ahorner [56] erhoben worden sind. Die Verteilung der beobachteten Daten (Bild 9) wurden mit dem räumlichen Netz der Gemeindegrenzen verbunden. Die seismischen Eingangsparameter der jeweiligen Gemeinden wurden als Mittel der innerhalb der Gemeindegrenzen beobachteten Intensitäten berechnet. Die repräsentativen Intensitätswerte wurden

Bild 8. Geschätzte Verteilung der seismischen Risiko (Mio Euro) der Gemeinden für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90 % in 50 Jahren.

nur für die betroffenen Gebiete ermittelt. Die Einwirkungen des Erdbebens in den Niederlanden wurden hierbei nicht berücksichtigt. Da detaillierte makroseismische Daten zu dem Albstadt-Beben sowie dem Waldkirch-Beben fehlen und unter Berücksichtigung, dass die vorgestellte Methode eine erste Schadens- und Verlustanalyse in Minutenschnelle zur Verfügung stellen soll, wurden die makroseismischen Felder unter Verwendung von regionalen empirischen Funktionen

ermittelt, die die Abschwächung der seismischen Intensität als Funktion der Magnitude, Tiefe und der Epizentraldistanz berücksichtigen [57]. Die Intensitäten wurden für die Zentren der jeweiligen betroffenen Gemeinden berechnet. Der Einfluss der lokalen Bodeneigenschaften sowie mögliche Standorteffekte sind nicht berücksichtigt worden. Die modellierte Intensitätsverteilung wird grafisch dargestellt in Bild 10.

Zur Berechnung des Schadens und des Verlusts wurden die modellierten seismischen Felder mit den Vulnerabilitäts- und Wertedaten überlagert. Der Schaden an den betroffenen Gebäudebeständen wurde unter Verwendung der in Kapitel 3.3 vorgestellten zusammengesetzten Vulnerabilitätsmodelle berechnet. Ein rückblickender Vergleich soll die Veränderungen der letzten Jahre in den Gemeinden (inklusive der Bevölkerung, des Gebäudebestands und des Preisniveaus) berücksichtigen. Obgleich sich eine Validierung anhand zeitlich weiter zurückliegenden Beben aufgrund der sich stark ändernden Gebäudestruktur als sehr schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, gestaltet. In dem aktuell vorliegenden Datensatz sind nicht alle dieser Daten verfügbar. Daher wurden für die Berechnung Annahmen getroffen. Insbesondere wurde die Bevölkerungsverteilung in den einzelnen Gemeinden aus der vorliegenden Datenbank entnommen. Die Wiederherstellungskosten für Gebäude (Kapitel 4) wurde ohne Berücksichtigung der Entwicklung der vergangenen Jahre übernommen. Aufgrund dieser Annahmen kann das Ergebnis dieser Modellberechnungen nur als erste Näherung der möglichen Verluste für den Fall gelten, dass sich ein ähnliches Erdbeben wiederholen würde.

Die zu beobachtenden Resultate der drei Erdbeben werden in Tabelle 8 präsentiert. Die Verluste durch das Roermond-Erdbeben werden dabei lediglich für die betroffenen deutschen Regionen angegeben.

Ein Vergleich der berechneten Verlustabschätzungen mit den zu den jeweiligen Beben verfügbaren Daten aus den beobachteten Erdbebenverlusten (z. B. [58], [59]) zeigt, dass die zu erwartenden Schäden adäquat mit der hier vorgestellten Methode, unter Berücksichtigung der

Bild 9. Verteilung der beobachteten seismischen Intensität infolge des Roermond-Erdbebens vom 13. April 1992.

Fig. 9. Distribution of observed seismic intensities from the Roermond earthquake (13.04.1992).

Bild 10. Modellierte Intensitätsverteilung für das Szenario-Erdbeben in Albstadt vom 3. September 1978.
Fig. 10. Distribution of seismic intensities resulting from the modelled scenario earthquake in Albstadt (03.09.1978).

durch die großskaligen Verfahren begrenzten Genauigkeiten geschätzt werden können. Offensichtlich würde eine detaillierte Betrachtung des Problems (in der Skalierung der Mikrozonierung) die Genauigkeit der Ergebnisse verbessern. Insbesondere dürfte eine genauere Berücksichtigung der Intensitätsverteilung, die lokale Bodeneigenschaften berücksichtigt und synthetisches Modellieren implementiert, hilfreich sein.

7 Folgerungen

Eine GIS basierte Methode zur Untersuchung der seismischen Vulnerabilität, des seismischen Schadens und des seismischen Risikos auf nationaler Ebene

wurde für Deutschland entwickelt und eingesetzt. Der Schaden basiert auf der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse und der zusammengesetzten Vulnerabilitätsmodelle des Wohngebäudebestands der Gemeinden. Zur Berechnung des seismischen Risikos wurden die exponierten Werte (ausgedrückt durch die jeweiligen Wiederherstellungskosten der Wohngebäude) mit der zu beobachtenden Schadensverteilung kombiniert. Alle Gemeinden werden durch Bevölkerungsklassen bei der Vulnerabilitätsbestimmung repräsentiert, wobei bei der Gefährdung und den Sachwerten die individuellen Werte zum Einsatz kommen.

Es ist eine Tendenz zu höherer mittlerer struktureller Vulnerabilität des Gebäudebestands für kleinere Gemeinden zu erkennen. Daher ist zu erwarten, dass die mittlere Schadensrate in kleineren Gemeinden die von größeren Gemeinden übertreffen, wenn von einer gleichen Höhe der Gefährdung ausgegangen wird. Es ist auch zu erwarten, dass es Gemeinden im Bestand gibt für die die hier vorgestellte Methode, die auf den vorgestellten Bevölkerungsklassen basiert, nicht adäquat ist. Die Werte der mittleren Schadensrate der Gemeinden wurden zwischen 0 und 20% für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren geschätzt.

Die niedrigeren zu erwartenden Schäden der größeren Gemeinden im Vergleich mit nahe gelegenen (d. h. einer ähnlichen Intensität ausgesetzten) kleineren Gemeinden werden in Bild 7 dargestellt und kehren sich aufgrund der höheren exponierten Werte bei höheren seismischen Risikowerten um (Bild 8). Der Effekt der niedrigeren Vulnerabilität wird durch die höheren Sachwerte für diese Gemeinden dadurch in der Risikokarte mehr als kompensiert. Die vollständige Kombination aus Gefährdung, Vulnerabilität und Sachwerte bestimmt das Risiko. Die zu beobachtenden Werte des seismischen Risikos variieren dabei zwischen null und hunderten Millionen Euro. Die Gemeinden mit den höchsten Risikowerten werden in Tabelle 7 aufgelistet.

Die Validierung der berechneten Daten mit den zu beobachtenden Ergebnissen einiger Schadenerdbeben überprüfte die Robustheit der entwickelten Methode und ebnet den Weg zur Abschätzung möglicher Schäden und Verluste zukünftiger Erdbeben.

Die Abschätzung des Schadens und des Risikos ist mit unterschiedlichen Unsicherheiten in den verschiedenen

Tabelle 8. Vergleich von beobachteten monetären Verlusten bei jüngsten Schadensbeben mit berechneten Werten; Parameter der Beben nach dem Bebenkatalog [39] bzw. für das Beben von 2004 nach dessen Aktualisierung.

Table 8. Comparison of calculated losses with observational data from past earthquakes; earthquake parameters from the updated catalogue [39].

Erdbeben	Erfasste monetäre Verluste total/Privatgebäude (in Mio Euro)	Geschätzte Verluste für private Gebäude bei heutigem Bebauungsstand (in Mio Euro)
Albstadt, 3. September 1978 ($M_w = 5.1$, $h = 7$ km, $I_{max} = VII-VIII$)	ca. 140 / unbekannt	172
Roermond, 13. April 1992 ($M_w = 5.3$, $h = 18$ km, $I_{max} = VII$) (in Deutschland)	36 / 5	13
Waldkirch, 5. Dezember 2004 ($M_L = 5.4$, $M_w = 4.8$, $h = 12$ km, $I_{max} = VI$)	ca. 3 / unbekannt	0.8

Komponenten verbunden, z. B. der Gefährdung und der Vulnerabilität zur Berechnung des Schadens sowie der Gefährdung, der Vulnerabilität und der Sachwerte zur Berechnung des Risikos. Diese Unsicherheiten wurden im Zuge dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die entwickelte Methode führt großskalige Untersuchungen zu dem seismischen Risiko unter Benutzung relativ großer Berechnungszellen, den Gemeinden, aus. Die Verwendung kleinerer Berechnungszellen (z. B. Postleitzahlen innerhalb städtischer Gebiete) würde zu differenzierteren Ergebnissen führen. Ähnliches gilt für den Szenario-Ansatz - auch hier würden detaillierte und differenziertere Eingangsparameter die Kalibrierung der probabilistischen Risikoabschätzung durch aktuelle Beobachtungen verbessern.

Das entwickelte Modell und die Methode stellen eine Möglichkeit dar, auf regionaler Skala die zu erwartenden Schäden zeitnah nach zukünftigen Ereignissen abschätzen zu können. Mit Hilfe des szenariobasierten Ansatzes in Kombination mit Online-Informationen zum seismischen Ereignis können in wenigen Minuten Schadens- und Verlustschätzungen bereitgestellt werden. Wertvolle Informationen zur zu erwartenden Schadensverteilung würden gestatten, die Schwere von Bebenschäden in aktuell betroffenen Gebieten zu quantifizieren und diese an Einrichtungen des Katastrophenschutzes weiterzuleiten.

8 Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM www.cedim.de) - eine gemeinsame Einrichtung des GeoForschungsZentrum (GFZ Potsdam) und der Universität Karlsruhe (TH) - angefertigt. Die Autoren bedanken sich beim GFZ und der Universität Karlsruhe (TH) für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. and Lenhardt, W. A.: Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz. Bautechnik, 10, 753-767, 1998.
- [2] Grünthal, G. (editor): European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15, Conseil de l'Europe, Luxembourg, 99 pp., 1998.
- [3] Cornell, C. A.: Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606, 1968.
- [4] Algermissen, S. T., Rinehart, W., Dewey, J., Steinbrugge, K. V., Lagorio, H. J., Degenkolb, H. J., Cluff, L. S., McClure, F. E., Scott, S. and Gordon, R. F.: A study of earthquake losses in the San Francisco Bay Area: Data and analysis. Washington, D.C., NOAA, 1972.
- [5] Grandori, G. and Benedetti, D.: On the choice of the acceptable seismic risk. Earthq. Eng. Struct. Dyn., 2, 3-9, 1973.
- [6] Keilis-Borok, V. I., Kantorovich L. V. and Molchan G. M.: Seismic risk and principles of seismic zoning. In: Computational and Statistical Methods for Interpretation of Seismic Data, Moscow, Nauka, (in Russian). 3-20, 1973.
- [7] Whitman, R. V., Biggs, J. M., Brennan, J. E., Cornell, C. A., Neufville, R.L. and Vanmarcke, E. H.: Seismic design decision analysis. ASCE Struct. Eng. J., 101, 1067-1084, 1975.
- [8] Lomnitz, C. and Rosenblueth, E. (editors): Seismic Risk and Engineering Decisions. Elsevier, Amsterdam, 425 pp., 1976.
- [9] PELEM (Panel of Earthquake Loss Estimation Methodology): Estimating Losses from Future Earthquakes. National Academy Press, 1989.
- [10] Chen, Y., Chen, X. L., Fu, Z. X., Ying, Z. Q. and Yang, M. D.: Estimating Losses from Earthquakes in China in the Forthcoming 50 Years. Seismological Press, Beijing, 1992.
- [11] Chen, Y., Chen, Q. F., Liu, J., Chen, L. and Li, J.: Seismic Hazard and Risk Analysis: A Simplified Approach. Science Press, Beijing, 2002.
- [12] Kiremidjian, A.: Methods for regional damage estimation. In: Proc. of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (10 WCEE), Madrid, Spain, July 19-25, 1992, Vol. 11, 6753-6762, Balkema, Rotterdam, 1994.
- [13] Papadopoulos G.A. and Arvanitides A.: Earthquake Risk Assessment in Greece. In: V. Schenk (editor): Earthquake Hazard and Risk. Kluwer Acad. Publ., 221-229, 1996.
- [14] King, S. A., Kiremidjian, A. S., Basöz, N., Law, K., Vucetic, M., Doroudian, M., Olson, R. A., Eidinger, J. M., Goettel, K. A. and Horner, G.: Methodologies for evaluating the socio-economic consequences of large earthquakes. Earthq. Spectra, 13, 565-584, 1997.
- [15] McCormack, T. C. and Rad, F. N.: An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21, Earthq. Spectra, 13, 605-622, 1997.
- [16] Zonno, G., Cella, F., Luzzi, L., Menoni, S., Meroni, F., Ober, G., Pergalani, F., Petrini, V., Tomasoni, R., Carrara, P., Musella, D., García-Fernández, M., Jiménez, M. J., Canas, J. A., Al faro, A. J., Barbat, A. H., Mena, U., Pujades, L. G., Soeters, R., Terlien, M. T. J., Cherubini, A., Angeletti, P., Di Benedetto, A., Caleffi, M., Wagner, J. J. and Rosset, P.: Assessing seismic risk at different geographical scales: concepts, tools and procedures. In: Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, 1998.
- [17] FEMA-NIBS: Earthquake Loss Estimation Methodology, HAZUS 99, Technical Manual, Federal Emergency Management Agency and National Institute of Building Sciences, Washington, 1999.
- [18] Faccioli, E. and Pessina, V.: The Catania Project: Earthquake damage scenarios for high risk area in the Mediterranean. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, 2000.
- [19] RADIUS: Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters. Geneva, Switzerland: IDNDR Secretariat, United Nations, 2000.

- [20] *Shakhramanian, M. A., Larionov, V. I., Nigmatov, G. M. and Sutshev, S. P.*: Assessment of the seismic risk and forecasting consequences of earthquakes while solving problems of population rescue (theory and practice), Moscow, 180 pp., 2000.
- [21] *Spence, R.*: Recent earthquake damage in Europe and implications for loss estimation methodologies. In: Elnashai, A. S. and Antoniou, S. (editors): Implications of Recent Earthquakes on Seismic Risk, Japan-UK Seismic Risk Forum, 3rd Workshop, London, 6-7 April, 2000.
- [22] *Bendimerad, F.*: Modeling and quantification of earthquake risk: Application to emerging economies. In: P. R. Kleindorfer and M. R. Sertel (editors): Mitigation and Financing of Seismic Risks, Kluwer Acad. Publ., 13-39, 2001.
- [23] *Fäh, D., Kind, F., Lang, K. and Giardini, D.*: Earthquake scenarios for the city of Basel. Soil Dyn. Earthq. Engrg. 21, 405-413, 2001.
- [24] *Coburn, A. and Spence, R.*: Earthquake Protection, Second edition. John Wiley & Sons Ltd., 420 pp., 2002.
- [25] *Lang, K.*: Seismic vulnerability of existing buildings. Dissertation, Inst. of Struct. Eng., Swiss Federal Inst. Technology, Zurich, 2002, 196 pp.
- [26] *Frolova, N., Larionov, V., Sushchev, S. and Ugárov, A.*: Extremum system for earthquake risk and loss assessment. In: Proc. of the Conference Skopje Earthquake – 40 Years of European Earthquake Engineering, Ohrid, Macedonia, 2003.
- [27] *Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S.*: A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. In: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1-6 August, 2004.
- [28] *Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., Masure Ph. and the RISK-UE team*: The European RISK-UE Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios. In: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1-6 August, 2004.
- [29] *Schwarz, J., Maiwald, H. and Raschke, M.*: Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenpotentiale. In: B. Merz and H. Apel (editors): Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK) Abschlussbericht, 188-200, 2004.
- [30] *Trendafiloski, G. and Milutinovic, Z.*: GIS-oriented method for elaboration of probabilistic earthquake scenarios. In: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1-6 August, 2004.
- [31] *Di Pasquale, G., Orsini, G. and Romeo, R. W.*: New developments in seismic risk assessment in Italy. Bull. Earthq. Eng., 3, 101-128, 2005.
- [32] *Wang, Y., Shi, P.-J. and Wang J.-A.*: The housing loss assessment of rural villages caused by earthquake disaster in Yunnan Ptovince. Acta Seismol. Sinica, 18, 590-601, 2005.
- [33] *McGuire, R. K.*: Deterministic vs probabilistic earthquake hazards and risks. Soil Dyn. Earthq. Engrg., 21, 377-384, 2001.
- [34] *Allmann, A., Rauch, E. and Smolka, A.*: New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe: Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. In: Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1-7, Balkema, Rotterdam, 1998.
- [35] *Schwarz, J., Raschke, M. and Maiwald, H.*: Seismische Risikokartierung auf der Grundlage der EMS-98: Fallstudie Ostthüringen. Zweites Forum Katastrophenvorsorge, DKKV, Bonn und Leipzig, 325-336, 2002a.
- [36] *Schwarz, J., Raschke, M. and Maiwald, H.*: Seismic risk studies for central Germany on the basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. In: Proc. of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., 2002b.
- [37] *Leydecker, G.*: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000-1981. Geol. Jb., E36, 3-83, 1986.
- [38] *Grünthal, G.*: Erdbebenkatalog des Territoriums der Deutschen Demokratischen Republik und angrenzender Gebiete von 823 bis 1984. Akademie der Wissenschaften der DDR, Veröff. Zentralinst. Physik der Erde, Nr. 99, 139 pp., 1988.
- [39] *Grünthal, G. and Wahlström, R.*: An M_w based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions. J. Seism., 7, 507-531, 2003.
- [40] *Camelbeeck, T. and Meghraoui, M.*: Geological and geophysical evidence for large paleoearthquakes with surface faulting in the Roer Graben (northwest Europe). Geophys. J. Int., 132, 347-362, 1998.
- [41] *Camelbeeck, T., Vanneste, K., Verbeeck, K., Meghraoui, M., Pelzing, R., Hinzen, K., Dost, B. and van der Berg, M.*: Long-term seismic activity in the Lower Rhine Embayment. European Center for Geodynamics and Seismology Workshop "Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe", Hansur-Lesse, Belgium, March 13-17, 2000, 35-38, 2000.
- [42] *Vanneste, K., Verbeeck, K., Camelbeeck, T., Paulissen, E., Meghraoui, M., Renardy, F., Jongmans, D. and Frechen, M.*: Surface-rupturing history of the Bree fault scarp, Roer Valley graben: Evidence for six events since the late Pleistocene. J. Seism., 5, 329-359, 2001.
- [43] *Grünthal, G. and Bosse, Ch.*: Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8. GeoForschungsZentrum Potsdam, STR 96/10, 24 pp., 1996.
- [44] *Sadegh-Azar, H.*: Schnellbewertung der Erdbebengefährdung von Gebäuden. Dissertation am Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 156 pp., 2002.

- [45] *Schwarz, J., Langhammer, T. and Kaufmann, K.*: Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben – Teil 1: Rekonstruktion des Bebens in der Schwäbischen Alb vom 03. September 1978. *Bau-technik*, 8, 520-532, 2005.
- [46] *Meskouris, K. and Hinzen, K.-G.*: Bauwerke und Erdbeben. Vieweg Verlag, 470 pp., 2003.
- [47] *Raschke, M.*: Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerkschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Shaker Verlag, Aachen, 193 pp., 2004.
- [48] NFAS Database: Das DataWherehouse, Bonn, INFAS GEOdaten GmbH, 2001. (www.infas-geodaten.de).
- [49] *Tyagunov, S., Stempniewski, L., Grünthal, G., Wahlström, R. and Zschau, J.*: Vulnerability and risk assessment for earthquake-prone cities. In: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1-6 August, 2004.
- [50] *Tyagunov, S., Stempniewski, L., Grünthal, G., Wahlström, R. and Zschau, J.*: Vulnerability and risk analysis for earthquake prone communities. In: Structures and Extreme Events. In: Proc. of the IABSE Symposium, Lisbon, Portugal, September 14-16, IABSE Report, Vol. 90, 2005.
- [51] *Wahlström, R., Tyagunov, S., Grünthal, G., Stempniewski, L., Zschau, J. and Müller, M.*: Seismic risk analysis for Germany: Methodology and preliminary results. In: D. Malzahn and T. Plapp (editors): Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Calculation, Proc. of an International Conference at the University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, July 26-27, 2004, Logos Verlag Berlin, 415 pp., 83-90, 2004.
- [52] *Kleist, L., Thieken, A., Köhler, P., Müller, M., Seifert, I. and Werner, U.*: Estimation of building values as a basis for a comparative risk assessment. In: D. Malzahn and T. Plapp (editors): Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Calculation, Proc. of an International Conference at the University of Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, July 26-27, 2004, Logos Verlag Berlin, 115-122, 2004.
- [53] *Grünthal, G., Thieken, A. H., Schwarz, J., Radtke, K., Smolka, A. and Merz, B.*: Comparative Risk Assessments for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes. *Nat. Hazards*, 38, 21-44, 2006.
- [54] DIN 4149: 2005: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführen üblicher Hochbauten. Normenausschuß im Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2005.
- [55] *Haak, H., van Bodegraven, J. A., Sleeman, R., Verbeiren, R., Ahorner, L., Meidow, H., Grünthal, G., Hoang Trong, P., Musson, R. M. W., Henni, P., Schenková, Z. and Zimová, R.*: The macroseismic map of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 73, 265-270, 1994.
- [56] *Meidow, H. and Ahorner, L.*: Macroseismic effects in Germany of the 1992 Roermond earthquake and their interpretation. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 271-279, 1994.
- [57] *Stromeyer, D. and Grünthal, G.*: Intensity attenuation for seismic zones in Germany considering uncertainties (poster). 29th General Assembly European Seismological Commission (Potsdam/Germany 2004). SCF-0 Engineering Seismology, 155, 2004.
- [58] *Berz, G.*: Assessment of losses caused by the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 281, 1994.
- [59] *Grünthal, G.*: Die Erdbebenzonenkarte als Bestandteil der neuen DIN 4149. In: DGEB/DIN Gemeinschaftstagung, Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Die neue DIN 4149, Leinfelden-Echterdingen, 3-24, Beuth Verlag, 2004.

Sergey Tyagunov

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie,
Center for Disaster Management and Risk Reduction
Technology (CEDIM), Karlsruhe/Potsdam
Deutschland

Gottfried Grünthal

GeoForschungsZentrum Potsdam
Deutschland

Rutger Wahlström

GeoForschungsZentrum Potsdam,
Center for Disaster Management and Risk Reduction
Technology (CEDIM), Karlsruhe/Potsdam,
Deutschland

Lothar Stempniewski

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie,
Center for Disaster Management and Risk Reduction
Technology (CEDIM), Karlsruhe/Potsdam,
Deutschland

Jochen Zschau

GeoForschungsZentrum Potsdam,
Center for Disaster Management and Risk Reduction
Technology (CEDIM), Karlsruhe/Potsdam,
Deutschland

Johannes Christian Münich

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Massivbau und Baustofftechnologie,
Center for Disaster Management and Risk Reduction
Technology (CEDIM), Karlsruhe/Potsdam
Deutschland