

# Vereinheitlichte Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren

International liegen verschiedene Klassifikationsschemen für die Bewertung von Bauwerkschäden infolge der unterschiedlichen Naturgefahren vor. Diese sind aufgrund ihrer Heterogenität nur unzureichend für die Betrachtung von Schäden im Sinne eines Multi-Hazard-Ansatzes geeignet.

Für die Bewertung der Verletzbarkeit von Bauwerken gegenüber verschiedenen Naturgefahren und die Prognose von Schäden ist eine vereinheitlichte Systematik erforderlich, mit der wiederholt beobachtete Schadensbilder in ein Schema von Schadensgraden überführt werden können. Mit diesem Instrumentarium kann der Schaden einheitlich ausgewertet und der Zusammenhang zu den Einwirkungskenngrößen hergestellt werden.

Dabei wird dem Vorgehen der European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) für Erdbebenschäden gefolgt, indem zwischen strukturellen und nicht strukturellen Schäden unterschieden wird, denen in Form von Schadensgraden charakteristische Schadensbilder zuordenbar sind.

Es wird ein allgemeines Klassifikationsschema für Bauwerkschäden vorgestellt, mit dem eine Vergleichbarkeit der Schäden infolge der einzelnen Naturgefahren hergestellt werden kann.

Auf Grundlage real beobachteter Schadensfälle werden die typischen Schadensmuster für die Naturgefahren Hochwasser, Tsunami und Wind herausgearbeitet und in aufeinander abgestimmte Schadensgrade klassifiziert.

Mit den eingeführten Schadensskalen steht erstmals ein Instrumentarium zur Verfügung, um Schadensfälle an einem Gebäudebestand infolge unterschiedlicher Naturgefahren nach ingenieurmäßig vereinheitlichten Kriterien bewerten zu können. Im Ausblick steht die Prognose der Schäden infolge der unterschiedlichen Naturgefahren und ihrer möglichen Abfolgen.

**Keywords** Schadensbilder; Schadensgrade; Schäden, strukturelle; Multi Hazard; Schadensskalen; Erdbeben; Hochwasser; Tsunami; Sturm

## Unified damage description and risk assessment of buildings under extreme natural hazards

Internationally different classification schemes are available for the assessment of structural damage due to the different natural hazards. Due to their heterogeneity, these classification schemes are insufficiently suited for the consideration of damages in the sense of a multi hazard approach.

A unified system is necessary for the evaluation of the building vulnerability and the damage prognosis due the different natural hazards. The unified system transfers repeatedly observed damage patterns into a scheme of damage grades. With this instrument, the structural damage can be uniformly evaluated and the relationship to the input parameters can be established.

Following the concept of the European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) for earthquake damage, it is distinguished between structural and non-structural damage to which characteristic damage patterns can be assigned in the form of damage grades.

A general classification scheme for building damage is presented, which enables a comparison of the damage due to the individual natural hazards. On the basis of real observed damage cases, the typical damage patterns for the natural hazards flood, tsunami and wind are highlighted and converted into harmonized classification schemes for damage grades.

For the first time, a harmonized set of instruments is available for evaluation of damage cases on a building stock as a result of different natural hazards according to criteria standardized in engineering terms. The outlook refers to the damage prognosis due to the different natural hazards and their possible sequences.

**Keywords** damage pattern; damage grades; structural damage; multi hazard; damage scales; earthquake; flood; tsunami; storm

## 1 Vorbemerkungen

Für die einzelnen Naturgefahren liegen verschiedene Klassifikationsschemen für die Bewertung von Bauwerkschäden vor. Diese beschreiben die vorgefundenen Scha-

densbilder qualitativ unterschiedlich differenziert und unterscheiden sich z. T. auch innerhalb einer Skala in der Anzahl der Schadensgrade. So werden z. B. in der Enhanced Fujita Scale (EF-Skala) [1] für Tornadoschäden insgesamt 28 verschiedene Schadenstypen (bezogen auf Bauwerke und Vegetation) erfasst. Für diese werden bis zu zwölf verschiedene Schadensgrade (hier: Degree of Damage – DOD) definiert und die zugehörigen Windschwindigkeiten inklusive ihrer Streubreiten angegeben. Derartige für die Bewertung einer einzelnen Naturgefahr entwickelte Ansätze sind nur unzureichend für die Be-

\*) Corresponding author: holger.maiwald@uni-weimar.de  
Submitted for review: 16 February 2018  
Revised: 16 May 2018  
Accepted for publication: 06 July 2018

trachtung von Schäden im Sinne eines Multi-Hazard-Ansatzes geeignet.

Auf Grundlage zahlreicher dokumentierter Schadensfälle der letzten Jahre und unter Würdigung vorhandener Klassifikationsschemen wird ein einheitliches System zur Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren entwickelt.

Dabei wird ausgehend vom Ansatz der European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) [2] ein allgemeines Grundkonzept abgeleitet und in die für Hochwasser-, Tsunami- und extreme Windeinwirkungen typischen Schadensgrade überführt.

Die Klassifikationsschemata der Schadensgrade und ihre Untersetzung durch charakteristische strukturelle und nicht strukturelle Schäden werden nachfolgend als „Schadensskalen“ eingeführt. Mit der Bezeichnung verbindet sich der Anspruch, einerseits die Beschreibung auf empirischer, d.h. der Auswertung charakteristischer, wiederholt beobachteter Schäden vorgenommen und andererseits die Grade selbst qualitativ so abgegrenzt zu haben, dass ihnen rein konzeptionell in Abhängigkeit von der jeweiligen Bauwerksverletzbarkeit charakteristische („wahrscheinlichste“ – im Sinne von most likely) Einwirkungsintensitäten zugeordnet werden können.

Diese Skalen sind Bestandteil eines Bewertungssystems für die Verletzbarkeit von typisierten Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren [3, 4].

## 2 Datengrundlage für die einzelnen Naturgefahren

Im Rahmen von Feldeinsätzen nach Schadensereignissen infolge verschiedener Naturgefahren, die das Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden der Bauhaus-Universität Weimar (EDAC) in den letzten Jahren durchgeführt hat, wurden zahlreiche Schadensfälle dokumentiert und ausgewertet [5]. Eine Übersicht zu den Schadensaufnahmen und weiteren für die Entwicklung der Schadensskalen im Beitrag berücksichtigten Schadensdokumentationen bzw. -auswertungen ist Tab. 1 zu entnehmen. Die aufgeführten Feldeinsätze nach Erdbebenereignissen beschränken sich dabei auf Beben ab dem Jahr 2003. Die Schadensfälle wurden ausgewertet und die vorhandenen Schadensbilder systematisch aufbereitet.

## 3 Globale Klassifikation von Schadensgraden

### 3.1 Generelles Konzept

Eine Vereinheitlichung der Schadensbeschreibungen erfordert ein Grundkonzept, dem die einzelnen Schadensskalen für die verschiedenen Naturgefahren folgen können. Es steht mit der European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) [2] bzw. den im Erdbebenbereich vorliegenden Erfahrungen zur Verfügung und setzt u.a. voraus, zwi-

**Tab. 1** Übersicht über die berücksichtigten Schadensdokumentationen  
Overview about the considered damage surveys

Naturgefahr	Jahr	Schadensgebiet bzw. -ort	Daten	Auswertung [Quelle(n)]
<b>Erdbeben</b>	2003	Bingöl (Türkei)	FS	[6]
	2004	Waldkirch (Baden-Württemberg)	FS	[7]
	2005	Kaschmir (Pakistan)	FS	[8]
	2010	Maule Region (Chile)	FS	[9]
	2014	Nieder-Beerbach (Hessen)	FS	[5, 10]
<b>Hochwasser</b>	2002	Sachsen (Mulde)	FS	[11–13]
	2006	Sachsen (Elbe)	FS	[5]
	2010	Sachsen (Neiße, Spree)	FS	[5]
	2013	Sachsen (Mulde)	FS	[5, 14]
	2015	Braunsbach (Baden-Württemberg)	FS	[15]
<b>Tsunami</b>	2004	Sumatra (Indischer Ozean)	DA	[16–18]
	2010	Region Maule und Bio Bio (Chile)	FS	[5, 19]
	2011	Region Tōhoku (Japan)	DA	[20, 21]
<b>Wind (Tornado)</b>	2006	Quirla (Thüringen)	DA	[22]
	2010	Walda-Kleinthiemig (Sachsen)	FS	[5]
	2015	Bützow (Mecklenburg-Vorpommern)	FS	[5, 23]

Erläuterungen: FS – EDAC-Feldeinsatz (Field Survey) mit Schadensdokumentation, DA – Detaillierte Schadensanalyse

schen strukturellen und nicht strukturellen Schäden zu unterscheiden und die für die Einwirkungsintensität charakteristischen Schadensbilder in Form von Schadensgraden zusammenzufassen.

In der EMS-98 wird der strukturelle Schaden als ein Kontinuum betrachtet, der aus praktischen Gründen in Schadensgrade  $D_i$  diskretisiert wird [24]. Nachfolgend werden sechs Schadensgrade (Schadensklassen) eingeteilt: von  $D_0$  (kein Schaden) bis  $D_5$  (Kollaps, völlige Zerstörung). Der Schadensgrad  $D_0$  – in der EMS-98 zwar nicht explizit definiert – ist für statistische Auswertungen am Maßstab des Gesamtbestands unverzichtbar. Zudem ist bei Erdbebeneinwirkung keine klare Abgrenzung des betroffenen Gebiets möglich. Alle Bauwerke einer Stadt werden von den Bodenbewegungen mehr oder weniger erschüttert. Die Bauwerke werden je nach Stärke der Einwirkung (Erdbebenintensität) und ihrer Verletzbarkeit unterschiedlich stark geschädigt. Es ist naheliegend, dass eine Vielzahl von Bauwerken ein Erdbeben unbeschädigt übersteht. Diesen ist somit ein Schadensgrad  $D_0$  zuzuweisen, nicht zuletzt auch deshalb, um im Rahmen der statistischen Auswertung Fehlschlüsse zu vermeiden.

Diesem Ansatz folgend ist ein Schadensgrad  $D_0$  zu berücksichtigen, wenn das Bauwerk der Einwirkung zwar

ausgesetzt ist, aber unbeschädigt bleiben kann. Bei Naturgefahren wie Hochwasser und Tsunami lässt sich der betroffene Bauwerksbestand relativ genau abgrenzen. Ein Bauwerk unterliegt also entweder der Einwirkung in unterschiedlicher Intensität (und weist hier zumindest Durchfeuchtungsschäden im Sinne nicht struktureller Schäden auf [11]) oder ist nicht von der Einwirkung betroffen. Der Schadensgrad D0 muss hier nicht berücksichtigt werden, da alle betroffenen Bauwerke mind. dem Schadensgrad D1 zuzuordnen sind.

Bei „flash flood“-Ereignissen und Tsunami-Einwirkungen können Bauwerke komplett weggespült, umgekippt bzw. von ihrem Fundament verschoben werden. Ebenso können sich bei extremen Sturmeinwirkungen insbesondere schlecht verankerte Leichtkonstruktionen von ihrem Fundament lösen und sogar vollständig abheben. Die Dislokation stellt ein Extremum des Bauwerksversagens dar, wobei damit nicht zwingend das Überstehen einzelner Tragelemente ausgeschlossen wird. In Anlehnung an die Untersuchungen in [20] wird für diese Einwirkungen ein Schadensgrad D6 eingeführt, welcher aber bei primärer Erdbebeneinwirkung nicht (und nur bei induzierten, gesondert zu betrachtenden Sekundäreignissen wie z. B. Hangrutschungen) auftreten kann und daher unberücksichtigt bleibt.

Die Abstufung der strukturellen und nicht strukturellen Schäden des aufgestellten sechs- bzw. siebenstufigen allgemeinen Konzepts für Schadensskalen kann Tab. 2 entnommen werden. Gekennzeichnet ist zudem, welche Schadensgrade bei den einzelnen Naturgefahren zu berücksichtigen sind. Im Hinblick auf die den Baunormen zugrunde liegenden Sicherheitsphilosophien werden dabei auch die festgelegten Schadensgrade im Hinblick auf die Sicherheit von Leib und Leben eingeordnet.

Die Korrelation zwischen strukturellen und nicht strukturellen Schäden gemäß Tab. 2 ist bei den verschiedenen Naturgefahren nicht immer zwingend. So kann der nicht

strukturelle gegenüber dem strukturellen Schaden bei den einzelnen Naturgefahren deutlich höher ausfallen.

Da sich dies insbesondere auf die finanziellen Verluste auswirkt, scheint eine Zuweisung des Schadensgrads hier auf Basis der nicht strukturellen Schadensindikatoren aber sinnvoll.

Die praktischen Konsequenzen der Zuweisung eines Schadensgrads  $\leq D3$  auf Basis der nicht strukturellen Schadensindikatoren (bei fehlender struktureller Schädigung) sind als gering einzustufen. Ab Schadensgrad D4 werden gemäß den Beschreibungen der Indikatoren in den Tab. 4, 8 strukturelle Schäden (oder äquivalente Wiederherstellungsmaßnahmen) relevant. Die Festlegung des Schadensgrads ist somit auch bei größeren Abweichungen zwischen strukturellem und nicht strukturellem Schaden möglich.

Eine andere Lösung kann in der separaten Bewertung der strukturellen und nicht strukturellen Schäden liegen, was aber die praktische Anwendung erschwert.

Es ist anzumerken, dass die Beschreibungen der Schadensgrade zunächst für die allgemeine Bebauung vornehmlich in Mauerwerksbauweise gelten. Sie sind aber auch auf andere Bauweisen anwendbar, wobei spezifische Schadensbilder analog zur EMS-98 [2] in weiterführenden Arbeiten im Detail noch herauszuarbeiten wären.

### 3.2 Schadensskala für Erdbeben

Derzeit gibt es Bestrebungen zur Entwicklung einer International Macroseismic Scale (IMS) [25, 26]. Eine Zielstellung besteht in der Klärung des Zusammenhangs zwischen strukturellen und nicht strukturellen Schäden bei Ingenieurkonstruktionen in erdbebengerechter Auslegung (in Abhängigkeit von der Einwirkungsintensität). Bis zu deren Vorlage sind die bewährten Schadensgrad-

**Tab. 2** Allgemeine Definition von Schadensgraden  
General definition of damage grades

Schadensgrad	Erdbeben	Hochwasser/ Tsunami	Wind	Schaden		Sicherheit für Leib und Leben
				strukturell	nicht strukturell	
D0 <sup>1)</sup>	×	–	×	kein	kein	gegeben
D1	×	×	×	kein	leicht	
D2	×	×	×	leicht	moderat	
D3	×	×	×	moderat	schwer	
D4	×	×	×	schwer	sehr schwer	kritisch
D5	×	×	×	sehr schwer	sehr schwer	nicht gegeben
D6 <sup>2)</sup>	–	×	×	total	total	

Erläuterung: × Schadensgrad kann auftreten

– Schadensgrad kann nicht auftreten

<sup>1)</sup> bei nicht abgrenzbaren Einwirkungen, d. h., von der Einwirkung betroffen, aber kein Schaden

<sup>2)</sup> Bauwerk vollständig vom Standort entfernt, umgestürzt oder vom Fundament verschoben

Definitionen der EMS-98 [2] für den entwickelten Multi-Hazard-Ansatz anzuwenden. Die Schadensdokumentationen für Erdbeben (s. Tab. 1) bestätigen dabei das Konzept der Schadensgrade in der EMS-98.

### 3.3 Schadensskala für Hochwasser

Auf Grundlage der nach dem Hochwasser im Aug. 2002 erhobenen Gebäudebestände und dokumentierten Bauwerksschäden konnte in [11, 12] eine zunächst fünfstufige Differenzierung von Schadensgraden umgesetzt werden; sie bildet eine der Grundlagen im bestehenden EDAC-Hochwasserschadensmodell [13]. Einige in Deutschland eher selten beobachtete (aber durchaus mögliche) Schadensbilder blieben noch unberücksichtigt. Dies betrifft aktuell insbesondere Erfahrungswerte bei schweren Sturzfluten (flash floods) [15], bei denen Bauwerke (wie bei schweren Tsunamis) umkippen, von ihrem Fundament verschoben oder komplett weggespült werden können.

Unter Berücksichtigung der Erfahrungswerte des Tsunami 2011 in Japan [20] und der von den Autoren aufgenommenen Tsunamischäden nach dem Maule-Erdbeben

in Chile 2010 [19] wird ein Schadensgrad D6 eingeführt, um diese extremen Schadensfälle vom einfachen Einsturz (D5) abzugrenzen.

Dokumentierte Schadensfälle der Sturzflut von Braunsbach im Jahr 2015 [15] machen deutlich, dass für die Beschreibung der Schadensgrade auch Ausspüleffekte zu berücksichtigen sind.

In Tab. 3 werden beobachtete Schadensbilder den Schadensgraden zugeordnet. Die für den Schadensgrad jeweils charakteristischen Beobachtungen sind farblich unterschiedlich gekennzeichnet. Aus dieser Zusammenstellung lassen sich die Beschreibungen für die einzelnen Schadensgrade  $D_i$  nach dem Schema in Tab. 4 ableiten. Beispiele dazu können Tab. 5 entnommen werden.

Da Tab. 3 auch die Schadensbilder beinhaltet, die vornehmlich bei starken dynamischen Hochwasserereignissen auftreten, die eine mit einem Tsunami vergleichbare dynamische Einwirkungscharakteristik haben können, sind diese Beschreibungen prinzipiell auch für diese Naturgefahr anwendbar. Wie in Abschn. 3.4 herausgestellt wird, kann die entwickelte Schadensskala in Tab. 4 auch für die Tsunamieinwirkung verwendet werden.

**Tab. 3** Beobachtete Schadensbilder infolge Hochwasser- und Tsunamieinwirkung und Klassifikationskriterien  
Observed damage patterns due to flood and tsunami impact and classification criteria

Kriterium	Beobachtung/Maßnahme	Schadensgrad					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Bauphysikalischer Schaden</b>	Durchfeuchtung tragender und nicht tragender Wände und der Geschosdecken	○	×	×	×	×	×
<b>Chemischer Schaden</b>	Verschmutzungen (Schlamm, Ablagerungen)	×	×	×	×	×	×
	Kontaminationen (Öl, Chemikalien)		×	×	×	×	×
<b>Mechanischer Schaden</b>	Eingedrückte Türen und Fenster		×	×	×	×	×
	Leichte Risse in tragenden Wänden		×	×	×	×	×
	Unterspülte Fundamente		×	×	×	×	×
	Größere Risse und/oder Verformungen in tragenden Wänden und Decken			○	×	×	×
	Setzungen			×	×	×	×
	Einsturz von nicht tragenden Wänden			×	×	×	×
	Einsturz von Bauteilen (tragende Wände, Decken)				○	×	×
	Kollaps oder Einsturz von größeren Gebäudeteilen					○	×
	Bauwerk vollständig weggeschwemmt, umgestürzt oder vom Fundament verschoben						○
<b>Maßnahmen</b>	Austausch von Ausbauteilen		○	×	×	(×)	-
	Austausch von nicht tragenden Bauteilen			×	×	(×)	-
	Austausch von tragenden Bauteilen				×	(×)	-
	Abriss erforderlich					×	×

- × beobachtete Schädigung kann bei entsprechendem Schadensgrad auftreten
- charakteristisches Merkmal für den entsprechenden Schadensgrad
- (×) Maßnahme nur bei Rekonstruktion des Originalgebäudes möglich
- Maßnahme nicht mehr am Originalgebäude durchführbar

**Tab. 4** Definition von Schadensgraden infolge Hochwasser- und Tsunamieinwirkung  
Definition of damage grades due to flood and tsunami impact

Schadensgrad	Schaden		Beschreibung
	strukturell	nicht strukturell	
<b>D1</b>	kein	leicht	– reiner Durchfeuchtungsschaden – Verschmutzungen
<b>D2</b>	leicht	moderat	– leichte Risse in tragenden Wänden – eingedrückte Türen und Fenster – Unterspülung von Fundamenten – Kontaminationen – <i>Austausch von Ausbauteilen erforderlich</i>
<b>D3</b>	moderat	schwer	– größere Risse/Verformungen in tragenden Wänden und Decken – Setzungen – Einsturz nicht tragender Wände – <i>Austausch von nicht tragenden Bauteilen erforderlich</i>
<b>D4</b>	schwer	sehr schwer	– Einsturz von tragenden Wänden, Decken – <i>Austausch von tragenden Bauteilen erforderlich</i>
<b>D5</b>	sehr schwer	sehr schwer	– Kollaps bzw. Einsturz von größeren Gebäudeteilen – <i>Abriss erforderlich</i>
<b>D6</b>	total	total	– Dislokation: Bauwerk vollständig weggeschwemmt, umgestürzt oder vom Fundament verschoben

Eine Zielstellung des EDAC-Hochwasserschadensmodells [13] ist es, letztlich plausible Verlustprognosen abzugeben, sodass auch die zur Schadensbeseitigung erforderlichen Maßnahmen bei der Definition der Schadensgrade in Tab. 4 aufgenommen werden [12]. Diese notwendigen Maßnahmen zur Schadensbeseitigung sind i. d. R. erst bei Nachbetrachtungen (z. B. anhand eines Schadensgutachtens bzw. bei einer nachträglichen, zweiten Vor-Ort-Begutachtung) feststellbar. Die Folge kann eine veränderte Zuordnung der Schadensgrade sein [15].

### 3.4 Schadensskala für Tsunami

Für die Klassifikation von Bauwerksschäden infolge eines Tsunamis liegen verschiedene Klassifikationsschemen vor, die sich am Grundprinzip der durch die EMS eingeführten Schadensgrade orientieren. In [16] wird direkt auf die Schadensgrade der EMS-98 [2] Bezug genommen. Neben den Schadensgraden („damage level“) G1–G5 werden aber auch komplett weggespülte („washed away“) Bauwerke angeführt.

Die Klassifikation des SCHEMA-Projekts [17, 18] arbeitet, ohne direkt auf die EMS-98 [2] zu verweisen, mit einer ähnlichen Klassifikation von D0–D5. Der Diskussion in [12] für Hochwasserschäden folgend, ist der in [17] definierte Schadensgrad D0 (der in den Auswertungen der Schadensdaten in [18] aber nicht vorkommt) allerdings nicht notwendig, da dieser nur für vom Tsunami nicht betroffene Bauwerke gelten würde.

Auch die in der Studie in [20] verwendeten Schadensdaten vom Tsunami 2011 [21] berücksichtigen einen Scha-

densgrad D0, der aber vom Tsunami betroffene (und damit geschädigte) Bauwerke enthält. Diese Schadensfälle wurden in [27] mit dem Schadensgrad D1 zusammengefasst. Der in [20, 21] für komplett weggespülte, umgekippte bzw. von ihrem Fundament verschobene Gebäude definierte Schadensgrad D6 wurde übernommen, um diese Schadensfälle vom Schadensgrad D5 (Kollaps) abzugrenzen.

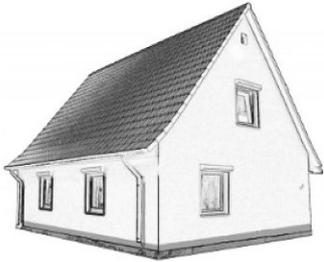
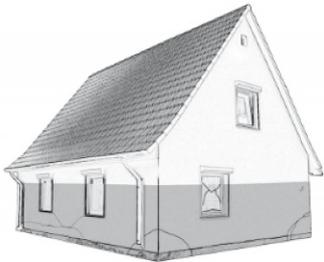
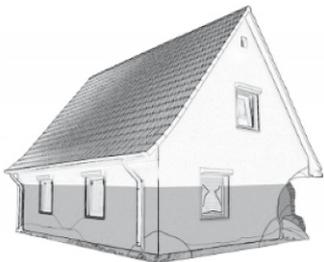
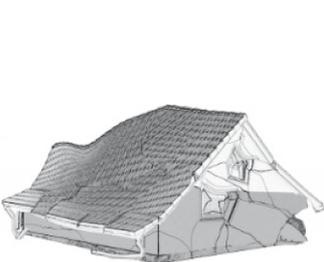
Die Auswertung der genannten Untersuchungen in [17, 18, 20, 21, 27] und die eigenen Erfahrungen vom Tsunami nach dem Maule-Erdbeben in Chile 2010 [19] zeigen, dass die beobachteten Schadensbilder für die Tsunamieinwirkung analog zum entwickelten Schema für Hochwasser einwirkung klassifiziert werden können (Tab. 3, 4). Ebenso können prinzipiell notwendige Maßnahmen zur Schadensbeseitigung (analog zu den Hochwasserschäden) zur Klassifikation der Schadensgrade herangezogen werden.

Den Schadensgraden zugeordnete Beispiele realer Schadensfälle, die nach dem Tsunami infolge des Maule-Erdbebens in Chile dokumentiert wurden [19], sind Tab. 6 zu entnehmen.

### 3.5 Schadensskala für Wind (Tornado, Sturm)

Ein Klassifikationsschema für Sturmschäden im Sinne von Schadensgraden lässt sich in der sogenannten f-Skala-Matrix [28] als Erweiterung der Fujita-Skala [29] und in der Enhanced Fujita Scale [1] für Tornadoschäden finden. Diese Skalen bieten mit ihren phänomenologischen Beschreibungen wertvolle Hilfsmittel bei der Einordnung der Stärke (Intensität) eines Tornados, sind aber nicht di-

**Tab. 5** Zuordnung der Schadensgrade  $D_i$  zu Schadensfällen; Beispiele von den Hochwassern 2002, 2010 und 2013 in Sachsen  
Assignment of damage grades  $D_i$  to damage cases, examples of the 2002, 2010 and 2013 floods in Saxony

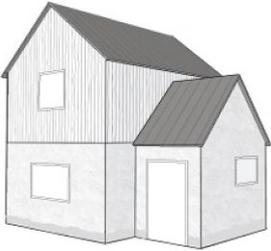
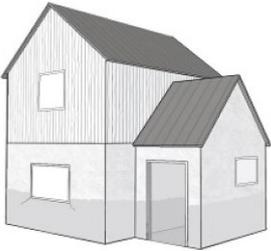
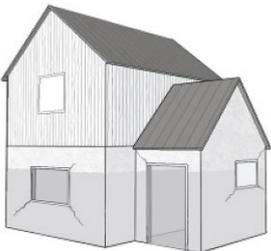
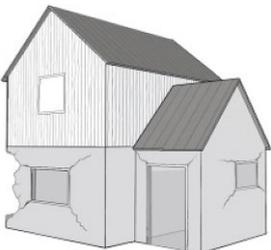
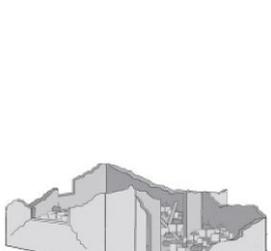
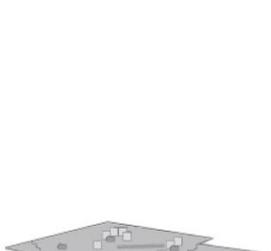
Schadens- grad	Schadensbilder (Prinzipiskizze)	Beispiele
<b>D1</b>		 
<b>D2</b>		 
<b>D3</b>		 
<b>D4</b>		 
<b>D5</b>		 
<b>D6</b>		Beim Hochwasser 2002 an der Weißeritz und Müglitz aufgetreten.

Fotomaterial: Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum), Bauhaus-Universität Weimar

rekt auf die europäische Bebauung anwendbar. Die modifizierte TORRO-Skala [30, 31] bezieht sich zwar auf Schadensbilder an der mitteleuropäischen Bebauung, bei der Einordnung der Schadensfälle wird aber die Tornadoin-

tensität nur mit den max. beobachteten Schadensbildern verbunden. So wird z. B. in [32] von einem „Weak tornado damage (T3/F1 – 151–183 km/h)“ oder von einem „Strong tornado damage (T5/F2 – 220–254 km/h)“ ge-

**Tab. 6** Zuordnung der Schadensgrade  $D_i$  zu Schadensfällen; Beispiele vom Tsunami nach dem Maule-Erdbeben in Chile [19]  
Assignment of damage grades  $D_i$  to damage cases, examples of the tsunami after the Maule earthquake in Chile [19]

Schadens-grad	Schadensbilder (Prinzipiskizze)	Beispiele	
D1			
D2			
D3			
D4			
D5			
D6			

Fotomaterial: Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum), Bauhaus-Universität Weimar

sprochen und entsprechende Schadensbilder gezeigt. Analog zur EMS-98 [2] wäre aber zu berücksichtigen, dass bei Tornados bzw. extremen Windereignissen einer bestimmten Intensität verschiedene Schadensgrade mit noch zu bestimmenden Häufigkeiten (Wahrscheinlichkeiten) in Abhängigkeit von der konkreten Bauwerksverletzbarkeit auftreten können.

Die unterschiedlichen Sturmartentypen (Orkane, tropische Zyklone, Tornados u.a.) verursachen z.T. spezifische Schadensmuster an Bauwerken, die auf ihre jeweiligen Lastbilder und die unterschiedlich erreichbaren Windgeschwindigkeiten zurückzuführen sind. Dennoch lassen sich Schadensbeschreibungen ableiten, die für die gesamte Bandbreite der verschiedenen Sturmartentypen gültig sind, auch wenn die höchsten Schadensgrade nicht bei allen Sturmartentypen auftreten.

Sturmereignisse betreffen den Bauwerksbestand in unterschiedlichem Umfang. Sie hinterlassen aber nicht an allen betroffenen Bauwerken Schäden. Daher ist für das entwickelte Klassifikationssystem auch die Angabe eines Schadensgrads D0 für diese Bauwerke notwendig.

Bei extremen Sturmeinwirkungen wie Tornados können sich schlecht verankerte Leicht- bzw. Holzkonstruktionen von ihrem Fundament lösen und durch die das Eigengewicht überschreitenden Auftriebskräfte sogar vollständig abheben („flying houses“) [29]. Derartige Schadensfälle werden in dem vorgeschlagenen System dem Schadensgrad D6 zugeordnet.

Bei den verschiedenen Sturmartentypen ist i. d. R. primär der Dachbereich und erst bei extremen Einwirkungen die Wandkonstruktion stärker geschädigt. Daher werden die beobachteten Schadensbilder in Tab. 7 nach den betroffenen Bauwerksbereichen gegliedert und in die Definitionen der Schadensgrade gemäß Tab. 8 überführt.

Vom Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden dokumentierte Beispiele für die Schadensgrade infolge der Tornadoereignisse in Walda-Kleinthiemig (Großenhain) in Sachsen 2010 und in Bützow in Mecklenburg-Vorpommern 2015 [23] können Tab. 9 entnommen werden. Bei diesen Schadensereignissen wurde der Schadensgrad D6 allerdings nicht vorgefunden.

**Tab. 7** Beobachtete Schadensbilder infolge Windeinwirkung und Klassifikationskriterien  
Observed damage patterns due to wind impact and classification criteria

Bereich	Beobachtung	Schadensgrad					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
<b>Dachhaut</b>	Ablösung einzelner Ziegel Bitumenbahnen beschädigt, zum Teil abgelöst	○	×	×	×	×	×
	Ziegel großflächig abgedeckt, großflächiges Ablösen von Bitumenbahnen		○	×	×	×	×
<b>Dachkonstruktion</b>	Schäden an der Lattung		×	×	×	×	×
	Ablösen bzw. Bruch von Sparren/Pfetten Schäden an Verbindungen			○	×	×	×
	Dachkonstruktion (teilweise) zusammengebrochen				○	×	×
	Dachkonstruktion vollständig abgelöst				×	×	×
<b>Schornsteine</b>	Risse/Ablösen einzelner Ziegel am Schornsteinkopf		×	×	×	×	×
	Umsturz von auskragenden Schornsteinen			×	×	×	×
<b>Fassade</b>	Vereinzelte Schäden und Verschmutzungen	×	×	×	×	×	×
	Moderate bis umfangreiche Loch- und Rissbildung und Verschmutzung der Vorhangfassade		×	×	×	×	×
<b>Türen und Fenster</b>	Vereinzelter Glasbruch	×	×	×	×	×	×
	Umfangreicher Glasbruch		×	×	×	×	×
	Eingedrückte Türen		×	×	×	×	×
<b>Wandkonstruktion</b>	Versagen schlecht ausgesteifter nicht tragender Außenwände			×	×	×	×
	Risse/Verformungen an tragenden Wänden			×	×	×	×
	Einsturz tragender Wände				×	×	×
<b>Bauwerk</b>	Kollaps bzw. Einsturz von größeren Gebäudeteilen					○	×
	Abheben/Ablösen des gesamten Bauwerks vom Fundament						○

× beobachtete Schädigung kann bei entsprechendem Schadensgrad auftreten  
○ charakteristisches Merkmal für den entsprechenden Schadensgrad

**Tab. 8** Definition von Schadensgraden infolge Windeinwirkung  
Definition of damage grades due to wind impact

Schadensgrad	Schaden		Beschreibung
	strukturell	nicht strukturell	
<b>D0</b>	kein	kein	
<b>D1</b>	kein	leicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vereinzelt Schäden an der Dachhaut: einige Ziegel abgedeckt; Bitumenbahn beschädigt/zum Teil abgelöst</li> <li>– Vereinzelt Schäden und leichte Verschmutzungen an der Fassade</li> <li>– Vereinzelter Glasbruch</li> </ul>
<b>D2</b>	leicht	moderat	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Umfangreiche Schäden an der Dachhaut: Ziegel großflächig abgedeckt, Bitumenbahn großflächig abgelöst</li> <li>– Leichte Schäden an der Dachkonstruktion: Schäden an der Lattung</li> <li>– Moderate bis umfangreiche Schäden und Verschmutzungen an der Fassade</li> <li>– Umfangreicher Glasbruch</li> <li>– Eingedrückte Türen</li> <li>– Rissbildung bzw. Ablösen einzelner Ziegel an Schornsteinköpfen</li> </ul>
<b>D3</b>	moderat	schwer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Moderate Schäden an der Dachkonstruktion: Umfangreiche Schäden an der Lattung, Sparren/Pfetten gebrochen bzw. abgelöst, Schäden an Verbindungen</li> <li>– Schäden an tragenden Wänden: Risse, Verformungen</li> <li>– Versagen schlecht ausgesteifter nicht tragender Außenwände</li> <li>– Umstürzen von Schornsteinen</li> </ul>
<b>D4</b>	schwer	sehr schwer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schwere Schäden an der Dachkonstruktion: Zusammenbruch (von Teilen) des Dachstuhls</li> <li>– Dachkonstruktion vollständig abgelöst</li> <li>– Einsturz tragender Wände</li> </ul>
<b>D5</b>	sehr schwer	sehr schwer	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kollaps bzw. Einsturz von größeren Gebäudeteilen</li> </ul>
<b>D6</b>	total	total	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dislokation: Abheben/Ablösen des Bauwerks vom Fundament</li> </ul>

## 4 Schadensgrade für analytische Untersuchungen

### 4.1 Lokale Schadensgrade

Die in Abschn. 3 vorgestellten Schadensskalen beschreiben einen auf das gesamte Bauwerk bezogenen globalen Schadensgrad, der grundsätzlich eine Vielzahl lokaler Schäden agglomeriert, diese (im besten Fall mit dem singulären max. Schaden) auch (pessimistisch) überbewertet.

Gemäß [33, 34] werden für die Definition eines lokalen Schadensgrads die Materialdehnungen in konkrete Schadensbilder überführt. Dazu wird der Zusammenhang von lokalem Schadensgrad und Verformungszustand für Stahlbeton für die strukturellen (primären) Elemente dargelegt.

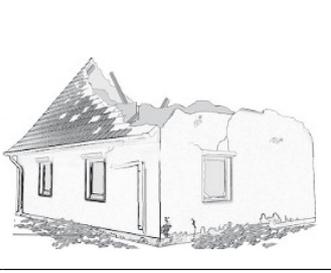
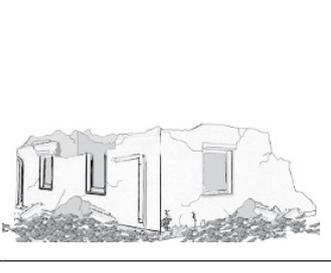
Durch entsprechende analytische Untersuchungen kann auf die lokale Schädigung in den einzelnen Bauwerkszonen geschlossen werden. Dem Konzept in [33, 34] folgend, wird die Schadensbeschreibung elementbezogen (definiert auf Faserebene) vorgenommen und aus dem Verformungszustand des Querschnitts abgeleitet. Diese

Schäden werden als lokale Schadensgrade definiert und nach der Konsequenz für die Tragstruktur in primäre (strukturelle) und sekundäre (nicht strukturelle) unterschieden. Die lokalen Schadensgrade in den einzelnen Bauelementen können dabei in Schadensgrade für verschiedene Bauwerkszonen bzw. das gesamte Bauwerk überführt werden. Übertragen auf das Konzept der Substrukturierung [3] ergeben sich damit folgende Schadensgradebenen:

- Ebene 1: lokale Schadensgrade in den Bauelementen  $D_{BLi}$ ;
- Ebene 2: lokale Schadensgrade in den Etagen  $D_{FLi}$  (Bild 1);
- Ebene 3: globaler Schadensgrad des Bauwerks  $D_i$  (Tab. 2–9).

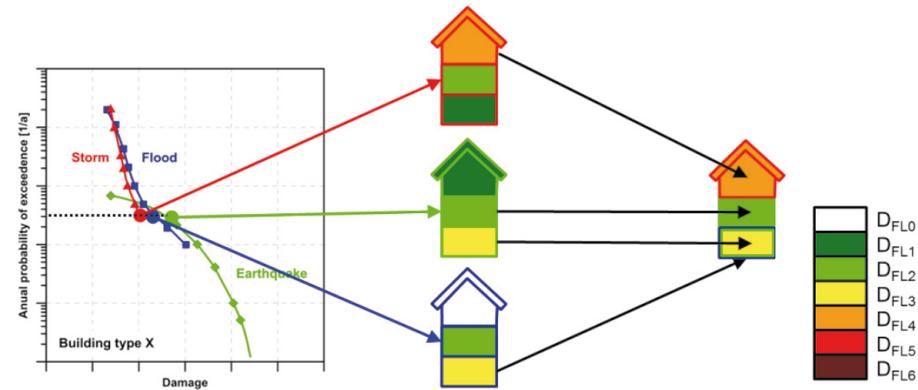
Mit dem Konzept der „LEGOisierung“ der Bestandsgebäude [3] wird ein neuartiger Ansatz gewählt, um über die Substrukturierung der Gebäude in Geschosse (inkl. Dach, Keller und Decken) eine Weiterentwicklung der Typisierung in Richtung konkreter Schadensmerkmale und der lokalen Verletzbarkeit zu ermöglichen. Zielstellung sind künftig detaillierte Aussagen zur Verletzbarkeit und zur

**Tab. 9** Zuordnung der Schadensgrade  $D_i$  zu Schadensfällen; Beispiele von den Tornados in Walda-Kleinthiemig 2010 und Bützow 2015 [23]  
Assignment of damage grades  $D_i$  to damage cases, examples of the tornadoes in Walda-Kleinthiemig 2010 and Bützow 2015 [23]

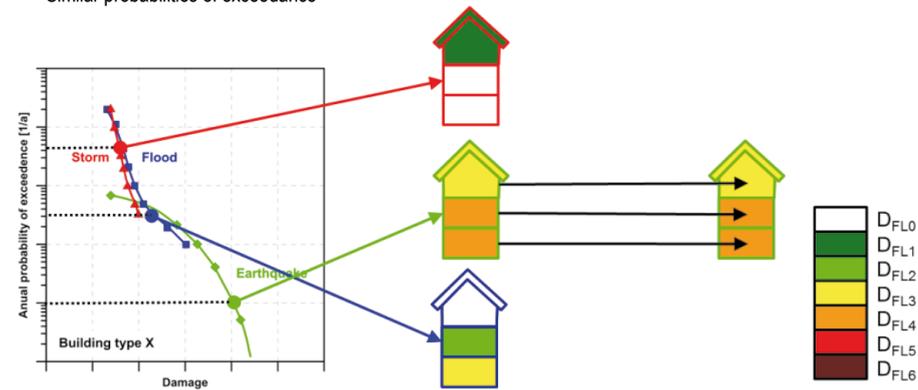
Schadens- grad	Schadensbilder (Prinzipskizze)	Beispiele
<b>D1</b>		
<b>D2</b>		
<b>D3</b>		
<b>D4</b>		
<b>D5</b>		
<b>D6</b>		Bei den ausgewerteten Ereignissen nicht aufgetreten.

Schadenserwartung der durch die einzelnen Naturgefahren lokal unterschiedlich beanspruchten Bauwerkszonen (s. auch [4]).

Die prognostizierten strukturellen Schäden in den einzelnen Etagen und Elementen ermöglichen letztlich eine Bewertung der Dominanz für die einzelnen Naturgefahren.



a) Gleiche Überschreitenswahrscheinlichkeiten  
Similar probabilities of exceedance



b) Unterschiedliche Überschreitenswahrscheinlichkeiten  
Different probabilities of exceedance

**Bild 1** Lokale Schädigung in Abhängigkeit von der Dominanz der einzelnen Naturgefahren  
Local damage depending on the dominance of the individual natural hazards

ren unter Berücksichtigung unterschiedlicher Überschreitenswahrscheinlichkeiten bzw. Wiederholungsperioden (Bild 1).

## 4.2 Globale Schadensgrade

Die Schädigung eines gesamten Bauwerks ist über globale Schadensgrade zu beschreiben, die sich aus einer Vielzahl lokaler Schäden ergeben. Hierfür stehen verschiedene (vornehmlich quantitative) Ansätze zur Verfügung [33].

Die Überführung des lokalen Schadensgrads in einen auf das gesamte Bauwerk bezogenen globalen Schadensgrad erfolgt anhand des einfachsten Ansatzes, d.h. des ersten Auftretens eines lokalen Schadensgrads in einem Makroelement bzw. -bereich (wie z.B. der Geschossebene). Mit dieser Vorgehensweise wäre ein konservativer Ansatz verbunden; die Schadensprognose ist pessimistisch und lässt die Schadensprogression unberücksichtigt. Weitere Ansätze, die eine gewisse – nicht explizit festgelegte – Anzahl von lokal geschädigten Elementen zur Beschreibung des globalen Schadensgrads verwenden, werden in [35] vorgestellt.

Perspektivisch sind dabei auch ingenieurmäßig sinnvolle konditionale Abhängigkeiten zu berücksichtigen, um zu gewährleisten, dass z.B. das (partielle) Versagen einer Etage (z.B. durch Soft-Story-Effekt bei Erdbeben) die entsprechenden Konsequenzen für das Schadensbild am Gesamtbauwerk und damit den globalen Schadensgrad  $D_i$  hat, selbst wenn andere Etagen nach numerischer Simulation unbeschädigt bleiben.

Eine vergleichbare Vorgehensweise wurde z.B. in [36] bei der Entwicklung eines Hurrikan-Schadensmodells für Florida erfolgreich angewendet.

Die Entwicklung der Methodik zur Überführung der lokalen Schadensgrade in die jeweils übergeordnete Ebene und die Festlegung der konditionalen Abhängigkeiten bleiben dabei den weiteren Untersuchungen vorbehalten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen für die Entwicklung eines Bewertungssystems für die Verletzbarkeit von typisierten Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren [3, 4] wurden vereinheitlichte Schadensska-

len für die allgemeine Bebauung für die Naturgefahren Hochwasser, Tsunami und extreme Windeinwirkungen vorgelegt. Die Skalen folgen dabei dem Grundkonzept der Schadensgrade in der EMS-98 [2] für die Erdbebeeinwirkung. Durch die Abstimmung der Schadensgrade zwischen den verschiedenen Naturgefahren wird eine Betrachtung von Schäden im Sinne eines einheitlichen Multi-Hazard-Ansatzes ermöglicht. Die bisher allgemein gehaltenen Schadensskalen sind in künftigen Untersuchungen auf die unterschiedlichen Hauptbauweisen zu erweitern, wie dies derzeit schon in der EMS-98 beinhaltet ist.

Die entwickelten Schadensskalen sind Grundlage für die Aufstellung von erfahrungsbasierten bzw. empirisch-analytisch begründeten Verletzbarkeitstabellen der Bauweisen für die einzelnen Naturgefahren [4, 27, 37]. Die Bewertung der Gebäudeverletzbarkeit erfolgt derzeit für das Bauwerk global, soll künftig auf die durch die Naturgefahren lokal unterschiedlich beanspruchten Bauwerkszonen präzisiert werden. Ingenieurmäßige und erfahrungsbasierte Zuordnungen der wahrscheinlichsten Verletzbarkeitsklassen und ihre Streubereiche sind dabei durch das in [27] entwickelte Konzept zur Transformation von analytisch begründeten „fragility functions“ weiter zu differenzieren und auf die substrukturierten Gebäudebereiche auszurichten.

Für die Schadensprognose soll ein hybrider Modellansatz entwickelt werden, der verschiedene Informationsquellen (empirisch, analytisch, instrumentell) zusammenführt. Das Bewertungssystem ist so anzupassen, dass Veränderungen der Verletzbarkeit infolge zeitlich unterschiedlich

geschalteter Ereignisse bzw. Ereignissequenzen gleichartiger und unterschiedlicher Naturgefahren betrachtet werden können. Dazu sind den zu prognostizierenden Schadensgraden in weiteren Untersuchungen sogenannte „damage grade related vulnerability adjuster“ zuzuweisen. Des Weiteren sind Schadensbilder für mögliche bzw. besonders wahrscheinliche Ereignissequenzen mit unterschiedlicher zeitlicher Abfolge zu entwickeln.

Die in [38] entwickelte Methodik zur Simulation von Hochwasserschäden ist methodisch auf die anderen Naturgefahren und ihre Abfolgen anzuwenden. Ziel ist hier die Einbeziehung der Streubreiten in den Einwirkungen und Gebäudemodellen sowie die Untersuchung ihrer Konsequenzen für die Schadensprognose.

Die entwickelten Tools und Methoden sind letztlich in einem „Konzeptionellen Simulationstool“ zu integrieren [4], das die verschiedenen Naturgefahren mit einer weitgehend vereinheitlichten Schadensbeschreibung verbindet und somit ermöglicht, mit qualifizierten Planungsentscheidungen die Bestandsbebauung in Richtung resilienterer urbaner Siedlungsräume zu entwickeln [39].

## 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 und zur Anwendung gebracht.

## Literatur

- [1] Wind Science and Engineering Centre, Texas Tech University (2006) *Enhanced Fujita Scale (EF-Scale)* [online]. Submitted to The National Weather Service and Other Interested Users, Revision 2. [Zugriff am: 15. Feb. 2017]. <http://www.depts.ttu.edu/nwi/Pubs/FSscale/EFscale.pdf>
- [2] GRÜNTAL, 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.
- [3] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; KAUFMANN, C.; BEINERSDORF, S. (2017) *Bewertung der Verletzbarkeit von Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren* in: 15. D-A-CH Tagung. Weimar, 21.–22. Sept. 2017.
- [4] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; KAUFMANN, C.; LANGHAMMER, T.; BEINERSDORF, S. (2018) *Konzeptionelle Grundlagen und Tools zur Bewertung der Multi-Hazard-Verletzbarkeit von Bestandsbauten* in: Bautechnik 95, H. 9, S. 639–652.
- [5] Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden *Feldeinsätze und Schadensdokumentationen* [online]. [Zugriff am: 15. Feb. 2018]. <https://www.edac.biz/forschung/>
- [6] SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; LANG, D. H.; MAIWALD, H. (2004) *Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden: Das Bingöl (Türkei) Erdbeben vom 1. Mai 2003* in: Bautechnik 81, H. 6, S. 445–460.
- [7] SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; AMSTEIN, S.; KAUFMANN, CH.; LANGHAMMER, T. (2006) *Das Waldkirch-Erdbeben (Baden-Württemberg) vom 5. Dezember 2004* in: Bautechnik 83, H. 3, S. 202–208.
- [8] MAQSOOD, S. T.; SCHWARZ, J. (2008) *Analysis of building damage during the 8th October, 2005 Earthquake in Pakistan* in: Seismological Research Letters 79, no. 2, pp. 163–177.
- [9] ABRAHAMCZYK, L.; SCHWARZ, J.; LOBOS, D.; MAIWALD, H. (2010) *Das Magnitude 8.8 Maule (Chile)-Erdbeben vom 27. Februar 2010 – Ingenieuranalyse der Erdbebenschäden* in: Bautechnik 87, H. 8, S. 462–473.
- [10] 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.
- [11] MAIWALD, H. (2007) *Ingenieurmäßige Ermittlung von Hochwasserschadenspotentialen im mikroskaligen Maßstab* [Dissertation]. Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar.
- [12] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H. (2007) *Berücksichtigung struktureller Schäden unter Hochwassereinwirkung* in: Bautechnik 84, H. 7, S. 450–464.

- [13] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2011) *Ermittlung von Hochwasserschäden unter Berücksichtigung der Bauwerksverletzbarkeit, EDAC-Hochwasserschadensmodell* in: scientific technical reports 01-11. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Universitätsverlag.
- [14] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2014) *Schadensmodelle für extreme Hochwasser – Teil 2: Erste Schlussfolgerungen aus dem Ereignis vom Juni 2013* in: Bautechnik 91, H. 5, S. 354–367.
- [15] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2016) *Die Sturzflut von Braunschweig – Ingenieuranalyse der Gebäudeschäden* in: Bautechnik 93, H. 12, S. 925–932.
- [16] MIURA, H.; WIJEWICKREMA, A.; INOUE, S. (2006) *Evaluation of tsunami damage in the eastern part of Sri Lanka due to the 2004 Sumatra earthquake using remote sensing technique* in: 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No.856.
- [17] 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.
- [18] VALENCIA, N.; GARDI, A.; GAURAZ, A.; LEONE, F.; GUILLANDE, 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.
- [19] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; LOBOS, D. (2010) *Das Magnitude 8.8 Maule (Chile)-Erdbeben vom 27. Februar 2010 – Ingenieuranalyse der Tsunamischäden* in: Bautechnik 87, H. 10, S. 614–622.
- [20] SUPPASRI, A.; MAS, E.; CHARVET, I.; GUNASEKERA, R.; IMAI, K.; FUKUTANI, Y.; ABE, Y.; IMAMURA, F. (2013) *Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan Tsunami* in: Natural Hazards 66, no. 2, pp. 319–341.
- [21] Ministry of Land, Infrastructure and transportation (MLIT) *Survey of tsunami damage condition* [online]. [Zugriff am: 15. Dez. 2017]. <http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi-hukku-ou-arkaibu.html>
- [22] KLINGER, A. (2008) *Verhalten von Bauwerken unter Windwirkungen* [Projektarbeit]. Bauhaus-Universität Weimar.
- [23] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2016) *Der Tornado von Bützow in Mecklenburg-Vorpommern – Ingenieuranalyse der Gebäudeschäden* in: Bautechnik 93, H. 4, S. 254–264.
- [24] RASCHKE, M. (2003) *Die Korrelation zwischen Erdbebenschaden und Erdbebenstärke und deren Anwendung in der Erdbebenrisikoanalyse* [Dissertation]. Bauhaus-Universität Weimar.
- [25] SPENCE, R.; FOULSER-PIGGOTT, R. (2014) *The International Macroseismic Scale – extending EMS-98 for global application* in: 2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul, 2014.
- [26] SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; LEIPOLD, M.; WENK, TH. (2015) *Vulnerability assessment and damage description for R.C. frame structures following the EMS-98 principles* in: Bulletin of Earthquake Engineering 13, no. 4, pp. 1141–1159.
- [27] MAIWALD, H.; SCHWARZ, J. (2017) *Vulnerability assessment of multi-hazard exposed building types – Development of an EMS-98 based empirical-statistical methodology* in: 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Santiago Chile, 2017.
- [28] FUJITA, T. T. (1992) *Mystery of Severe Storms*. Chicago: Chicago University Press.
- [29] FUJITA, T. T. (1971) *Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity*. University of Chicago.
- [30] DOTZEK, N.; BERZ, G.; RAUCH, E.; PETERSON, R. E. (2000) *Die Bedeutung von Johannes P. Letzmanns „Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben“ für die heutige Tornadoforschung* in: Meteorologische Zeitschrift 9, H. 3, S. 165–174.
- [31] DOTZEK, N.; HUBRIG, M.; BERZ, G. (2005) *TORRO- und Fujita-Skala Beschreibungen, angepasst für Mitteleuropa* [online]. [Zugriff am: 15. Sept. 2015]. [http://www.tordach.org/pdf/FT\\_scales.pdf](http://www.tordach.org/pdf/FT_scales.pdf)
- [32] FEUERSTEIN, B.; DIRKSEN, E.; DOTZEK, N.; GOROENEMEIJER, P.; HOLZER, A.; HUBRIG, M.; RAUCH, E. (2009) *An illustrated verbal description or the TORRO- and Fujita-Scale adapted for Central Europe considering buildings structure and vegetation characteristics* in: 5<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms. Landshut, Germany, 2009.
- [33] ABRAHAMCZYK, L.; SCHWARZ, J.; LEIPOLD, M. (2016) *Normenbezogene Schadenserwartung von Stahlbetonrahmensystemen in Schwach- und Starkbebengebieten* in: Bautechnik 93, H. 4, S. 265–277.
- [34] SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; LEIPOLD, M.; WENK, T. (2015) *Vulnerability assessment and damage description for R.C. frame structures following the EMS principles* in: Bulletin of Earthquake Engineering 13, no. 4, pp. 1141–1159.
- [35] SCHWARZ, J.; ABRAHAMCZYK, L.; LEIPOLD, M.; SWAIN, T.M.; KAUFMANN, CH. (2006) *Damage description for earthquake risk assessment* in: 1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, Switzerland, 2006.
- [36] PINELLI, J.-P.; SIMIU, E.; GURLEY, K.; SUBRAMANIAN, C.; ZHANG, L.; COPE, A.; FILLIBEN, J. J.; HAMID, S. (2004) *Hurricane Damage Prediction Model for Residential Structures* in: Journal of Structural Engineering, no. 11, pp. 1685–1691.
- [37] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; BEINERSDORF, S.; KAUFMANN, C. (2018) *Evaluation of the vulnerability of existing building stocks under single and multi hazard impact* in: 16<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering. Thessaloniki, Greece, 2018.
- [38] SCHWARZ, J.; MAIWALD, H.; KAUFMANN, C. (2016) *Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Hochwasser-Schadenspotenzialen* in: Bautechnik 93, H. 4, S. 214–229.
- [39] SCHWARZ, A.; OIKONOMOU, M.; SCHWARZ, J. (2017) *Long-term evaluation of post-disaster reconstruction and impacts of natural hazards on urban transformation – the case study of Aigio, Greece* in: 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Santiago Chile, 2017.

**Autoren**

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

Dr.-Ing. Jochen Schwarz  
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum)  
Marienstraße 13  
99421 Weimar  
schwarz@uni-weimar.de