Konzeptionelle Grundlagen und Tools zur Bewertung der Multi-Hazard-Verletzbarkeit von Bestandsbauten

Mit der European Macroseismic Scale 1998 – (EMS-98) steht für die Naturgefahr Erdbeben ein Instrumentarium zur Verfügung, das durch Einführung und konkrete Umsetzung der Verletzbarkeitsklassen (vulnerability classes) die Erklärung der beobachteten Unterschiede im Verhalten der vorherrschenden Bauweisen ermöglicht, zugleich aber auch die Kennzeichnung der rein empirisch begründeten Streubreiten zulässt.

Die grundlegende Methodik ist auch auf andere Naturgefahren wie Hochwasser, Tsunami und Wind übertragbar. Dies ermöglicht die Entwicklung einer vereinheitlichten Methodik zur Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit im Sinne eines Multi-Hazard-Ansatzes.

Erstmals steht ein verletzbarkeitsorientiertes Instrumentarium zur Verfügung, um einen Gebäudebestand für unterschiedliche Naturgefahren nach ingenieurmäßig vereinheitlichten Kriterien bewerten zu können.

Die Multi-Hazard-Verletzbarkeit mit ihren möglichen Streubreiten wird an realen Bauwerksbeständen untersucht und visualisiert.

Mit dem Konzept der "LEGOisierung" der Bestandsgebäude wird ein neuartiger Ansatz vorgestellt, um über die Substrukturierung der Gebäude in Geschosse (inkl. Dach, Keller und Decken) eine Weiterentwicklung der Typisierung in Richtung konkreter Schadensmerkmale und der lokalen Verletzbarkeit zu ermöglichen.

Es wird ein Ausblick auf ein zu entwickelndes "Konzeptionelles Simulations-Tool" gegeben, welches mit den entwickelten Tools und Methoden die Simulation von Schäden und Verlusten infolge verschiedener Naturgefahren und ihrer Abfolgen ermöglicht.

Keywords Verletzbarkeitsklassen; Schadensgrade; Substrukturierung; Multi Hazard; Erdbeben; Hochwasser; Tsunami; Wind; Simulation

1 Vorbemerkungen

Für die Prognose von Schäden infolge der Naturgefahren Erdbeben, Hochwasser und Wind sind Bestandsgebäude in digitaler Form abzubilden. Auf Grundlage der erhobenen relevanten Bauwerksparameter ist dann die Verletzbarkeit der Bestandsbauten gegenüber den einzelnen Naturgefahren festzulegen. Dazu sind zunächst die verfügbaren Daten und die daraus abzuleitenden Vorgehensweisen zu betrachten.

*) Corresponding author: holger.maiwald@uni-weimar.de Submitted for review: 19 February 2018 Revised: 13 April 2018 Accepted for publication: 06 July 2018

Conceptual basics and tools to assess the multi hazard vulnerability of existing buildings

The European Macroseismic Scale 1998 – (EMS-98) is an instrument for the natural hazard of earthquakes, which allows the explanation of the observed differences in the behavior of the prevailing building types by introducing and concrete implementation of the vulnerability classes. The EMS-98 enables also the identification of purely empirically justified ranges of scatter.

The basic methodology is also applicable to other natural hazards such as flood, tsunami and wind. This allows for the development of a unified methodology for the consideration of building vulnerability in the sense of a multi hazard approach. For the first time, a vulnerability-oriented instrument is available to evaluate a building stock for different natural hazards according to criteria that have been standardized in terms of engineering.

The multi hazard vulnerability with its possible spreads is examined and visualized on real building inventories.

With the concept of "LEGOisation" the existing buildings, a novel approach is presented to allow the sub-structuring of buildings in stories (including roof, basement and ceiling) to further development of the classification towards specific damage characteristics and local vulnerability.

It provides an outlook on a "Conceptual Simulation Tool" to be developed, which uses the tools and methods developed to simulate damage and losses as a result of various natural hazards and their sequences.

Keywords vulnerability classes; damage grades; substructuring; multi hazard; earthquake; flood; tsunami; wind; simulation

Ein erster Einstieg ist auf Grundlage von statistischen Angaben der einzelnen Bundesländer möglich. Die zur Verfügung stehenden Daten wurden in [1] ausgewertet und in [2] aktualisiert. Die Angaben orientieren sich dabei maßgeblich am Baualter. Sie sind insofern hinsichtlich der Geschosszahlen und der Bauweisen nicht aussagefähig und erfordern mit dem Ziel der geostatistischen Extrapolation eine detaillierte Aufnahme von Testgebieten [3, 4].

Unsicherheiten bei Schadensprognosen können durch die Simulation der Zusammensetzung des realen Bauwerksbestands betrachtet werden. Wesentliche Voraussetzung dafür ist es, die Gefährdung anhand der realen Gegebenheiten zu beschreiben und eine lagen- bzw. höhengetreue Wiedergabe der Bestandsgebäude im Kontext von Extrapolations- und Simulationsverfahren [5] sicherzustellen.

Grundlegend neue Fragstellungen ergeben sich, wenn die Gefährdung durch unterschiedliche Naturereignisse bestimmt ist [6, 7] bzw. im Extremfall die hohe (und zunehmende) Wahrscheinlichkeit von Ereignisfolgen (z. B. wiederholt auftretende Hochwasserereignisse, Tsunami durch Erdbeben ausgelöst, Erdbebenserien, Sturmfluten, s. auch [8]) den Übergang von einer Single-Hazard- zu einer Multi-Hazard-Betrachtung der Naturgefahren erfordert. Aktuelle Ereignisse und Bebenserien (z. B. 2016/2017 in Italien [9]) werfen zudem die Frage auf, wie Gebäude im Hinblick auf aufeinanderfolgende starke Erdbeben (Kaskaden von gleichartigen Ereignissen) zu bewerten und welche Konsequenzen daraus abzuleiten sind.

International stehen verschiedene Tools und Software-Pakete zur Verfügung, die - mehr oder weniger regional zugeschnitten - eine Multi-Hazard-Risikobewertung ermöglichen sollen und die grundsätzlich die Bereitstellung der dafür erforderlichen Datenebenen voraussetzen. Die Vielfalt der Angebote darf auch so interpretiert werden, dass es unterschiedliche Auffassungen, Ansätze und derzeit noch keinen allgemeingültigen Standard gibt. Eine aussagefähige Zusammenstellung in [10] verdeutlicht, dass es nur in wenigen Beispielstudien gelungen ist, eine vergleichende Betrachtung am Maßstab der realen (probabilistisch beschriebenen) Gefährdungssituation vorzulegen. Als mustergültig ist die Modellstudie Köln zu würdigen, die im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzwerks Naturgefahren (DFNK) als Synopse der Naturgefahren zahlenkonkret realisiert wurde [11, 12]. Der Bewertungsmaßstab beschränkt sich aufgrund des damaligen (versicherungstechnisch geprägten) Stands der Methodenentwicklung auf den Vergleich der Verluste über den Bereich von Ereigniswahrscheinlichkeiten. (Die Autoren haben hier die Ergebnisse zur Risikoanalyse Erdbeben beigetragen [3, 12].) Auf diese Arbeiten wird auch in [8] zurückgegriffen.

Der hier vorgestellte Ansatz konzentriert sich auf die ingenieurmäßige Bewertung der Verletzbarkeit von Bestandsgebäuden durch unterschiedliche (vorwiegend jedoch durch horizontalen Lasteintrag gekennzeichnete) Naturgefahren, mit dem Ziel, auf dieser Grundlage Schäden in Form von Schadensgraden zu prognostizieren. Diese wiederum ermöglichen es, aus der Dominanz der einzelnen Ereignisse auch Konsequenzen für konstruktive, ereignisgerechte Maßnahmen begründen zu können, wenn die Betrachtungsebene vom Gebäude auf die Geschosse (Dach, Keller) gebrochen bzw. verfeinert werden kann.

2 Erhebung von Bestandsdaten unter Berücksichtigung der einzelnen Naturgefahren

2.1 Relevante Gebäudedaten

Je nach Größe des Untersuchungsgebiets und des zur Verfügung stehenden Datenangebots sind unterschiedliche Ansätze zur Erfassung des betroffenen Bauwerksbestands erforderlich. Makro- und mesoskalige Vorgehensweisen, welche Risiko- und Schadenspotenzialuntersuflächennutzungsbasiert im chungen großräumigen Maßstab ermöglichen, werden zunehmend von mikroskaligen Ansätzen auf Einzelobjektebene verdrängt [13]. Eine Herausforderung besteht darin, den Bauwerksbestand mit seinen für die Untersuchungen relevanten Parametern detailliert zu beschreiben. Hierzu zählen neben den Angaben zur Nutzung und Bauwerksgeometrie (unverzichtbar für die Wertermittlung) vornehmlich die Informationen (und daraus zumeist erst ingenieurmäßig

Bauwerksdaten	Globale Bauwerksdaten		Bauwerksdaten je Etage (KG, EG, 1. OG,, DG)	Schornstein(e)
Primär dokumentiert Sekundär abgeschätzt	Adresse (Straße, Hausnr.) Nutzung Haustyp (Lage) Keller Etagen Anzahl Dach (Form, Neigung, Konstruktion, Ausbau Eindeckung, Aufbauten) Baujahr	Grundfläche Traufhöhe Firsthöhe Höhe OKF-OKG ¹⁾ Höhe tiefste Öffnung Höhe Eingang Wärmedämmung Öffnungsanteil Fassade Ausstattungsgrad Sanierungsstatus Zustand	Primärnutzung Sekundärnutzung Höhe Etage Bauweisen (primär, sekundär, Geschossdecke) Baustoffe (1, 2,).	Bauweise Position Abdeckung Abspannungen
zugeordnet	NHK-Schlüssel ²⁾			
Engineering judgement		Regularität (soft story, short column, Versätze)	Verletzbarkeitsklassen EQ, HW, W ³⁾	

¹⁾ Höhe Erdgeschossfußboden über Geländeoberkante

²⁾ Normalherstellungskosten [18, 22]

³⁾ Erdbeben (EQ), Hochwasser (HW), Wind (W)

Relevante Gebäudedaten [21]

Relevant building parameter [21]

Tab. 1





abzuleitende Parameter bzw. Kenngrößen) zur Bewertung der Verletzbarkeit von Bauwerken bzw. Bauweisen.

Die aktuelle Situation ist wie folgt einzuschätzen: Das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) enthält zwar lagegenaue Geometriedaten der Liegenschaften (differenziert nach einem Objektschlüsselkatalog für die Nutzungen), aber meist nur ungenaue Angaben zu den Etagenzahlen und keine Angaben zu Bauweisen. Während Etagenzahlen in guter Näherung aus den amtlichen 3-D-Gebäudemodellen in die Level of Detail LOD 1 und LOD 2 abgeleitet werden können, sind die verletzbarkeitsbestimmenden Parameter wie die Bauweisen, Regularitätskriterien und der Zustand der Einzelgebäude durch Vor-Ort-Inspektion zu erheben.

Eine Übersicht zu den für die hier betrachteten Naturgefahren relevanten Bauwerksdaten ist der Systematik von Tab. 1 zu entnehmen. Sie berücksichtigt Erfahrungen der Bauwerksaufnahmen zur seismischen Risikokartierung [3, 14, 15] bzw. zur Validierung des EDAC-Hochwasserschadensmodells [16–20].

2.2 Erhebungsmethoden

2.2.1 Random Urbanisation Monitoring (RUM)

Vollständige mikroskalige Vor-Ort-Bestandserhebungen [14, 17–19] sind zeit- und kapazitätsaufwändig und demzufolge nicht immer durchführbar. Aus diesen Gründen wurde das "Random Urbanisation Monitoring" (RUM-Methode) als alternatives Verfahren zur Erhebung der relevanten Kenngrößen des Bauwerksbestands entwickelt [23].

Dabei werden im Untersuchungsgebiet unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bebauungsdichten zufallsgeneriert Bauwerke zur Bestandserhebung ausgewählt. Die Anzahl der auszuwählenden Bestandsbauten ist in Abhängigkeit von der Größe des gesamten Untersuchungsgebiets festzulegen (Bild 1).

Die Schritte der RUM-Methode werden in Bild 1 für das Untersuchungsgebiet Sarnen in der Schweiz dargelegt:

- 1. Abgrenzung des Untersuchungsgebiets in der Liegenschaftskarte (Bild 1a);
- 2. Kennzeichnung von Gebieten unterschiedlicher Bebauungsdichte (Bild 1b);
- 3. Zufallsgenerierte Festlegung von Inspektionspunkten unter Berücksichtigung der Bebauungsdichte und Auswahl des nächstgelegenen Bauwerks für die Datenerhebung (Bild 1c).

Nach Zuweisung der Bauwerksparameter gemäß Tab. 1 werden die Verletzbarkeitsklassen gegenüber den Naturgefahren (hier: Erdbeben) festgelegt (Bild 2a).

2.2.2 Vergleich zur vollständigen Aufnahme des Bauwerksbestands

Die Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit des "Random Urbanisation Monitoring" wurde in verschiedenen Untersuchungsgebieten getestet. Bild 2 zeigt den Vergleich der Verteilung der Erdbebenverletzbarkeitsklassen gemäß der EMS-98 [24] nach der RUM-Methode und nach vollständiger Aufnahme des Bauwerksbestands. Es darf geschlussfolgert werden, dass die RUM-Methode gut geeignet ist, die Verletzbarkeit eines größeren Bauwerksbestands (s. Abschn. 3) zu erfassen. Vorhandene Abweichungen liegen in einem tolerablen Bereich.

2.3 "EQUIP"-Bauwerkserhebungstool

In Reaktion auf den rasanten Zuwachs an Geodaten und Geoinfomationssystemen wurde für die Erhebung der re-



Bild 2 Verteilung der Verletzbarkeitsklassen: Ergebnisse des "Random Urbanisation Monitoring" und der vollständigen Bauwerksaufnahme Distibution of vulnerability classes: results from "Random Urbanisation Monitoring" and complete building survey

levanten Bauwerksparameter (Tab. 1) die datenbankgestützte Softwarelösung "Elaboration, Qualifikation and Identification Platform (EQUIP)" entwickelt (Screenshots in Bild 3). Im Rahmen der Datenerhebung werden die Bauwerksgrundrisse (z. B. die Hausumringe aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem ALKIS) in das "EQUIP"-Tool integriert und mit der programminternen Datenbank verknüpft [21].

Die Dateneingabefelder lassen sich im Programm durch einfaches Auswählen des betreffenden Bauwerksgrundrisses aktivieren. Vordefinierte Auswahlfelder und die Möglichkeit, freien Text einzutragen, ermöglichen eine überaus effiziente Dateneingabe. Die verschiedenen einblendbaren Hintergrundkarten (Satellit, Straßenkarte bzw. hybride Darstellung) in Verbindung mit der Anzeige des eigenen Standorts (bei GPS-fähigen Tablett-PCs) erleichtern die Orientierung im Untersuchungsgebiet.

Das Tool hat sich auch bei der Aktualisierung und Ergänzung der Ingenieuranalysen der von extremen Naturereignissen betroffenen Untersuchungsgebiete bewährt [25, 26]. Die erhobenen Bauwerksdaten ermöglichen programmintern eine automatisierte Zuweisung der Verletzbarkeitsklassen für die einzelnen Naturgefahren entsprechend der in Abschn. 3 vorgestellten Vorgehensweise.

2.4 Fragebögen

Für die Bewertung der Bauwerksverletzbarkeit gegenüber verschiedenen Naturgefahren ist eine breite und fundierte Datenbasis von realen Schadensfällen notwendig [27]. Neben den Angaben zu den Schäden sind dabei die relevanten Parameter der Gebäude und der Einwirkungscharakteristik von Bedeutung. Derartig qualifizierte Schadensdaten wurden z. B. nach dem Hochwasser 2002 von verschiedenen für die Schadenserfassung und -regulierung zuständigen Stellen erhoben und zentral gesammelt [16–18].

Der wissenschaftlichen Auswertung derartiger Schadensdaten sind jedoch z.T. datenschutzrechtliche Grenzen gesetzt. Eine direkte Befragung der Eigentümer erweist sich als zielführende Erhebungsmöglichkeit [16, 19], da alle relevanten Angaben abgefragt und die Daten von den Eigentümern für die wissenschaftliche Nutzung autorisiert werden können. Von den Autoren wurden mehrseitige Fragebögen für Erdbeben-, Hochwasser- und Tornado-/Sturmschäden entwickelt, die auf den Webseiten des EDAC als Online-Version aufrufbar sind [28].

Es darf mit Hinweis auf die entsprechend eingerichteten EDAC-Internetseiten auf eine weitergehende Erläuterung verzichtet werden.

Die für die entsprechende Naturgefahr zu erhebenden relevanten Bauwerksparameter orientieren sich an Tab. 1. Die Abfragen zur Beschreibung der individuell beobachtbaren Schadensbilder bzw. -muster sind ebenso spezifisch auf die einzelnen Naturgefahren zugeschnitten.

3 Multi-Hazard-Verletzbarkeit der Bestandsbebauung

3.1 Bewertungssystem der Verletzbarkeitsklassen

Die primäre Herausforderung für die Typisierung des Bauwerksbestands besteht darin, für Gebäude bzw. einzelne Bauweisen anhand der ingenieurrelevanten Merkmale der Widerstandsfähigkeit gegenüber den spezifischen Einwirkungen aus den Naturgefahren die verletzbarkeitsdeterminierenden Eigenschaften und phänomenologischen Indikatoren festzulegen und diese in einem fundierten ingenieurmäßigen Bewertungssystem zusammenzuführen.



a) Übersichtskarte (Hintergrund: Satellit) / Overview map (background: satellite)



b) Detailansicht (Hintergrund Straßenkarte) / Detail view (background street map)

Bild 3 EDAC-Erhebungstool "EQUIP" zur Dokumentation der Bauwerksparameter (mit Hintergrundkarten aus Bing Maps) EDAC survey tool "EQUIP" for the documentation of building parameters (with background maps from Bing Maps)

Für die Naturgefahr Erdbeben führten diese Überlegungen zur Entwicklung der Europäischen Makroseismischen Skala (European Macroseismic Scale 1998 – EMS-98) [24]. Als wesentliche Innovationen und Qualitätsmerkmale sind hervorzuheben:

- die Einführung und konkrete Umsetzung der Verletzbarkeitsklassen (vulnerability classes) in ein Schema für die in Europa und weltweit vorherrschenden Bauweisen und
- die Berücksichtigung der zunächst rein empirisch begründeten Streubreiten.

Eine Ist-Stands-Analyse der Situation bei den anderen Naturgefahren führt zu folgenden Feststellungen:

Das sechsstufige Konzept der Verletzbarkeitsklassen (A–F) gemäß der EMS-98 [24] wurde im EDAC-Hochwasserschadensmodell [16, 18, 19] auf die Naturgefahr Hoch-

wasser übertragen. Zusätzlich zur ursprünglich aufgestellten fünfstufigen Verletzbarkeitstabelle (HW-A–HW-E) wird in [25] eine zusätzliche Verletzbarkeitsklasse für ein "Flood Evasive Design (FED)" für Konstruktionen wie "floating homes" berücksichtigt. Mit dieser Erweiterung wird die Verletzbarkeitsklasse "F" (HW-F) auch für Hochwasserereignisse eingeführt.

Eine erfahrungsbasierte, ebenfalls sechsstufige Verletzbarkeitstabelle für die Windeinwirkung wird in [25] vorgestellt. Die dabei vorläufig getroffenen Festlegungen sind künftig an einer ausreichenden Schadensdatenbasis mit einer entwickelten, mathematisch fundierten Methodik zu validieren und zu plausibilisieren.

Ein von den Autoren in [20] vorgestellter und in [29] weiterentwickelter Ansatz gibt erstmals eine wissenschaftlich nachvollziehbare (noch schematisch) gehaltene ErkläJ. Schwarz, H. Maiwald, C. Kaufmann, T. Langhammer, S. Beinersdorf: Konzeptionelle Grundlagen und Tools zur Bewertung der Multi-Hazard-Verletzbarkeit von Bestandsbauten



Bild 4 Vorgehensweise zur Festlegung der Verletzbarkeitsklasse (schematisch) Procedure for determining the vulnerability class (schematic)

rung, wie anhand von Schadensdaten die Verletzbarkeitsklassen für verschiedene Naturgefahren definiert und die Streubereiche des beobachteten Verhaltens in Bereiche der Verletzbarkeitsklassen überführt werden können.

In Erweiterung dieser Entwicklungen werden das empirische Konzept der Bewertung der Bauweisen nach Verletzbarkeitsklassen [24] und die dabei eingeführten empirisch-grafischen Elemente zur Kennzeichnung der Streubereiche in [30] in einer analytischen Beschreibungsform repräsentiert. Dabei wurden Verletzbarkeitstabellen für Erdbeben auf Grundlage von analytisch ermittelten "fragility functions" abgeleitet, welche als synthetische Schadensdatenbasis genutzt wurden.

Die i.d.R. sehr unsymmetrischen Schadensverteilungen werden durch einen Ansatz der Beta-Verteilung analytisch erfasst und auf konkrete Datensätze übertragen [30]. Am Beispiel von Schadensdaten der Tsunami-Ereignisse im Indischen Ozean 2004 [31, 32] und nach dem Tohoku-Erdbeben in Japan 2011 [33] wurden entsprechende Verletzbarkeitstabellen erstmals für die von Tsunami betroffenen Bauweisen entwickelt.

Die Einordnung des betrachteten Bauwerks in die Verletzbarkeitsklassen für die einzelnen Naturgefahren erfolgt dabei entsprechend der Vorgehensweise in Bild 4. Dem Bauwerk bzw. dem relevanten Bauwerksbereich wird zunächst eine "most likely vulnerability class" entsprechend den farbig gerahmten konstruktiven Hauptmerkmalen zugewiesen. Die endgültige Zuordnung wird in einem zweiten Schritt innerhalb des vorgesehenen Streubereichs vorgenommen. Die Verschiebung erfolgt dabei über sogenannte "vulnerability adjuster", welche den nachweislich verletzbarkeitsbeeinflussenden Merkmalen Rechnung tragen.

Für die Bewertung der Verletzbarkeit von Bauwerken gegenüber verschiedenen Naturgefahren mit der entwickelten Methodik und die Prognose von Schäden im Multi-Hazard-Kontext sind vereinheitlichte Schadensbeschreibungen notwendig, denen die Schadensskalen für die einzelnen Naturgefahren folgen. In [27] werden aus wiederholt beobachteten Schadensmustern qualitativ vergleichbare Schadensgrade für die einzelnen Naturgefahren abgeleitet.

Die automatisierte Zuweisung der Verletzbarkeitsklassen im "EQUIP"-Tool ersetzt die bei bisherigen Bestandserhebungen durchgeführte "Expert based"-Zuordnung durch verschiedene Bearbeitergruppen. Der Vergleich der unterschiedlichen Vorgehensweisen für die Naturgefahr Erdbeben in den Untersuchungsgebieten Onstmettingen (Gemeinde Albstadt) und Nieder-Beerbach [26] kann Bild 5 entnommen werden. Die Ergebnisse zeigen einerseits den vorteilhaften Einstieg über die wahrscheinlichs-





a) Untersuchungsgebiet Onstmettingen (Baden-Württemberg) Investigation area Onstmettingen (Baden-Wurttemberg)



Bild 5 Vergleich der Vorgehensweisen zur Festlegung der Verletzbarkeitsklassen Comparison of procedures for determining the vulnerability classes

te (most likely) Verletzbarkeitsklasse (vulnerability class) nach EMS-98, andererseits aber die Notwendigkeit, im definierten Streubereich die zutreffende Einordnung bzw. Anpassung (adjustment) vorzunehmen und die dafür erforderlichen Hilfsmittel bereitzustellen.

Um den tatsächlichen Gegebenheiten gerecht zu werden, werden für die Verletzbarkeitsbewertung in den Untersuchungsgebieten (Bilder 2, 5) auch die in [14] eingeführten Zwischenklassen (AB, BC usw.) berücksichtigt bzw. zugelassen.

3.2 Konzeptionelle Grundlagen der Typisierung

Durch die Überführung der einzelnen Bewertungsschemen/Verletzbarkeitstabellen in ein Multi-Hazard-Vulnerability-Modell wird eine integrative Bewertung der Verletzbarkeit des Bauwerksbestands gegenüber verschiedenen Einwirkungen (hier Erdbeben, Hochwasser und Wind) in einem einheitlichen System ermöglicht (Bilder 6, 7). Die Naturgefahr Hochwasser kann auch für die Tsunami-Einwirkung stehen, sofern die Schädigungen durch ein vorangehendes Erdbeben vernachlässigbar bleiben.

Der abgegrenzte Raum in Bild 6a beschreibt die Verletzbarkeit der zu untersuchenden allgemeinen Hochbauten. Untergeordnete Gebäude, deren Verletzbarkeiten gegenüber allgemeinen Hochbauten deutlich höher sind, und Spezialbauwerke mit einer deutlich geringeren Verletzbarkeit sind hier nicht Gegenstand der Untersuchungen. Bild 6b zeigt die Einordnung von unterschiedlichen Bauweisen eines fiktiven Bauwerksbestands in das Konzept.

Zur Charakterisierung der mittleren Verletzbarkeit von verschiedenen Bauweisen (Bild 7a), aber auch von komplexen Bauwerksbeständen (Bild 7b) wird ein Multi-Hazard-Vulnerability-Index (MHVI) abgeleitet. In Weiterentwicklung des Konzepts in [34] werden den einzelnen Verletzbarkeitsklassen für die einzelnen Naturgefahren Score-Werte (SV_{i,NH}) zugewiesen, womit der MHVI für die einzelnen Bauweisen bzw. Bauwerksbestände ermittelt werden kann.

Für jede Naturgefahr wird zunächst ein Single-Hazard-Vulnerability-Index (SHVI_{NH}) entsprechend Gl. (1) ermittelt. Die Kombination der SHVI_{NH} bildet den Multi-Hazard-Vulnerability-Index (MHVI) gemäß Gl. (2) und führt zu einer charakteristischen Lage ("Koordinaten") im 3-D-Multi-Hazard-Verletzbarkeitsraum ("multi hazard vulnerability space" – MVHS, Bild 7). Der MHVI kann prinzipiell auf weitere Naturgefahren ausgedehnt werden.

$$SHVI_{NH} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m} SV_{i,NH} \cdot k_{i,NH}$$
(1)

- NH Erdbeben (EQ), Hochwasser (HW), Wind (W)
- SV_{i,NH} Score-Wert der Verletzbarkeitsklasse für die entsprechende Naturgefahr NH
- k_{i,NH} Anzahl Bauwerke einer Verletzbarkeitsklasse für die entsprechenden Naturgefahr NH im Untersuchungsgebiet
- *m* Anzahl der betrachteten Verletzbarkeitsklassen (6 – ohne, 11 – mit Zwischenklassen)
- *n* Anzahl der Bauwerke im Untersuchungsgebiet

$$MHVI = \begin{bmatrix} SVHI_{EQ} \\ SVHI_{HW} \\ SVHI_{W} \end{bmatrix}$$
(2)

Mit dem MHVI können charakteristische Verletzbarkeitsausprägungen in den unterschiedlich von Naturge-



Bild 7 Konzept eines Multi-Hazard-Vulnerability-Index (MHVI) [21, 25] Concept of the multi hazard vulnerability index (MHVI) [21, 25] Erläuterungen: V-L: Geringe Verletzbarkeit (low vulnerability) V-H: Hohe Verletzbarkeit (high vulnerability)

fahren dominierten Untersuchungsgebieten herausgestellt werden.

Perspektivisch wird sich mit der Methodik klären lassen, welche Naturgefahren für das Eintreten eines Bauwerkschadens (oder -kollapses) dominant bzw. auslegungsrelevant sind [25].

3.3 Ergebnisse und Darstellungsformen

Mit der in Abschn. 3.1 dargelegten Methodik werden den Bestandsgebäuden bzw. Schadensfällen (Abschn. 2.4) die Verletzbarkeitsklassen für die drei betrachteten Naturgefahren zugewiesen.



Bild 8 Anwendung der Farbenlehre zur Darstellung der Multi-Hazard-Verletzbarkeit der Bauweisen [21, 25] Application of the theory of colors to illustrate the multi hazard vulnerability of the building types [21, 25]

Für die Visualisierung der Bauwerksverletzbarkeit erscheint es zum gegenwärtigen Zeitpunkt als einfachste Option, die Gebäude entsprechend ihren Verletzbarkeitsklassen einzufärben. Nach Festlegung von Grundfarben für die Naturgefahren (Erdbeben: grün, Hochwasser: blau, Wind: rot) sind "Additive Mischfarben" nach der Farbenlehre (Bild 8) einzuführen.

Die Anwendung dieses Verfahrens ist in Bild 9 exemplarisch für das Untersuchungsgebiet Onstmettingen (Gemeinde Albstadt) dargestellt, das durch das Albstadt-Erdbeben 1978 stark in Mitleidenschaft gezogen wurde. (Hinweis: Die Anwendung auf die vom Hochwasser 2002 betroffene Altstadt von Grimma in Sachsen kann [21] entnommen werden.)

Eine weitere Möglichkeit zur Visualisierung der Verletzbarkeit des Bauwerksbestands eines Untersuchungsgebiets bildet die 3-D-Bubble-Darstellung (Bild 8a). Dabei werden die unterschiedlichen Anteile der einzelnen Verletzbarkeitskombinationen über den Durchmesser der Globen wiedergegeben. Für die beiden Untersuchungsgebiete kann Bild 10 entnommen werden, dass sich mehrere (oder wenige) dominante Typen abheben. Für einen Bestand kann somit ein charakteristischer "Foot-Print" angegeben werden, der auch eine Anpassung an die dominierende(n) Naturgefahr(en) wiedergeben kann.

Anzumerken ist, dass aus Darstellungsgründen in den Bildern 8–10 keine Zwischenklassen berücksichtigt werden. Diese sind gewissermaßen der entsprechenden Verletzbarkeitsklasse gemäß den ursprünglichen Verletzbarkeitstabellen in [18, 24, 25] zugeschlagen.

Aus den Bildern 9, 10 wird deutlich, dass in den hier betrachteten Untersuchungsgebieten insbesondere die Verletzbarkeitsklassen E und F (welche i.d. R. für eine naturgefahrengerechte Bauwerksauslegung stehen) nicht bzw. nur selten vorzufinden sind. Gegenüber der vornehmlich hochwassergefährdeten Altstadt von Grimma (Bild 10a) zeigt am Beispiel von Onstmettingen Bild 10b die Anpassung des Bauwerksbestands an die Erdbebengefährdung.

Bild 11 visualisiert für verschiedene Untersuchungsgebiete den Multi-Hazard-Vulnerability-Index (MHVI) gemäß Gl. (2) mit der zugehörigen Streuung ($\pm 1\sigma$ Standardabweichung) für jede der betrachteten Naturgefahren.

4 "LEGOisierung" der Bestandsbauten

Ausgehend von den gewonnenen Erfahrungen bei der seismischen Risikokartierung [3, 14, 15] wurde bei der Entwicklung des EDAC-Hochwasserschadensmodells [18] berücksichtigt, dass die Verletzbarkeit des Bauwerks in den einzelnen Etagen durch verschiedene Bauweisen (z. B. Holzständerkonstruktion auf Stahlbetonkeller) sehr unterschiedlich sein kann. Die konstruktive Ausbildung kann je nach Wasserstand und den betroffenen Bereichen einen großen Einfluss auf die zu erwartenden Schäden haben. Zur Berücksichtigung dieser Unterschiede stehen verschiedene Verletzbarkeits- und Schadensfunktionen zur Verfügung [18, 19].

Bei der Naturgefahr Erdbeben können sich Irregularitäten in den Bauwerksgrundrissen z. B. infolge unterschiedlicher Bauweisen in den einzelnen Etagen bzw. infolge der damit verbundenen Steifigkeitsunterschiede/-sprünge in lokalen Schäden und Besonderheiten des Verhaltens von Tragstruktur und nicht strukturellen Elementen auswirken. Speziell bei Mauerwerksbauten spielen auch die Anzahl der Etagen und die Art der Deckenausbildung A

D

в

C D



a) Erdbeben / Earthquake



b) Hochwasser / Flood



c) Wind / Wind



d) Multi Hazard (Farbliche Darstellung gemäß Bild 8a) Multi hazard (color representation according to fig. 8a)

Bild 9 Verletzbarkeitsklassen der Bestandsgebäude im Untersuchungsgebiet Onstmettingen für die verschiedenen Naturgefahren [25] Vulnerability classes of the buildings in study area Onstmettingen to the different natural hazards [25]

eine nicht zu vernachlässigende Rolle für die Bauwerksverletzbarkeit und damit für die Schadensausbildung.

Diese grundlegenden Überlegungen werden zur Darstellung der Bebauung im Hinblick auf ihre Typisierung, Verletzbarkeit (unter abstrakten und konkreten Mehrfach-Ge-



a) Grimma, Altstadt (vornehmlich hochwassergefährdet) Grimma, old town (primarily flood-prone)



b) Onstmettingen (vornehmlich erdbebengefährdet) Onstmettingen (primarily earthquake-prone)

Bild 10 Multi-Hazard-Verletzbarkeit verschiedener Untersuchungsgebiete [21, 25]

Multi hazard vulnerability of different investigation areas [21, 25]

fährdungen aus Naturgefahren) sowie einer eingängigen (und aussagefähigen) Visualisierung weiterentwickelt. Dazu wurde in [21] das Konzept der "LEGOisierung" vorgeschlagen (Bild 12), mit dem eine Weiterentwicklung der Typisierung in Richtung konkreter Schadensmerkmale ermöglicht werden soll. Dazu sind die Bauwerke in Geschosse (inkl. Dach, Keller) und Decken zu substrukturieren. Die daraus resultierenden Kubaturen der Gebäudebereiche sind in der Visualisierung differenzierbar und "trennbar" (abhebbar). "LEGOisierung" bedeutet, Geschosse nach unterschiedlichen Bauweisen (= Materialien) und Deckentypen abzubilden und auf dieser Grundlage die



a) Untersuchungsgebiete im westlichen Teil Deutschlands und der Schweiz Investigation areas in Western Germany and Switzerland

Bild 11 Multi-Hazard-Verletzbarkeit Index mit \pm 1 σ Standardabweichung [25] Multi hazard vulnerability index with \pm 1 σ standard deviation [25]

Verletzbarkeit des Gebäudes über etagenspezifische Verletzbarkeitsklassen (inkl. Keller- und Dachgeschoss) zu differenzieren. In der Konsequenz bedeutet dies aber auch, dass hinsichtlich Bauweise, Grundriss- und Deckenausbildung ähnlich strukturierte Geschosse mehrgeschossiger Gebäude bereichsweise zusammengefasst betrachtet werden können. Zielstellung der "LEGOisierung" sind detaillierte Aussagen zur Verletzbarkeit und zur Schadenserwartung der durch die einzelnen Naturgefahren lokal unterschiedlich beanspruchten Bauwerkszonen.

5 Ausblick

In der Fortführung der Arbeiten ist das aus dem Erdbebenbereich bekannte Konzept der Einwirkungsintensität auf andere Naturgefahren zu übertragen. Die Einwirkungsintensitäten sind so zu definieren, dass für die jeweilige Naturgefahr charakteristische Parameterbereiche festgelegt werden, die bei einer bestimmten Verletzbarkeitsklasse charakteristische Schadensgrade [27] erwarten lassen.

Es sind zudem Expositionsklassen festzulegen, welche die konkrete Gefährdungssituation durch die einzelnen Naturgefahren am Standort widerspiegeln und somit eine Bewertung der Dominanz der entsprechenden Naturgefahren bzw. einen direkten Vergleich der Gefährdung erlauben (Bild 13). Die Herausforderung besteht darin, ausgehend von normentypischen Zonenabgrenzungen die qualitative Beschreibung (z. B. low, moderate, high) mit konkreten (quantitativen) Kenngrößen zu korrelieren, die sich in charakteristischen Schadensgraden für die jeweilige Multi-Hazard-Verletzbarkeit widerspiegeln.



b) Untersuchungsgebiete im östlichen Teil Deutschlands Investigation areas in Eastern Germany



Bild 12 LEGOisierung von Bestandsbauten [21] LEGOisation of existing buildings [21]

Derzeitige Schadensmodelle prognostizieren einen globalen Schadensgrad für das gesamte Bauwerk. Die mit der "LEGOisierung" verbundene Substrukturierung der Bauwerke und ihre etagenkonkreten Verletzbarkeitsklassen werden es ermöglichen, den Etagen expositions- und einwirkungsabhängig lokale Schadensgrade D_{FLi} zuzuweisen (s. Konzept in [27]).

Die Elemente sind in einem "Konzeptionellen Simulations-Tool" zusammenzuführen, welches die Ermittlung von Schadensgraden für die mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden verbundenen Einwirkungsintensitäten der einzelnen Naturgefahren im entsprechenden Untersuchungsgebiet ermöglicht.



Bild 13 Festlegung von Expositionsklassen nach dem Schema der Einwirkungsintensitäten (EQ-HW-W)

Definition of exposure classes according to the scheme of intensities (EQ-HW-W) $\ensuremath{\mathsf{EQ}}$

Das Vorgehen sei an einem Beispiel erläutert; nicht zuletzt, um die Umsetzbarkeit des Konzepts und die erforderlichen Schnittstellen und Bearbeitungsschritte im Sinne des bestehenden Forschungsbedarfs zu verdeutlichen.

Bild 14 zeigt an einem Auszug eines realen Bauwerksbestands die Zuordnung der etagenkonkreten Verletzbarkeitsklassen. In Bild 15a werden die in den einzelnen Bauwerksbereichen (Keller, Etagen, Dachkonstruktion) jeweils dominanten bzw. maßgebenden Naturgefahren konzeptionell für eine fiktive Kombination von Einwirkungsintensitäten der Naturgefahren Erdbeben, Hochwasser und Wind herausgestellt.



B C D

a) Erdbeben / Earthquake



b) Hochwasser / Flood



c) Wind / Wind

Bild 14 Etagenspezifische Verletzbarkeitsklassen Storey-specific vulnerability classes

Bild 15b veranschaulicht, welche Schadensgrade $D_{Fl,i}$ in den einzelnen Geschossbereichen zu erwarten sind, wenn für die Kombination der Einwirkungsintensitäten EQ-HW-W die Expositionsklasse gemäß Bild 13a (Low-Medium-Medium: L-M-M) unterstellt wird. Voraussetzung bildet, dass für eine bestimmte Einwirkungsintensität und Referenz-Verletzbarkeitsklasse ein charakteristischer Schadensgrad erwartet wird und von jeder Naturgefahr nur bestimmte (Hochwasser, Wind) oder alle Bauwerksbereiche (Erdbeben) betroffen sein können.

Es bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten, für das "Konzeptionelle Simulations-Tool" erste Anwendungen und Musterlösungen bereitzustellen. Hierzu würde in künftigen Untersuchungen auch ein Vergleich von prognostizierten und aufgetretenen Schäden in repräsentati-



a) Herausstellung der dominanten Naturgefahr in den Bauwerksebenen Highlighting the dominant natural hazard in the building levels



 b) Lokale Schadensgrade D_{FLi} in den Etagen Local damage grades D_{FLi} in the floors

Bild 15 Berechnungsmöglichkeiten des "Konzeptionellen Simulations-Tools" (Beispiel für die fiktive Einwirkungsintensitätskombination EΩ-HW-W: Low-Medium-Medium (L-M-M)) Calculation options of the "Conceptual Simulation Tool" (for the fictitious intensity combination EΩ-HW-W: Low-Medium-Medium

fictitious intensity combination EQ-HW-W: Low-Medium-Medium (L-M-M)) ven Untersuchungsgebieten unter Berücksichtigung der etagenspezifischen Verletzbarkeiten des "LEGOisierten" Bauwerksbestands im Sinne einer Re-Interpretation gehören.

Dank

Wesentliche Teile der vorgestellten methodischen Ansätze wurden im Rahmen des durch die DFG geförderten Vorhabens "Bewertung der Verletzbarkeit von typisierten Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren" unter dem Geschäftszeichen SCHW 662/4-1 entwickelt bzw. zur weiteren Untersuchung vorgeschlagen.

Nachweis verwendeter Geodaten

ALKIS Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem: Gebäudeumrisse mit Hausnummern für die Gemeinde Mühltal (OT Nieder-Beerbach), Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Geografisches Informations-System GIS Obwalden (2007): Katasterdaten Gemeinden Sarnen/Kerns

Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (2003): Katasterdaten (ALK) Gemeinde Albstadt Onstmettingen

Verwendete Software

Die Software MapInfo Professional, die in diesem Bericht zum Einsatz kam, wurde von Pitney Bowes MapInfo Limited, United Kingdom, zur Verfügung gestellt.

ARCGIS 10.2.1, Copyright 1999-2013 ESRI Inc.

Literatur

- ABRAHAMCZYK, L.; LANGHAMMER, T.; SCHWARZ, J. (2005) Erdbebengebiete der Bundesrepublik Deutschland – eine statistische Auswertung in: Bautechnik 82, H. 8, S. 500– 507.
- [2] BEINERSDORF, S. (2016) Intensitätsbasierte Bewertung der Verletzbarkeit allgemeiner Hochbauten in deutschen Erdbebengebieten in: Schriftenreihe des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 029, Weimar: Bauhaus-Universität, Univ.-Verl.
- [3] SCHWARZ, J.; LANGHAMMER, T.; MAIWALD, H.; SMOLKA, A. (2004) Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions – Damage and Loss Assessment for the City of Cologne in: Proceedings 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver/Kanada, Paper 238.
- [4] SCHWARZ, J.; RASCHKE, M.; MAIWALD, H. (2006) Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98 in: Natural Hazards, Special Issue: German Research Network Natural Disasters 38, no. 1–2, pp. 259–282.

- [5] KAUFMANN, CH.; SCHWARZ, J. (2014) Earthquake hazard and risk assessment tool using Monte-Carlo simulation techniques in: Proceedings 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, AK, USA.
- [6] LI, Y.; VAN DE LINDT, J. W. (2012) Loss-based formulation for multiple hazards with application to residential buildings in: Engineering Structures 38, pp. 123–133.
- [7] Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Hazus[®]-MH MR5, Hazus Technical and User's Manuals [online]. [Zugriff am: 11. April 2018] https://www. fema.gov/media-library/assets/documents/24609.
- [8] MATRIX (2013) *Scenarios of cascade events/ Deliverable D3.3*. MATRIX New Multi Hazard and Multi-Risk Assessment Methods for Europe, Collaborative project.
- [9] ALSHAWA, O.; MOLLAIOLI, F.; LIBERATORE, L.; SORRENTINO, L.; LIBERATORE, D.; DECANINI, L. D. (2017) Characterization of Seismic Demand after the Central Italy 2016 Earthquakes in: Paper 5006, 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile.

- [10] INCREO (2013) D101.1 Inventory of tools for natural hazard risk assessment. IncREO. Increasing Resilience through Earth Observation, Collaborative project.
- [11] MERZ, B.; FRIEDRICH, J.; DISSE, M.; SCHWARZ, J.; GOLDAM-MER, J. G.; WÄCHTER, J. (2006) Possibilities and Limitations of Interdisciplinary, User-oriented Research: Experiences from the German Research Network Natural Disasters in: Natural Hazards, Special Issue: German Research Network Natural Disasters 38, no. 1–2, pp. 3–20.
- [12] GRÜNTHAL, G.; THIEKEN, A. H.; SCHWARZ, J.; RADTKE. K. S.; SMOLKA, A.; MERZ, B. (2006) Comparative Risk Assessments for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes in: Natural Hazards, Special Issue: German Research Network Natural Disasters 38, no. 1–2, pp. 21–44.
- [13] SCHWARZ, J.; LANGHAMMER, T.; KAUFMANN, CH. (2006) Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben Modellstudie Baden-Württemberg in: Bautechnik 83, H. 12, S. 827–841.
- [14] SCHWARZ, J.; RASCHKE, M.; MAIWALD, H. (2001) Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmölln/Ostthüringen (1): Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes in: Thesis – Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar 47, H. 1./2. Ingenieurseismologie und Erdbebeningenieurwesen, S. 180– 199.
- [15] AMSTEIN, S.; LANG, D. H.; SCHWARZ, J. (2005) Schütterwirkungen historischer Erdbeben und aktuelle Anwendungsgebiete für das Erdbebeningenieurwesen in: Bautechnik 82, H. 8, S. 641–656.
- [16] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H. (2008) Damage and loss prediction model based on the vulnerability of building types in: Proceedings 4th International Symposium on Flood Defence (ISDF), 6–8 May 2008, Toronto, Canada.
- [17] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; KAUFMANN, C. (2016) Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Hochwasser-Schadenspotentialen in: Bautechnik 93, H. 4, S. 214–229.
- [18] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2008) Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit. EDAC-Hochwasserschadensmodell in: scientific technical reports 01-11, Weimar: Universitätsverlag, Bauhaus-Universität Weimar.
- [19] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2015) Damage and loss prognosis tools correlating flood action and building's resistance-type parameters in: International Journal of Safety and Security Engineering 5, no. 3, pp. 222–250.
- [20] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H. (2007) Berücksichtigung struktureller Schäden unter Hochwassereinwirkung in: Bautechnik 84, H. 7, S. 450–464.
- [21] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; KAUFMANN, C.; BEINERSDORF, S. (2017) Bewertung der Verletzbarkeit von Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren. D-A-CH-Tagung: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2017, 21.–22. Sept. 2017, Beitrag 020, Weimar, Deutschland.
- [22] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Normalherstellungskosten NHK 2000 [online]. [Zugriff am 15. Feb. 2018]. https://www.bundesanzeiger-verlag.de/fileadmin/BIV-Portal/pdf/NHK_2000.pdf
- [23] SCHWARZ, J.; LANGHAMMER, T.; WENK, T. (2008) AON Earthquake Model for Switzerland in: Earthquake Damage Analysis Center (EDAC) & Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH [Hrsg.] Final Report Phase 2. Weimar, Zürich.
- [24] GRÜNTHAL, G. (ed.); MUSSON, R.; SCHWARZ, J.; STUCCHI, M. (1998) European Macroseismic Scale 1998 in: Cahiers de Centre Européen de Géodynamique et de Seismologie 15. Luxembourg.
- [25] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; BEINERSDORF, S.; KAUFMANN, C. (2018) Evaluation of the vulnerability of existing building

stocks under single and Multi Hazard impact in: 16th European Conference on Earthquake Engineering, Thessaloniki, Greece.

- [26] SCHWARZ J.; MAIWALD, H.; LEIPOLD, M.; LANGHAMMER, T.; KRACHT, M.; MÜLLER B. (2015) Das Erdbeben vom 17.05.2014 in Südhessen – Ingenieuranalyse der Erdbebenschäden in: Bautechnik 92, H. 9, S. 647–659.
- [27] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2018) Vereinheitlichte Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren in: Bautechnik 95, Veröffentlichung geplant in Heft 10.
- [28] Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) Online Schadensdatenerhebung für Naturgefahren [online]. [Zugriff am: 11. April 2018]. www.edac.biz/scha densdatenerhebung/
- [29] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H. (2012) Empirical vulnerability assessment and damage description for natural hazards following the principles of modern macroseismic scales in: 15th World Conference Earthquake Engineering, Paper 5652, Lisboa.
- [30] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2017) Vulnerability assessment of multi-hazard exposed building types – Development of an EMS-98 based empirical-statistical methodology in: 16th World Conference on Earthquake, Santiago Chile.
- [31] TINTI, S.; TONINI, R.; BRESSAN, L.; ARMIGLIATO, A.; GARDI, A.; GUILLANDE, R.; VALENCIA, N.; SCHEER, S. (2011) Handbook of tsunami hazard and damage scenarios. European Commission Joint Research Centre (JRC), Institute for the Protection and Security of the Citizen.
- [32] VALENCIA, N.; GARDI, A.; GAURAZ, A.; LEONE, F.; GUILLAN-DE, R. (2011) New tsunami damage functions developed in the framework of SCHEMA project: application to European-Mediterranean coasts in: Natural Hazards and Earth Systems Sciences, no. 11, pp. 2835–2846.
- [33] Ministry of Land, Infrastructure and transportation (MLIT) Survey of tsunami damage condition [online]. [Zugriff am: 28. Jan. 2016]. http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukkouarkaibu.html
- [34] SIDDIQUE, M. S.; SCHWARZ, J. (2015) Elaboration of Multi Hazard Zoning and Qualitative Risk Maps of Pakistan in: Earthquake Spectra 31, no. 3, pp. 1371–1395.

Autoren

Dr.-Ing. Jochen Schwarz

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) Marienstraße 13 99421 Weimar

schwarz@uni-weimar.de

Dr.-Ing. Holger Maiwald

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) Marienstraße 13 99421 Weimar holger.maiwald@uni-weimar.de

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) Marienstraße 13 99421 Weimar

christian.kaufmann@uni-weimar.de

Dipl.-Ing. Tobias Langhammer Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) Marienstraße 13 99421 Weimar tobias.langahmmer@uni-weimar.de

Dr.-Ing. Silke Beinersdorf

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) Marienstraße 13 99421 Weimar

silke.beinersdorf@uni-weimar.de