

# SCHADENSPOTENTIALE INFOLGE ERDBEBEN – ZUR ÜBERTRAGBARKEIT VON MODELLSTUDIEN

Jochen Schwarz, Tobias Langhammer, Silke Beinersdorf & Christian Kaufmann  
*Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC), Institut für  
Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, Marienstrasse 13, D-99421  
Weimar*

Wolfgang Lenhardt

*Österreichischer Erdbebendienst, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
(ZAMG), Hohe Warte 38, A-1190 Wien*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Methodische Grundlagen für realistische Schadensszenarien und zugeschnitten auf die Besonderheiten nationaler Erdbebengebiete werden vorgestellt. Mit dem erreichten Bearbeitungsstand können Szenarien für beliebige Ereignisse durchgespielt werden. Die entwickelte und in Schadensmodellen bereits etablierte Vorgehensweise basiert auf Verletzbarkeitsfunktionen, die aus weltweiten Einsätzen der Deutschen TaskForce Erdbeben abgeleitet sowie durch Feldstudien in den Zielgebieten und Untersuchungen der regionaltypischen Bauweisen präzisiert und differenziert werden. Die modulare Struktur und damit auch Kopplungsfähigkeit der Elemente tragen zur Transparenz der Methodik bei. Die Bearbeitungsschritte werden vorgestellt. Die implementierten Bearbeitungsebenen sind bestandsgesichert und werden anhand von Schadensdaten kalibriert und verifiziert. Die Differenzierung von Bearbeitungsstufen ermöglicht eine Quantifizierung der Schadenspotentiale und ihrer Streubreiten in Abhängigkeit von den berücksichtigten Einflussfaktoren und Qualität der Modellebenen.

## 1. VORBEMERKUNG

Die im Rahmen verschiedener Forschungsarbeiten (u.a. des BMBF-Verbundprojektes „Deutsches Forschungsnetzwerk Naturkatastrophen DFNK“) begonnenen Arbeiten zu den Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und zur Quantifizierung der Schadenspotentiale (Schwarz *et al.*, 2006a) konnten u.a. in einer umfänglichen Modellstudie für das Bundesland Baden-Württemberg weiterentwickelt werden (Schwarz *et al.*, 2006b). Neben der Reinterpretation der Hauptschadensgebiete des Albstadt-Bebens von 1978 gelingt auch die Abschätzung der Schadenssummen für das Gebiet Baden-Württembergs in einer bemerkenswerten und in dieser Form noch nicht erreichten Nähe zu den von Versicherungsseite tatsächlich erhobenen Schäden im privaten Wohnungsbereich. Nachdem u. a. für Thüringen (Schwarz *et al.*, 2001a, b), Nordrhein-Westfalen (Schwarz *et al.*, 2004a, b; 2005b) vergleichbare Erhebungen vorliegen, Modellstudien in der Türkei und Südeuropa (Langhammer *et al.*, 2006) erfolgreich abgeschlossen wurden, darf die Übertragbarkeit der Methoden und Hilfsmittel auf andere Erdbebengebiete als nachgewiesen gelten.

Die gewonnenen Erfahrungen finden in derzeit laufenden Arbeiten zur ingenieurmäßigen Begründung regionaler Schadensmodelle für Deutschland und angrenzenden Gebieten Berücksichtigung. Die in den Schadensmodellen des Erdbebenzentrum der Bauhaus-Universität Weimar etablierte Vorgehensweise basiert auf Verletzbarkeitsfunktionen, die aus weltweiten Einsätzen der Deutschen TaskForce Erdbeben abgeleitet sowie durch Feldstudien in den Zielgebieten und Untersuchungen der typischen Bauweisen präzisiert und differenziert wurden. Dem Schema der EMS-98 (Grünthal, ed., 1998) folgend, werden charakteristische Verletzbarkeitsklassen ermittelt, die in Verbindung mit den robust beschriebenen Erwartungswerten der Bauwerksschäden einwirkungs- bzw. intensitätsabhängige Schadensprognosen ermöglichen.

Damit kann auf aktuelle Entwicklungstendenzen und dem Bedarf an realistischen „Schadensmodellen“ (u.a. für die D-A-CH-Staaten) reagiert werden. Der Beitrag stellt sich die Frage, welche Erfahrungen für die Übertragbarkeit der Modellstudien abzuleiten sind. Der Einstieg setzt eine Vereinheitlichung der Begriffe und Interpretation von Bearbeitungsebenen und -stufen bzw. Kenngrößen voraus, die in Abhängigkeit von den Nutzeranforderungen mit unterschiedlichen inhaltlichen Vorstellungen verbunden sein können.

## 2. BEARBEITUNGS- BZW. DARSTELLUNGSEBENEN

In der praktischen Durchführung von Erdbebenszenarien ist vorab über den geforderten bzw. aus Aufwandsgründen vertretbaren Bearbeitungsmaßstab zu entscheiden. Es werden vier Ebenen unterschieden, die fließende Übergänge besitzen. Für die verschiedenen Bearbeitungsebenen können charakteristische Schadenskenngößen begründet und abgeleitet werden (Schwarz *et al.*, 2006b).

Die hier als *punktuell (oder adressenorientiert)* bezeichnete *Bearbeitungsebene* bezieht sich auf ein konkretes Bestandsgebäude/ Einzelobjekt mit nachvollziehbaren bzw. erhebaren Ausführungsmerkmalen. Über instrumentelle Untersuchungen kann eine Annäherung an den aktuellen Zustand erfolgen. Im Ergebnis steht die einwirkungsabhängige Schadensverteilung und Schädigung, die über den Schadensgrad  $D_i$  beschrieben werden kann.

Der Schadensgrad ist auch die Kenngröße zur Beschreibung des Schadens im mikroskaligen Bereich. Die *mikroskalige Bearbeitungsebene* beschreibt auf Grundlage der konkreten Bauweisen und des Zustandes die Verletzbarkeitsklassen der Einzelobjekte. Entsprechend vorbereitete GIS-Datenebenen ermöglichen für beliebige Szenarien die Angabe einer wahrscheinlichen Schadensverteilung.

Die *mesoskalige Bearbeitungsebene* beschreibt demzufolge den Schaden in einem lokalen oder regional begrenzten Gebiet. Aufgrund der notwendigen Anonymisierung der Prognosen empfiehlt sich auch im mikroskaligen Bereich eine Ergebnisdarstellung im mesoskaligen Maßstab, d.h. die individuellen Schadensgrade  $D_i$  werden in Rasterelementen gemittelt (vgl. Abbildung 6) oder auf andere Definitionen von Flächenelementen (z.B. Nutzungspläne) bezogen. Aus der Verteilung der Schäden einer Verletzbarkeitsklasse oder auch innerhalb eines Gebietes lässt sich als repräsentativer Durchschnittswert der *mittlere Schadensgrad*  $D_m$  angeben. Dieser ist die Kenngröße zur Beschreibung des Schadens im meso- und makroskaligen Bereich.

Gewählt werden neben der rasterförmigen Gebietseinteilung (mit der Möglichkeit einer Variation der Elementgröße je nach Bebauungsdichte) die Verwaltungseinheiten (z.B. Gemeinden), so dass ein konkreter Anwenderbezug gewährleistet werden kann. Ergebnisse sind somit der mittlere Schadensgrad oder Verlust in einer Gemeinde.

Die *makroskalige Bearbeitungsebene* vermittelt einen Eindruck vom Gesamtschaden eines Erdbebens und kann – wie in der Versicherungswirtschaft üblich – auf Postleitzahlgebiete agglomeriert werden. Mit dem Übergang in Postleitzahlgebiete (PLZ) wird der makroskalige Bereich erreicht und nahezu das gesamte Land bzw. Bundesland erfasst.

Zwischen den Bearbeitungsebenen sind Übergänge aus dem höheren in den geringeren Detaillierungsgrad einfach möglich; dies gelingt nicht in der anderen Richtung. Mit einem makroskaligen Modell können keine vertrauenswürdigen Aussagen zum Einzelobjekt getroffen werden. Als praktikable Lösung ist die mikroskalige Untersuchung von Modellregionen demzufolge unverzichtbar.

Der mittlere Schadensgrad  $D_m$  als Beschreibungsform des Schadens ist für alle Bearbeitungsebenen geeignet, der sich somit auch in einem komplexeren Schadensmodell als das Bindeglied zwischen den verschiedenen Ebenen anbietet. Durch Kopplung mit standortbezogenen Mikrozonierungsarbeiten können lokale Variationen der Einwirkungen effizient berücksichtigt werden. Aus diesen Bearbeitungsebenen lässt sich ableiten, welche Leistungen bzw. Ergebnisse durch die Risikoanalyse abgerufen werden können.

Wie immer wieder hervorgehoben werden muss, sind seismische Risikoanalysen und Schadensmodelle mit Unsicherheiten verbunden; sie können je nach Datenbasis und zugrunde gelegten Modellebenen für das gleiche Gebiet zu signifikanten Unterschieden führen. Ursachen liegen einerseits im Seismizitätsmodell, andererseits und vor allem, in der Qualität, mit der die Standortbedingungen und die regionale Verletzbarkeit der Bausubstanz berücksichtigt werden, sowie in den zugrunde gelegten Schadensfunktionen, mit denen die Gefährdungs- bzw. Einwirkungsseite mit der Widerstandsseite zu Schadens- bzw. Verlustangaben verknüpft werden.

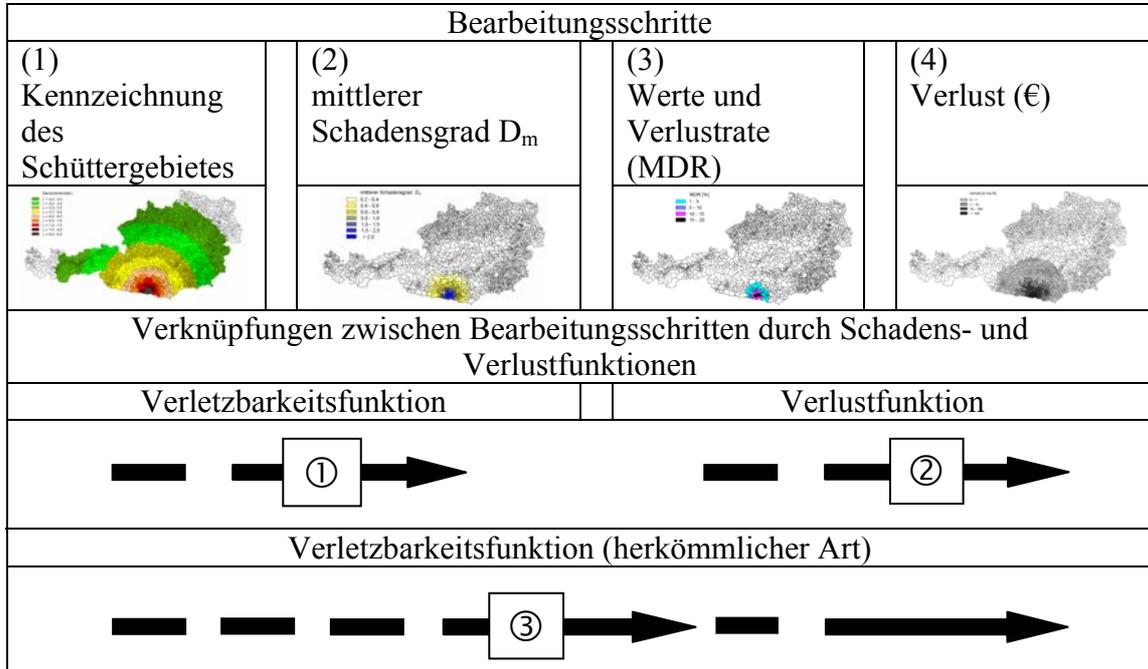


Abbildung 1: Beispiel zur gewählten Vorgehensweise: Beben der Epizentralintensität  $I_0 = \text{VIII-IX}$  (8.5) in der Grenzregion Österreich/ Italien (BS 4 nach Tabelle 1)

### 3. VORGEHENSWEISE UND BEARBEITUNGSSCHRITTE

Die durchgeführten Modellstudien können in den wesentlichen Bearbeitungsschritten durch eine einheitliche und allgemein übertragbare Vorgehensweise beschrieben werden. Sie wird durch Abbildung 1 schematisch angedeutet und ist im Wesentlichen durch vier Schritte gekennzeichnet. Die Pfeile verdeutlichen die Verknüpfung zwischen den Elementen der mesoskaligen Bearbeitungsebene und beziehen sich auf die Qualität der Schadensfunktionen.

#### 3.1 SCHRITT 1: KENNZEICHNUNG DES SCHÜTTERGEBIETES

##### 3.1.1 Hypothetische Schütterwirkungen nach Intensitäts-Abnahmebeziehungen ( $I_s$ )

Der Einfluss des Standortuntergrundes lässt sich über die Abnahme der seismischen Bodenbewegung und Schütterwirkung (Intensitäten) im Wesentlichen über die flächenmäßige Verteilung der Schütterwirkung und im Hinblick auf Anomalien der Entfernungs- und Richtungsabhängigkeit herausarbeiten. Bisherige Arbeiten zur Quantifizierung der Schadenspotentiale gehen im Wesentlichen von einer radialen, im Umfang gleichförmigen und somit hypothetischen Intensitätsabnahme aus, die als Mindeststufe der Bearbeitung zu unterstellen ist (vgl. Abbildung 1).

##### 3.1.2 Beobachtete Schütterwirkungen und Untergrundeinfluss ( $\Delta I_s$ )

Eine wesentliche Strategie zur Verbesserung des Modells liegt in der Berücksichtigung von Standorteinflüssen (Baugrund, Geologie), die zu einem veränderten Bild der Schütterwirkungen führen. Karten beobachteter Schütterwirkungen sind bei detaillierter makroseismischer Bearbeitung der Befunde in herausragender Weise geeignet, lokale Standorteffekte herauszuarbeiten. Dies geschieht durch einen standortbezogenen Intensitätskorrekturfaktor ( $\Delta I_s$ ). Da die makroseismischen Karten in der Regel Intensitätskonturen abbilden, die die Einzelbefunde in flächiger Erweiterung einschließen, gehen wesentliche Detailinformationen jedoch verloren. Sofern die Einzelbefunde als Datenpunkte verfügbar sind, ergibt sich die Möglichkeit einer messtechnischen oder analytischen Überprüfung. So konnten auch für das Albstadt-Beben 1978 und das Saulgau-Beben 1935 schadensbegünstigende Effekte nachgewiesen werden (Amstein *et al.*, 2005). In Sonderfällen kann die Würdigung von Veränderungen im Grundwasserstand z.B. infolge von tagebaubedingten Absenkungen ( $\Delta I_{GW}$ ) erforderlich werden (Schwarz *et al.*, 2007).

##### 3.1.3 Analytische Standortuntersuchungen

Von grundsätzlich anderer Qualität sind analytische Standortuntersuchungen, die konkreten Untergrundbedingungen zum Ausgangspunkt für die Festlegung von Verstärkungseffekten bzw. Überhöhungen der Schütterwirkung nehmen. In der Modellstudie Baden-Württemberg wurde die geologische Untergrundsituation mittels einer detaillierten Auswertung von 95 Tiefenprofilen berücksichtigt. Insgesamt werden ausgehend von 51 Erdbebenherden die Fels-Bodenbewegungen im Raster von 2.5 x 2.5 km<sup>2</sup> generiert und analytische Standortanalysen durchgeführt. Es wird somit in einheitlicher Weise der lokale Untergrund zur Grundlage für die Festlegung von Intensitäts-Korrekturfaktoren herangezogen.

Die Größe der Intensitäts-Korrekturfaktoren unterscheidet sich nur unwesentlich von denen, die aus empirisch-statistischen Auswertungen (Schwarz *et al.*, 2006b) abgeleitet werden können. Aufgrund der entwickelten gerätetechnischen und methodischen Möglichkeiten sollten analytische Untersuchungen durch instrumentelle Erhebungen gestützt werden (Amstein *et al.*, 2005). Dies erscheint auch deshalb erforderlich, weil der Abbildung eines räumlichen Untergrundmodells aufwandseitig Grenzen gesetzt sind, und die eigentliche Zielstellung in der Differenzierung der Einwirkungen in den für die vorherrschenden Bauweisen charakteristischen Frequenzbereichen zu sehen ist.

## 3.2 SCHRITT 2: KENNZEICHNUNG DER VERLETZBARKEIT DER BAUWEISEN UND SCHADENSERWARTUNG

### 3.2.1 Verletzbarkeit des Bauwerksbestandes

Aus der grundsätzlichen Entscheidung heraus, sich methodisch und modellseitig auf die makroseismische Intensität nach der *European Macroseismic Scale EMS-98* zu beziehen, ergeben sich neuartige Anforderungen an die Bewertung der Bausubstanz und die Formulierung der Verletzbarkeits- bzw. Verlustfunktionen (vgl. Abbildung 1). Die Quantifizierung der Schadenspotentiale auf Grundlage der makroseismischen Intensität nach EMS-98 ist grundsätzlich mit der Aufgabe verbunden, die vorhandene Bausubstanz in typische Bauweisen und diese wiederum in Verletzbarkeitsklassen zu überführen. Für die Bauweisen sind charakteristische Bereiche von Verletzbarkeitsklassen abzuleiten; für das Einzelgebäude oder die Gebäudegruppe ist die charakteristische Verletzbarkeitsklasse innerhalb des Bereiches festzulegen.

Eine wesentliche Aufgabe besteht somit darin, die für ein Schadenmodell maßgebliche Datenebene der Bauwerksverletzbarkeit bereitzustellen. Die gewählte Vorgehensweise könnte methodisch als geostatistische Extrapolation auf der Grundlage punktueller Detailerhebungen beschrieben werden.

### 3.2.2 Schadensverteilung und Regionalisierungsindex ( $R_i$ )

Als neuartiges Element zur Verbesserung des Modells wird ein Regionalisierungsfaktor eingeführt, der die Ermittlung charakteristischer mittlerer Schadensgrade  $D_m$  ( $R_i$ ) für die Standortintensität  $I_s$  ermöglicht. Der Regionalisierungsindex ( $R_i$ ) spiegelt die regionale Verletzbarkeit der Bauweisen wider und repräsentiert auf neue Weise die Schadensfunktionen.

Die Verletzbarkeit der Bauweisen kann demzufolge entweder nach einem durch die EMS-98 vorgegebenen Schema erfolgen ( $R_i = \text{konstant}$ ), d.h. es wird eine einheitliche Bebauungsstruktur in der Zielregionen unterstellt, oder es wird eine differenzierte Betrachtung der Bauweisen nach regionalen Besonderheiten ( $R_i = \text{variabel}$ ) gewährleistet.

## 3.3 SCHRITT 3: KENNZEICHNUNG DES ZUSAMMENHANGES ZWISCHEN INTENSITÄT UND SCHÄDIGUNGSGRAD

Gemäß der hier verfolgten Vorgehensweise ist es erforderlich, für die Stärke des Bebens einen mittleren Schadensgrad zu bestimmen und für diesen den Verlust in Form des Mittleren Schadensverhältnisses (*Mean Damage Ratio MDR*) als dem klassischen Parameter der Versicherungswirtschaft zu quantifizieren.

Der Zusammenhang zwischen Intensität, mittlerem Schadensgrad und Verlust ist durch „Schadensfunktionen“ zu beschreiben. Sie bilden das Kernstück der seismischen Risikoanalyse, so dass mit Bezug auf Abbildung 1 und zur Klarstellung auf grundlegende Besonderheiten hinzuweisen ist (Schwarz *et al.*, 2006b):

- Schadensfunktionen sind aus Ingenieursicht Verletzbarkeitsfunktionen (①), aus Versicherungssicht Verlustfunktionen (② und ③ in Abbildung 1).
- Verlustfunktionen ② ③ beschreiben die (wahrscheinliche) Schadenssumme im Verhältnis zu einem mehr oder weniger realen Bezugswert. Der Schaden als Verlustgröße ist somit eine bezogene Größe zwischen 0 und 1. Der Verlust streut somit im vermeintlichen Schaden und im angesetzten Wert; er ist grundsätzlich erst nach Auflistung der Ersatzansprüche bestimmbar.

Im Rahmen der Arbeiten des Erdbebenzentrums wurde aus grundlegenden methodischen Überlegungen heraus entschieden, Verletzbarkeitsfunktion ① und Verlustfunktion ② in getrennter Bearbeitung vorzulegen:

- Primär ist der Zusammenhang zwischen Intensität und Schaden zu untersuchen, und darauf aufbauend sind Funktionen zwischen dem mittlerem Schadensgrad und Verlust ( $D_m$  - MDR) abzuleiten.
- Für eine ermittelte Intensität ergibt sich im Untersuchungsgebiet ein mittlerer Schadensgrad, der bezüglich des MDR eine charakteristische Streubreite besitzt.
- In Abhängigkeit von der Verletzbarkeit des regionalen Gebäudebestandes wird über den Regionalisierungsfaktor  $R_i$  der maßgebliche Verlust (MDR) festgelegt. Das heißt, die Verlustfunktion ② ist von der regionalen Zusammensetzung der Bauweisen abhängig.

Der Zusammenhang zwischen MDR und  $D_m$  kann demzufolge durch „standardisierte“ (einheitliche) Verletzbarkeitsfunktionen [ $MDR(D_m)$ ] oder durch neuartige, für die regionale Bebauung ermittelte Funktionen vom Typ [ $MDR(D_m, R_i)$ ] beschrieben werden. Hier weicht die Vorgehensweise von den bisher üblichen Modellen der Risikokartierung und Schadensabschätzung ab; die regionalen Unterschiede in der Bausubstanz werden berücksichtigt. Eine wesentliche Information zur Verletzbarkeit wird aus der Altersstruktur abgeleitet

#### 3.4 SCHRITT 4: ERMITTLUNG DER WERTE UND BEZUGSGRÖSSEN ZUR KENNZEICHNUNG DER ÖKONOMISCHEN SCHÄDEN (VERLUSTE)

Das im Modell berücksichtigte Wertinventar kann über verschiedene Bezugsgrößen ermittelt werden. Im Gegensatz zur Inventarermittlung mittels Normalherstellungskosten der Einzelobjekte, die einen genauen Kenntnisstand der Bebauungssituation im Zielgebiet voraussetzt (mikroskalige Bearbeitungsebene), wird in der meso- bzw. makroskaligen Bearbeitungsebene das Inventar über Flächennutzungen mit zugehörigen spezifischen Vermögenswerten berechnet. Der Vorteil liegt in einer verwaltungstechnisch festgelegten Auflösung der Ausgangsdaten, die ihrerseits die Einbeziehung statistischer Datenerhebungen ermöglicht. Es handelt sich in beiden Fällen um eine volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Anlagevermögens, nicht um die Summe der versicherten Werte in den betrachteten Gebieten.

Zur Verdeutlichung der politisch-wirtschaftlichen Konsequenzen starker Erdbeben können weitere Kenngrößen herangezogen, die einen besseren Eindruck von der Größenordnung möglicher Schäden und der „Betroffenheit“ vermitteln (vgl. Abschnitt 5.1).

#### 4. BEARBEITUNGSSTUFEN

In den bisher für deutsche Erdbebengebiete vorgelegten mikro- bzw. mesoskaligen Schadensanalysen werden verschiedene Bearbeitungsstufen unterschieden, die jeweils den unterschiedlichen Grad einbezogener Einflussfaktoren (wie z.B. Untergrund, Topografie, Bebauung) berücksichtigen. Die im mikroskaligen gewählte Einteilung der Bearbeitungsstufen unter Einbeziehung der dynamischer Bauwerkseigenschaften (Schwarz *et al.*, 2004a,b, Schwarz *et al.*, 2005a) kann aufgrund der fehlenden Bestandsangaben (und Kosten für entsprechende Erhebungen) beim Übergang zur makroskaligen Erhebung und mit Ausrichtung auf die versicherungsorientierte Verlustabschätzung nicht unmittelbar übernommen werden.

In Abhängigkeit von der Realisation der durch Abbildung 1 umrissenen Teilaufgaben werden von Schwarz *et al.* (2006b, 2007) letztlich 10 Bearbeitungsstufen (BS) unterschieden, die dem Schema von Tabelle 1 zu entnehmen sind. Die Bearbeitungsstufen unterscheiden sich im Detaillierungsgrad der realisierten Teilaufgaben bzw. in der Wirklichkeitsnähe der berücksichtigten Einflussfaktoren. Nach diesem Schema können grundsätzlich auch die Arbeiten anderer Forschergruppen eingeordnet werden.

Abbildung 1 veranschaulicht die Ergebnisse aus der Bearbeitungsstufe BS 4 für ein fiktives Beben im Grenzgebiet Österreich/ Italien mit der Intensität  $I_0 = \text{VIII-IX}$  (8.5).

Tabelle 1: Bearbeitungsstufen der Schadensermittlung (BS) in Abhängigkeit von der Qualität und Differenzierung der zu realisierenden Teilaufgaben

BS	Realisierung der Teilaufgaben						
	Intensitäts- abnahme	Unter- grund	Grund- wasser	Verletzbarkeit (Regionalisierungs- index)		Schaden	
	$I_s$	$\Delta I_s$	$\Delta I_{GW}$	$R_i$ konst.	$R_i$ variabel	MDR ( $D_m$ )	MDR ( $D_m, R_i$ )
1	●			●		●	
2	●				●	●	
3	●			●			●
4	●				●		●
5	●	●		●		●	
6	●	●			●	●	
7	●	●		●			●
8	●	●			●		●
9	●	●	●		●	●	
10	●	●	●		●		●

## 5. SZENARIEN UND PROGNOSEN FÜR DEN AKTUELLEN BESTAND

### 5.1 BETROFFENHEIT UND VORSORGE

Zur Verdeutlichung der Betroffenheit und Schadenspotentiale werden Einwohnerzahlenklassen (EWZ) gemäß Tabelle 2 eingeführt und diese je nach verwaltungstechnischer Struktur und Bezeichnung (z.B. auf Gemeindeebene) aufgeteilt. Insgesamt werden fünf Einwohnerzahlenklassen (EWZ 1 bis 5) unterschieden, deren regionale Verteilung in Österreich Abbildung 2 zu entnehmen ist.

Szenarien werden für Epizentralintensitäten von  $I_0 = VII (7.0)$  und  $I_0 = VIII-IX (8.5)$  durchgespielt (vgl. Abbildung 3). Die Ereignisse stehen somit für wiederholt aufgetretene (wahrscheinliche) und historisch einmalige Ereignisse. Dargestellt werden die Verlustraten (MDR) in den einzelnen vom Ereignis noch betroffenen Gemeinden für die Bearbeitungsstufe 4. Es kann festgestellt werden, dass die unteren Einwohnerklassen (EWZ 1, EWZ 2) tendenziell höhere Verlustraten aufweisen und dominant betroffen sind. Der qualitative Verlauf der streuenden Punktschar wird durch die implementierte Schadensfunktion und die Intensitätsabnahmebeziehung geprägt.

Von Schwarz *et al.* (2004b) wurde provokant die Arbeitshypothese aufgestellt, dass die Aufmerksamkeit stärker als bisher den Kleinstädten in deutschen Erdbebengebieten zu widmen sei, in denen auch die Geologie und Topografie markant variieren. Als Fazit wird die Forderung erhoben, die bisherige strategische Ausrichtung der Forschungsaktivitäten und öffentlichen Argumentation zu überprüfen. Eine solche Orientierung kann auch für die Erdbebengebiete Österreichs begründet werden.

Tabelle 2: Einwohnerzahlenklassen (EWZ) und Beispiele

	EWZ 1	EWZ 2	EWZ 3	EWZ 4	EWZ 5
Einwohner	kleiner 2 000	2 000 bis 5 000	5 000 bis 20 000	20 000 bis 100 000	Größer 100 000
Beispiel(e)	<b>Seeben- stein</b>	<b>Kirchberg a.d. Pielach</b>	<b>Ebreichs- dorf</b>	<b>Wiener Neustadt, St. Pölten</b>	Graz

Erläuterung: Modellgebiete (z.B. **Wiener Neustadt**) sind hervorgehoben

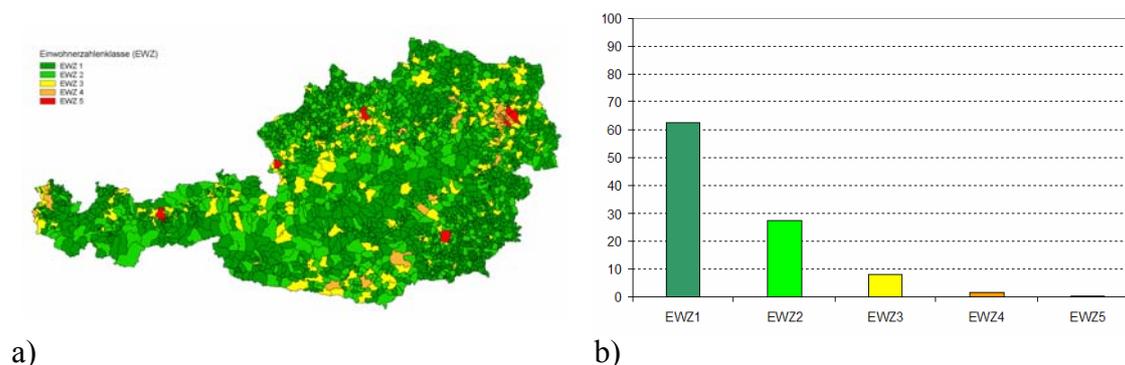


Abbildung 2: Einwohnerzahlenklassen (EWZ) in Österreich:

a) regionale Verteilung

b) prozentuale Verteilung bezogen auf die Gesamtheit der Gemeinden

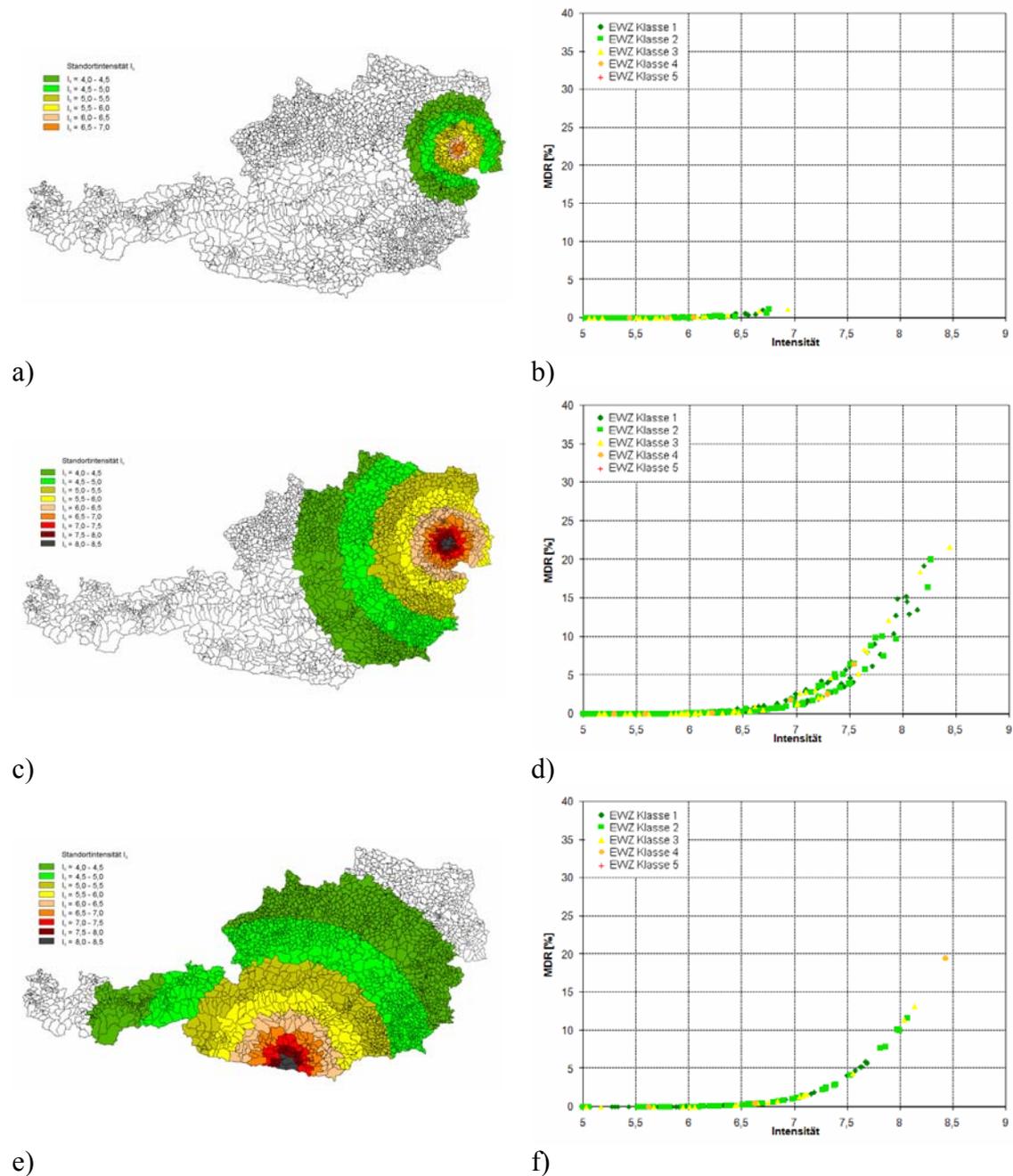


Abbildung 3: Schüttergebiete und Verlustraten für unterschiedliche Szenarien:

a) Intensitätsverteilung für ein Erdbeben in Ebreichsdorf:

$I_0 = 7.0$ ; Herdtiefe  $h = 7$  km

b) mittlere Verluste (MDR) für das Schüttergebiet nach a)

c) Intensitätsverteilung für ein Erdbeben in Ebreichsdorf:

$I_0 = 8.5$ ; Herdtiefe  $h = 7$  km

d) mittlere Verluste (MDR) für das Schüttergebiet nach c)

e) Intensitätsverteilung für ein Erdbeben im Grenzgebiet Österreich/ Italien:

$I_0 = 8.5$ ;  $h = 10$  km

f) mittlere Verluste (MDR) für das Schüttergebiet nach e)

## 5.2 WIEDERHOLUNG EINZELNER HISTORISCHER BEBEN

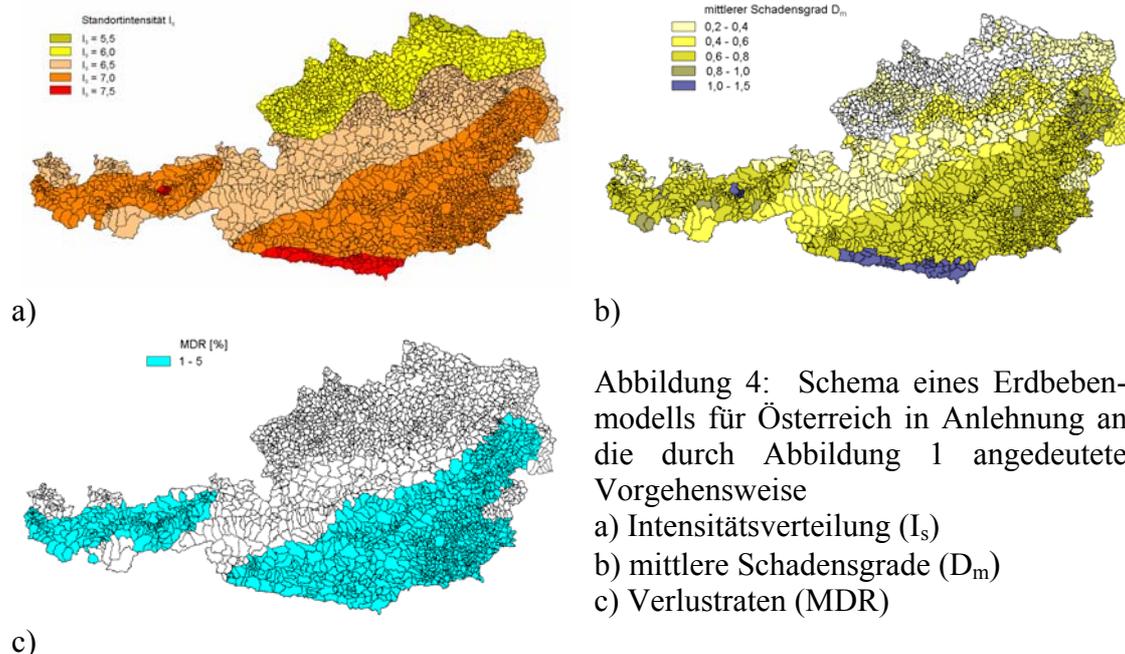
Als erstes wird die Frage aufgeworfen, welche Schäden bei der Wiederholung historischer Erdbeben zu erwarten wären. Der methodische Ansatz ist deterministisch und bezieht sich nachfolgend auf die Intensitätsabnahme, d.h. die hypothetischen Schütterwirkungen ohne standortbezogene Intensitätskorrektur (Bearbeitungsstufe 4) ausgehend von der Epizentralintensität  $I_0$ . Es werden mehr oder weniger fiktive Erdbeben als Szenario unterstellt (vgl. Abbildungen 3a, 3c und 3e).

## 5.3 SCHÜTTERWIRKUNGEN INFOLGE DER ÜBERLAGERUNG HISTORISCHER SCHADENSBEBEN

Verlässt man das konkrete Einzelereignis und erhebt die Frage, von welcher Größenordnung der Schaden im ungünstigsten Falle auszugehen wäre, könnte als erste (weiterhin deterministische) Annäherung eine Überlagerung historischer Erdbebenherde entweder im Sinne eines simultanen Auftretens oder, was vernünftiger sein dürfte, im Sinne der an den einzelnen Standorten jeweils ungünstigsten Erdbebenwirkungen unterstellt werden. Es bietet sich an, für Beben mit Intensitäten von z.B.  $I_0 \geq VI$  (6.0) eine Karte maximaler Schütterwirkungen zu generieren, d.h. es werden die hypothetischen Schütterwirkungen für die einzelne Rasterpunkte aufbereitet und das einmalige Maximum abgebildet (vgl. Schwarz *et al.*, 2006b).

## 5.4 KRITISCHE SZENARIEN

Aus Sicht der Nutzer wäre die Frage nach dem *worst-case*-Szenarium oder dem kritischen Szenarium unterschiedlich zu stellen und zu beantworten. Als kritisch wäre jenes Szenarium zu betrachten, das bei Annahme gleicher Intensität, d.h. losgelöst von der Eintretenswahrscheinlichkeit, die größten Schäden verursachen würde. Ein solcher Herd müsste in der Nähe der größten Wertkonzentrationen, angenommen werden.



Für ein *worst-case*-Szenarium fehlen in der seismischen Risikoanalyse allgemein anerkannte Definitionen, z.B. bezüglich der Zuschläge auf historische Ereignisse oder zu den noch als aussagerelevant betrachteten Eintretenswahrscheinlichkeiten. Es erscheint in jedem Fall plausibel, ein solches Szenarium auf Grundlage probabilistischer Gefährdungsanalysen festzulegen. In Abbildung 4 wird die im Rahmen der Österreichischen Erdbebenplattform vorgelegte intensitätsbasierte Gefährdungskarte (HORA, 2006) zugrunde gelegt.

## 6. ÜBERTRAGUNG VON MODELLSTUDIEN

### 6.1 ERFAHRUNGEN (ARBEITSTHESEN)

(1) Die Anforderungen an die Modelle haben sich verändert. Sie unterscheiden sich heute weniger in der mathematischen Modellierung der Gefährdung als vielmehr in der Bewertung der Verletzbarkeit und einwirkungsabhängigen Schadensraten.

(2) Da der Bauwerksbestand weder nach ingenieurmäßigen (strukturellen) Kriterien noch nach der Erdbebenwiderstandsfähigkeit typisiert vorliegt, sind Modell- und Testgebiete festzulegen und zu untersuchen.

(3) Schadensfunktionen sind aus dem konkreten Bestand abzuleiten; sie sind empirische Größen. Ihre Qualität hängt von den Schadensdaten ab. Schadensdaten sind Spiegelbild der Verletzbarkeit der lokalen Bauweisen und ihre regionalen Besonderheiten. Ein Modell sollte diesen „Doppelbezug“ nachweisen können.

(4) Die Ableitung von Schadensfunktionen setzt die Untersuchung von Modellgebieten, den Abgleich mit statistischen Daten und die Detailaufnahme von Testgebieten voraus.

(5) Modellgebiete sind aus der Gefährdung, der Repräsentativität und den vorhandenen Vorarbeiten abzuleiten. Modellgebiete stehen für den Bestand; sie dienen der Identifikation der vorherrschenden Bauweisen und Abschätzung von Streubreiten ihrer Verletzbarkeit.

(6) Testgebiete sind Anwendungsgebiete; sie stehen auch für betroffene Gebiete, d.h. für Erfahrungswerte. Extrapolationen aus den Ergebnissen der Modellgebiete müssen sich in der Anwendung, z.B. beim Abgleich mit der Detailaufnahme eines Testgebietes plausibel darstellen. Testgebiete sind unverzichtbar, wenn statistische Daten in hoher Auflösung vorliegen und Rückschlüsse auf den Gesamtbestand gezogen oder die Verletzbarkeit der Bauweisen präzisiert werden sollen.

(7) Das „Modell“ sollte die Spezifik und Regionalität des Gebäudebestandes (Bauweisen, Bauzeiten, Material, Tradition, historische Einflussfaktoren) über Bereiche von Verletzbarkeitsklassen widerspiegeln. Anzugeben sind die wahrscheinlichste Klasse (*maximum likely class*), der mögliche und der wenig wahrscheinliche Streubereich (*less probable, exceptional cases*). Als geeignet erweist sich die Einführung eines Regionalisierungsfaktors, der den Bestand hinsichtlich der Verletzbarkeit bzw. Verletzbarkeitsklassen der Bauweisen bewertet.

(8) Das „Modell“ sollte die Spezifik der lokalen Bedingungen des Untergrundes und den Einfluss auf die Bauwerke widerspiegeln. Als geeignet erweisen sich Standort-Korrekturfaktoren, die gegebenenfalls die vorherrschenden Bauwerkstypen in ihren dynamischen Merkmalen und die Schadensüberhöhung infolge der Einwirkungsspezifik berücksichtigen.

(9) Ein wesentlicher Vorteil besteht in der modularen Struktur eines Modells und damit auch in der Kopplungsfähigkeit der Elemente, die letztlich auch zur Transparenz der Methodik beitragen.

Die Bearbeitungsschritte müssen nachvollziehbar und im Hinblick auf die Berücksichtigung von Einflussfaktoren (Bearbeitungsstufen) quantifizierbar sein.

(10) Die im Modell implementierten Bearbeitungsebenen müssen bestandsgesichert sein. Sie müssen ebenso wie die Szenarien selbst anhand von Schadensdaten kalibriert und verifiziert sein. Der schwierigste Bearbeitungsanteil, die Bewertung der Bausubstanz hinsichtlich der Verletzbarkeit, muss antizipiert werden.

## 6.2 ZUR BEDEUTUNG VON MODELL- UND TESTGEBIETEN

Auf die Bedeutung von Modellgebieten wurde bereits hingewiesen. Sie sind für die Aufnahme des repräsentativen Bauwerksbestandes und der Zielstellung einer geostatistischen Extrapolation unerlässlich. Entsprechende Erhebungen wurden u.a. auch für die in Tabelle 2 aufgeführten Orte (unterschiedlicher Einwohnerzahlenklasse und seismischer Exposition) durchgeführt. Im Ergebnis steht die Festlegung der typischen Gebäudetypen, die in einem ersten Schritt an den in der EMS-98 enthaltenen Bauweisen (und damit internationalen Erfahrungswerten) gespiegelt und in einem zweiten Schritt hinsichtlich ihrer Besonderheiten präzisiert werden (nach Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden - EDAC). Es empfiehlt sich eine Unterscheidung nach dem Baualter vorzunehmen (vgl. Abbildung 5). Für diese Typen sind die Verletzbarkeiten und Streubereiche abzuleiten.



EMS: *Masonry, manufactured stone units*  
EDAC: *Masonry with steel/RC slabs*



EMS: *Reinforced masonry*  
EDAC: *Masonry with RC frame elements*



EMS: *Masonry, manufactured stone units*  
EDAC: *Masonry with wooden floors*  
a) Baujahr vor 1950



EMS: *Masonry with RC floors*  
EDAC: *Masonry with RC floors*  
b) Baujahr nach 1950

Abbildung 5: Typische Mauerwerksbauten in Österreich; hier in rein schematischer Einordnung (nach EMS) und der Präzisierung nach Untersuchung von ausgewählten Modellstandorten (nach EDAC)

Aus den bisher durchgeführten Arbeiten kann als primärer Grundsatz abgeleitet werden, dass die Verletzbarkeits-(Schadens- oder Empfindlichkeits-)Funktionen an konkreten Ereignissen zu kalibrieren sind. Eine solche Kalibrierung kann auf der Schadensseite (Schadensgrade) oder Verlustseite (Kosten) erfolgen. Vor- und Nachteile sind naheliegend; der Ingenieur wird dem beobachteten Bauwerksschaden vertrauen, zumal die Kostenseite sich oft nur auf den versicherten Bestand beschränkt.

Da die Verletzbarkeit des Gebäudebestandes in deutschen und angrenzenden Erdbebengebieten bis dato nicht untersucht worden ist, fehlte der Maßstab, um Ergebnisse seismischer Risikoabschätzungen bzw. Schadensszenarien kalibrieren zu können. Aus Sicht der Autoren liegen mit der Reinterpretation des Albstadt-Bebens von 1978 (Schwarz *et al.*, 2005a) die Aufbereitung eines für die D-A-CH-Staaten maßgebliches Schadensbeben und die erforderlichen Grundlagenarbeiten vor.

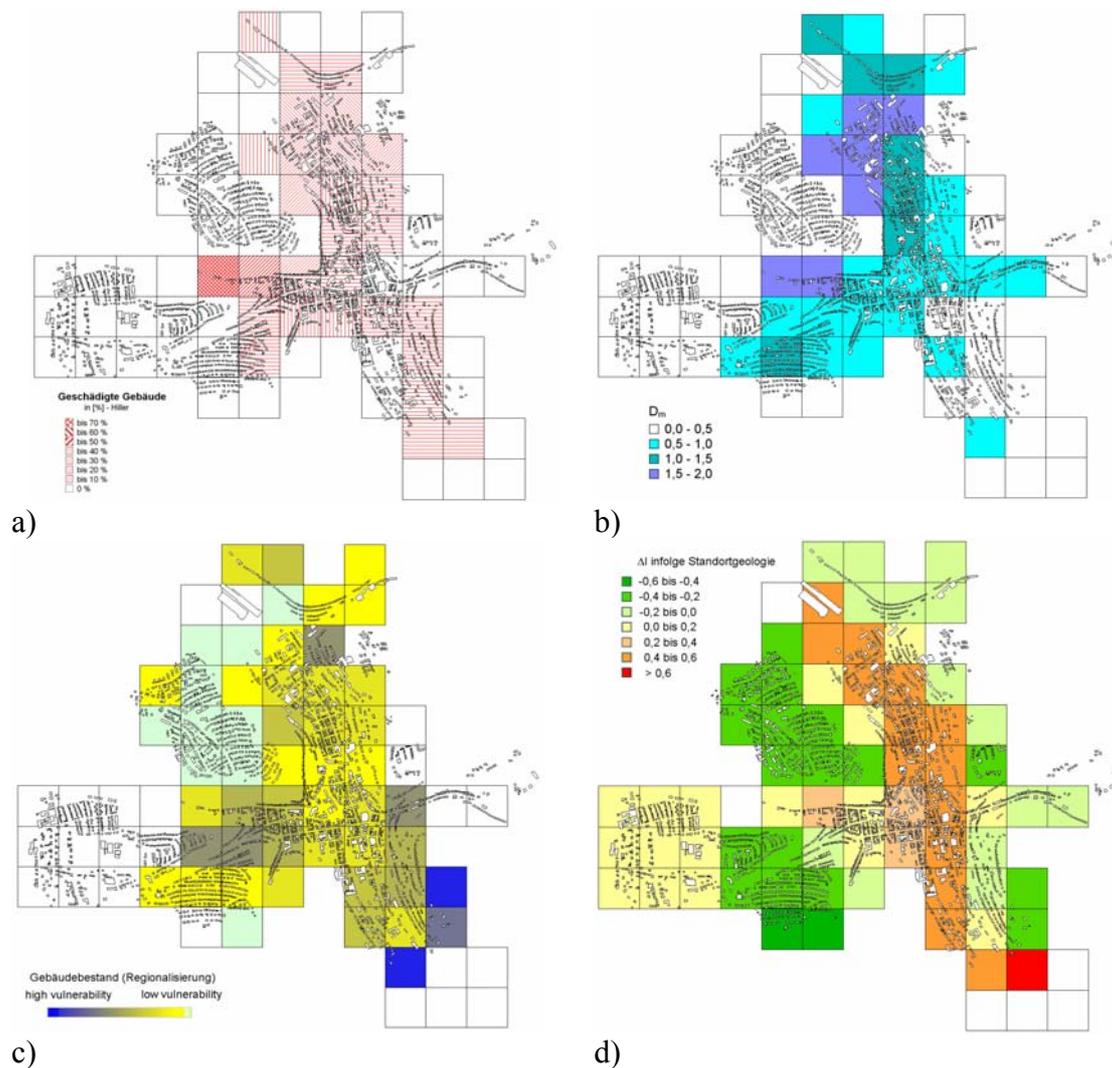


Abbildung 6: Auswertung des Albstadt-Erdbebens vom 3. September 1978:  
a) geschädigte Bausubstanz nach Hiller  
b) Reinterpretation der mittleren Schadensgrade  $D_m$  und Aufbereitung der für ein Schadensmodell relevanten Datenebenen:  
c) Modellebene Regionalisierungsindex  $R_i$  für den Gebäudebestand von 1978  
d) Modellebene der standortbezogenen Korrekturfaktoren der Intensität  $\Delta I_s$

Das Erdbeben vom 3. September 1978 ist das stärkste Beben, das die Bundesrepublik Deutschland in den letzten 50 Jahren betroffen hat. Aufgrund des begrenzten zurückliegenden Zeitfensters ist eine für deutsche Erdbebengebiete einmalige Repräsentativität der vorhandenen Bebauung gewährleistet. Mit der Reinterpretation des Bebens und der Übertragung auf das gegenwärtige Gebäude- und Werteinventar (2005) kann ein realistisches Bild der heute zu erwartenden Folgen gezeichnet werden.

Die Qualität der vom Erdbebenzentrum (EDAC) durchgeführten Studie (Schwarz *et al.*, 2005a) wird durch die detaillierte Bauwerksaufnahme in Anlehnung an den Katasterplan von 1978 unter Hinzuziehung zeitnaher Luftbildaufnahmen und die Bewertung der Bausubstanz begründet. Auf Grundlage der vor Ort aufgenommenen Bauweisen und Bauwerkstypen werden auch die Schadensfälle rekonstruiert und in Form der Schadensgrade klassifiziert. Der Einfluss von Baugrund sowie Topographie wurde durch instrumentelle und analytische Standortanalysen und Einführung entsprechender Einflussfaktoren berücksichtigt. Für das Albstadt-Beben wurden Schadensberichte in Schadensgrade überführt. Die mikroskalig reinterpretierte Situation kann somit in Rasterelementen beliebiger Größe zusammengefasst werden. In Abbildung 6a wird in Anlehnung an die Darstellung der beobachteten Schäden (Hiller, 1985) ein (mesoskaliges) Raster von 250m x 250m gewählt und aus den einzelnen Schadensgraden der späteren Erhebung des Erdbebenzentrums der mittlere Schadensgrad  $D_m$  (vgl. Abbildung 6b) gebildet. Die Abbildungen 6c und 6d verdeutlichen, wie sich die für ein Schadensmodell relevanten Datenebenen des Regionalisierungsfaktors ( $R_i$ ) und der standortbezogene Korrekturfaktoren der Intensität ( $\Delta I_s$ ) hier einordnen lassen: Der Schaden wird im Beispiel erst durch das Zusammenwirken zwischen den Modellebenen Bauwerksverletzbarkeit und Untergrundbedingungen erklärbar.

Nachdem auch das Waldkirch-Beben (Dezember 2005) systematisch ausgewertet wurde (Schwarz *et al.*, 2006c), kann eingeschätzt werden, dass Ereignisse mit bestimmten Mindestintensitäten erforderlich sind, um auch auf der Verlustseite belastbare Informationen ableiten zu können.

Für das Modell Österreich wurden Analogiebetrachtungen zu den für deutsche Erdbebengebiete aufbereiteten Datenebenen gezogen. Aus der Verknüpfung der für Österreich repräsentativen Datenebenen werden Schadensszenarien durchgespielt, die eine flächendeckende Risikoanalyse Österreichs ermöglichen (Abbildungen 3 und 4). Weitere Untersuchungen dienen der Verifikation und sollen sich auf Testgebiete und ausreichend auflösende Dokumentationen zu den Schütterwirkungen von Schadensbeben (u.a. Meurers *et al.* 2004) konzentrieren.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Amstein, S., Lang, D.H., Schwarz, J. 2005. Schütterwirkung historischer Erdbeben und aktuelle Anwendungsgebiete für das Erdbebeningenieurwesen. Bautechnik 82, 9, 641-656.
- Grünthal, G. (ed.), Musson, R., Schwarz, J., Stucchi, M., 1998. European Macroseismic Scale 1998. Cahiers de Centre Européen de Géodynamique et de Seismologie, Volume 15, Luxembourg.
- Hiller, D., 1985. Makroseismische Wirkungen des Albstadt-Bebens vom 3. September 1978 in Baden-Württemberg. Dissertation. Institut für Geophysik der Universität Stuttgart.

- HORA, 2006. Forschungsergebnis seitens des GFZ Potsdam und der ZAMG im Auftrag des Lebensministeriums (BMLFUW) und des Verbandes der Versicherungsunternehmen Österreichs (VVO).
- Langhammer, T., Schwarz, J., Loukopoulus, P., Abrahamczyk, L., Karantoni, F.V., Lang, D.H., 2006. Intensity-based risk assessment for European Earthquake Regions – The 1995 Aigio Earthquake. 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology ECEES Geneva, Switzerland, 2006, Paper 1417.
- Meurers, R., Lenhardt, W.A., Leichter, B., Fiegweil, E., 2004. Macroseismic effects of the Ebreichsdorf earthquake of July 11, 2000 in Vienna, Austria. *Austria Journal of Earth Sciences*, 20-27.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H., 2001a,b. Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmölln/ Ostthüringen (1): Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes, Thesis Heft 1/ 2001. *Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, 180-199. (2): Modellereignisse, lokale Verstärkungseffekte und Schadensszenarien, 200-219.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H., 2002. Seismic Risk Studies for Central Germany on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., Paper Reference 295.
- Schwarz, J., Langhammer, T., Maiwald, H., Smolka, A., 2004a. Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions – Damage and Loss Assessment for the City of Cologne. Proc. 13th WCEE Vancouver, Paper No. 238, 15 p.
- Schwarz J., Maiwald, H., Raschke, M., 2004b. Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale. In: *Risiken durch Naturgefahren. Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK)*. (Hrsg. B. Merz, H. Apel), Scientific Technical Report STR04/01, GeoForschungsZentrum Potsdam, 2004, 135-148.
- Schwarz, J., Langhammer, T., Kaufmann, Ch., 2005a. Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben - Teil 1: Rekonstruktion des Bebens in der Schwäbischen Alb vom 03. September 1978. *Bautechnik* 82, 8, 520-532.
- Schwarz J., Maiwald, H., Langhammer, T., 2005b. Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale. *D-A-CH Mitteilungsblatt* 80, März 2005, In: *Bauingenieur*, März 2005, 7-15.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H., 2006a. Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. *Natural Hazards* 35, Nos 1-2. Special Issue on German Research network Natural Disasters. Towards an integrated risk assessment - Case Studies in Germany (Edited by B. Merz and others), 259-282.
- Schwarz, J., Langhammer, T., Kaufmann, Ch., 2006b. Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben Teil 2: Modellstudie Baden-Württemberg *Bautechnik* 82, 12, 827-841.
- Schwarz, J., Abrahamczyk, S. Amstein, Kaufmann, Ch., Langhammer, T., 2006c. Das Waldkirch-Erdbeben (Baden-Württemberg) vom 5. Dezember 2004. *Bautechnik* 83, 3, 202-208.
- Schwarz, J., Ahorner, L.; Langhammer, T., Kaufmann, Ch., 2007. Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben Teil 3: Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben (3): Modellstudie Niederrheinische Bucht auf der Grundlage des Roermond-Erdbebens vom 13. April 1992 (zur Veröffentlichung eingereicht)