



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.dbbs.tu-dresden.de



26. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

**PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN**

14./15. MÄRZ 2016



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

Tagungsband

26. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

14. und 15. März 2016

© 2016 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen.

Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Fußgängerbrücke Schierstein. Foto: Cengiz Dicleli

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-467-7

Inhalt

Herzlich willkommen zum 26. Dresdner Brückenbausymposium	13
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i>	
Außer Konkurrenz	15
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Realisierungswettbewerb zum Ersatzneubau der Eisenbahnüberführungen über die Oder und die Odervorflut bei Küstrin-Kietz	23
<i>Auszug aus der Broschüre der DB Netz AG 2016, Redaktion: Dipl.-Ing. Hartmut Schreiter</i>	
Zur Gestaltung von Brücken der Bundesfernstraßen – Die Suche nach der besten Lösung ...	37
<i>Dr.-Ing. Gero Marzahn, Dr.-Ing. Heinz-Hubert Benning</i>	
Search for the true structural solution	47
<i>Prof. Jiri Strasky, DSc.</i>	
Der Ersatzneubau der Lahntalbrücke Limburg	67
<i>Dipl.-Ing. Annett Nusch, Dr.-Ing. Stefan Franz</i>	
Wirtschaftliche Selbstkletterschalung für Europas aktuell größtes Brückenbauprojekt „Hochmoselbrücke	85
<i>Dipl.-Ing. Sebastian Riegel</i>	
Verstärkung von Brücken mit externer Vorspannung – Einsatzbereiche und Randbedingungen	103
<i>Dipl.-Ing. Michael Buschlinger, Dipl.-Ing., MBA Annette Jarosch</i>	
Ulrich Finsterwalder (1897–1988) – Doyen des Brückenbaus	119
<i>Prof. Cengiz Dicleli</i>	
Gestaltungskonzept für die Brückenbauwerke im Zuge der BAB A 3 zwischen AK Biebelried und AK Fürth/Erlangen	153
<i>LBD Dipl.-Ing. Bernd Endres, Dipl.-Ing. Rolf Jung</i>	
Reparatur der Autobahnbrücke über die Süderelbbrücke nach schwerem Schiffsanprall – Nachrechnung, Planung, Ausführung, Analyse	165
<i>Dipl.-Ing. Dirk Seipelt, Dipl.-Ing. Stefan Eschweiler, Dipl.-Ing. Thomas Neysters, Brinja Coors M.Sc., Dipl.-Ing. Martin Grassl</i>	
Langzeitverhalten von geokunststoffbewehrten Stützkonstruktionen – zukünftig eine Standardbauweise auch für Brückenwiderlager?	177
<i>Dipl.-Ing. Hartmut Hangen, M.Sc. July Ellen Jaramillo Castro</i>	
Die Herausforderungen und Möglichkeiten einer umfassenden Grundlagenanalyse am Beispiel des Hovenringes in Eindhoven (NL)	193
<i>Dipl.-Ing. Adriaan Kok, Dipl.-Des. Marion Kresken</i>	
Die Butterfly-Bridge in Kopenhagen	211
<i>Dr.-Ing. Karl Morgen, Dipl.-Ing. Jan Lüdders</i>	
Militärischer Einfluss auf Konstruktion und Architektur von Eisenbahnbrücken im Deutschen Reich	221
<i>Volker Mende M.A.</i>	

Verstärken mit Carbonbeton im Brückenbau	235
<i>Dr.-Ing. Harald Michler</i>	
Zur Anwendung von Szenario-Spektren beim seismischen Nachweis von Brücken	249
<i>Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
Brücken bauen mit Eisenbeton – Gedanken zum denkmalgerechten Umgang	263
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock</i>	
Brückenbauexkursion 2015 – Infrastrukturprojekte in Tschechien, Österreich und Deutschland	273
<i>Dipl.-Ing. Sebastian Wilhelm, Dipl.-Ing. Robert Zobel</i>	
Chronik des Brückenbaus	283
<i>Zusammenstellung: Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
Inserentenverzeichnis	311

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.

Zur Anwendung von Szenario-Spektren beim seismischen Nachweis von Brücken

Dr.-Ing. habil. Dirk Proske

Axpo Power AG, Döttingen (Schweiz)

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren haben verschiedene Studien zur Ermittlung von Einwirkungen auf Bauwerke gezeigt, dass manche Einwirkungen bislang unterschätzt wurden. Dazu zählt auch die seismische Einwirkung. Auf der anderen Seite zeigen gut konstruierte Bauwerke im Allgemeinen und Brückenbauwerke im Besonderen unter seismischen Einwirkungen oft eine höhere Tragfähigkeit als rechnerisch erwartet. Neue numerische Verfahren, wie die Anwendung der Cumulative-Absolute-Velocity- oder Szenario-Spektren (Conditional Spectrum) können diese rechnerischen Reserven ausweisen. Im folgenden Beitrag wird näher auf das Verfahren der Conditional Spectra bzw. Conditional Mean Spectra eingegangen. Der Beitrag fasst den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik in diesem Bereich zusammen. Er zeigt, wie man solche Spektren und die dazugehörigen Zeitverläufe selbst erstellen kann. In den USA ist in den vergangenen Jahren die erste Brücke damit bemessen und erbaut worden. 2016 ist dort die Einführung einer normativen Grundlage geplant.

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurden weltweit verschiedene Studien zur Bestimmung von natürlichen Einwirkungen auf Bauwerke durchgeführt. Diese Studien zeigen in vielen Fällen, dass charakteristische Einwirkungen zu optimistisch, also zu gering, gewählt wurden, [1], [2]. Dies kann häufig auf die systematische Vernachlässigung von Unsicherheiten, zum Beispiel durch eine begrenzte Datenbasis, die erst in den vergangenen Jahren durch die Verwendung historischer Werte erweitert werden konnte [3], zurückgeführt werden.

Bei den Windlasten haben z. B. Usbeck et al. [4] auf eine geringe Anzahl Stürme zu Beginn des 20. Jahrhunderts hingewiesen, für Hochwasser weisen Wetter et al. [5] auf ein „Hochwasserloch“ im 20. Jahrhundert am Rhein hin. Beides hat Auswirkungen auf die statistische Auswertung, die für die Ermittlung der charakteristischen Einwirkungen basierend auf den vorhandenen Daten notwendig ist. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr, durch die Berücksichtigung historischer

Proxydaten fehlerhafte Werte in die Statistik einzubauen. So kann man statistisch nachweisen, dass die Anzahl der Vulkanausbrüche während der Weltkriege sank [6]. Auch gibt es Statistiken, die nachweisen, dass an Sonntagen eine größere seismische Aktivität auftritt, als an anderen Wochentagen [7]. Solche Effekte stehen in der Regel nicht in direktem Zusammenhang mit den beobachteten Erscheinungen, sondern weisen auf systematische Fehler bei der Erhebung oder Auswertung hin und beeinflussen die Qualität der Ergebnisse negativ.

Die Identifikation und Benennung von Unsicherheiten hat in den vergangenen Jahren gerade im Erdbebenwesen zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung der Bestimmung der Gefährdungen bzw. Einwirkungen geführt. Nicht umsonst hat man in verschiedenen Ländern weltweit die seismischen Gefährdungen und Einwirkungen neu bestimmt, wie z. B. in den PEGASOS- [8], CEUS-SSC- [9], SIGMA- [10], EMME- [11] oder SHARE-Studien, natürlich auch, um den erheblichen wissenschaftlichen Fortschritt in diesem Fachgebiet zu berücksichtigen. Gleichzeitig treten dabei immer wieder neue Fragen auf, wie z. B. die v_s - κ -Problematik, wobei v_s die Scherwellengeschwindigkeit und der Beiwert κ ein standortspezifischer Wert für die Simulation von Bodenbewegungen im hochfrequenten Bereich sind.

Die Berücksichtigung der Unsicherheiten hat, trotz der intensiven Diskussion von Doppelzählungen, häufig zu einer Erhöhung der numerischen seismischen Gefährdungen und Einwirkungen geführt.

2 Brückeneinstürze durch Erdbeben

Auf der anderen Seite führen nicht alle Erdbeben zu Einstürzen bzw. den Schäden an Bauwerken, die man rechnerisch erwarten würde. In vielen Fällen zeigen die gut konstruierten Bauwerke ein besseres Verhalten. So haben selbst inhomogene historische Mauerwerksbogenbrücken nach früheren Sanierungen Erdbeben der Magnitude 6 ohne Schäden abgetragen [13].

Es existieren verschiedene Datenbanken oder Erfahrungsberichte zu Schäden an und Einstürzen von Brücken, die eine systematische Auswertung

der Ursachen erlauben [14], [15], [16]. Diese zeigen, dass Erdbeben unterdurchschnittlich zum Versagen von Brücken beitragen. So standen in den USA maximal 3 % aller Brückeneinstürze zwischen 1980 und 2012 in Verbindung mit Erdbeben [16], bei anderen Datensätzen liegen die Werte deutlich darunter, wie Tabelle 1 zeigt. Das bezieht auch Beobachtungszeiträume von über 100 Jahren mit ein [16]. In praktisch allen Fällen dominieren hydraulische Ereignisse die Einstürze von Brücken, gefolgt von Anprallen. Der Anteil von Anprallen als auslösendes Ereignis für Brückeneinstürze liegt teilweise eine Zehnerpotenz über dem Anteil der Erdbeben.

Tabelle 1: Ursachen für Brückenversagen in den USA von 1987 bis 2011 [17]

Ursache	Anzahl	Anteil [%]
Hydraulische Ereignisse	379	54,85
Anpralle	89	12,88
Überlastung	78	11,29
Alterung total	61	8,83
Feuer	19	2,75
Sturm/Wirbelsturm	17	2,46
Geotechnische Ursachen	12	1,74
Konstruktionsfehler	10	1,45
Sonstige	7	1,01
Erdbeben	6	0,87
Ermüdung	5	0,72
Entwurfsfehler	4	0,58
Bäume	2	0,29
Fundamentversagen	2	0,29
Summe	691	100,00

Durch die Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik im Bereich des erdbebensicheren Bauens und durch die Berücksichtigung dieses Wissens in neuen Normen konnte außerdem die Absolutanzahl der Erdbebeneinstürze von Brücken verringert werden. Bild 1 zeigt die Verteilung der Brückenschäden nach Erdbeben in Bezug auf die verwendete Normengeneration für die Bemessung der Brücken. Man erkennt deutlich, dass insbesondere durch die Nutzung der moderneren Vorschriften ab Beginn der 1980er Jahre die Häufigkeit des Versagens der Brücken durch Erdbeben, aber auch die Häufigkeit der schweren Schäden deutlich abgenommen haben.

Trotzdem haben Erdbeben natürlich zum Versagen von Brücken geführt, wie z. B. dem Einsturz von sieben Brücken während des San-Fernando-Erdbebens 1971, dem Einsturz des Cypress-Street-Viadukts mit 41 Todesopfern während das Loma-Prieta-Erdbebens 1989 oder Brückeneinstürze während des Kobe-Erdbebens 1995, [17], [19]. Die Bilder 2 und 3 zeigen beispielhaft schwere Schäden an Brücken nach dem Kobe-Erdbeben. Gleichwohl bestätigen die Beobachtungen des Tohoku-Erdbebens 2011 in Japan, dass die schweren und meisten Brückenschäden durch den Tsunami und die Überflutung und nicht durch das Erdbeben entstanden sind, [20], [21]. Der Anteil von Erdbeben als auslösendes Ereignis für Brückeneinstürze gemäß Tabelle 1 wird also auch für Japan bestätigt. Vergleichbare Studien gibt es auch für andere Länder, z. B. Chile [22].

Die Beobachtungen des Verhaltens der Brücken bei Erdbeben geben einen Hinweis, dass in manchen Fällen in den numerischen Nachweisen die Tragfähigkeit unterschätzt wird. Die Erschließung rechnerischer Reserven bezieht sich nicht nur auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit der Brücken, sondern auch auf die Nutzungsfähigkeit der Brücke nach einem Erdbeben. Für die Bewertung der

Infrastruktursysteme sind Informationen über die Verfügbarkeit von Streckenabschnitten nach einem schweren Erdbeben von größter Bedeutung. Während man z. B. früher keine große Aufmerksamkeit auf die seismische Robustheit von Hafenanlagen gelegt hat, geht man heute davon aus, dass solche Anlagen für den Wiederaufbau einer Region nach schweren Erdbeben außerordentlich wichtig sind. Dies hat sich z. B. in Kobe 1995 oder in Haiti 2010 gezeigt [23]. Außerdem sind die finanziellen Folgen des Ausfalls der Infrastruktursysteme erheblich. Die Gesamtschäden des Hurrikans

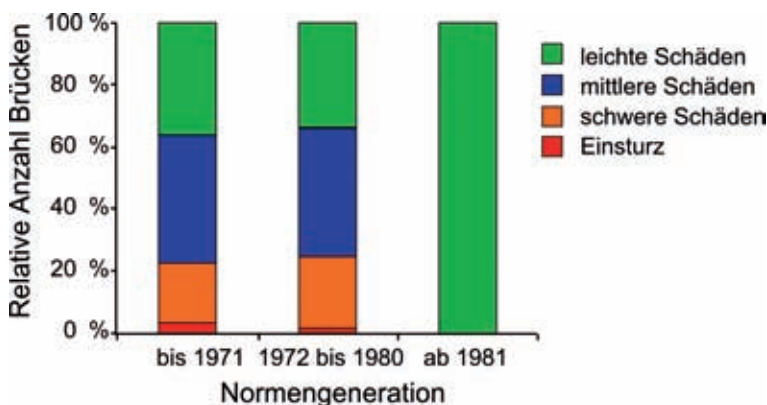


Bild 1: Erdbebeninduzierte Schäden an Brücken im Raum Los Angeles in Abhängigkeit von der verwendeten Normengeneration zur Bemessung der Brücke [18]



Bild 2: Seitlicher Versub eines Brückenträgers durch das 1995er Kobe-Erdbeben
(Foto: Thomas Wenk, [18])



Bild 3: Versagen von Stahlbetonstützen einer Brücke beim 1995er Kobe-Erdbeben
(Fotos: Thomas Wenk, [18])

Katrina im August 2005, der unter anderem die Überflutung von New Orleans verursachte, wurden auf 125 Milliarden US-Dollar geschätzt [24]. Der Ausfall des Hafens kostete allein ca. 40 Milliarden US-Dollar (basierend auf Schätzungen gemäß [25]). Deshalb lautet eine Anforderung an lebenswichtige Strukturbauwerke, wie z. B. die San Francisco–Oakland Bay Bridge, dass sie auch nach einem sehr schweren Erdbeben funktionsfähig bleiben.

3 Neue seismische Nachweisverfahren

Um nun mögliche rechnerische Reserven der Brückenbauwerke unter seismischen Einwirkungen zu erschließen, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Entwicklungen vorangetrieben. Diese Entwicklungen greifen wiederum an verschiedenen Stellen in den Nachweisprozess ein. So hat sich die Anwendung von *Pushover*-Analysen (verformungsbasierte Analysen) in Verbindung mit inkrementellen dynamischen Analysen (IDA) etabliert. Das Verfahren wurde vom Autor unter anderem in [26], [27] vorgestellt, siehe aber auch [28], [29].

Einen weiteren Ansatz stellt die Umstellung von Ein-Parameter-Intensitätsparametern, z. B. Spitzenbeschleunigungen oder Spektralbeschleunigungen auf vektorbasierte Intensitätsparameter dar. Dazu zählt die kumulierte absolute Geschwindigkeit (*Cumulative Absolute Velocity* CAV) [30]. Dieser Ansatz wird im Folgenden kurz erläutert.

Die beiden bedeutendsten Stärkemaße von Erdbeben sind Magnitude und Moment. Die Berücksichtigung der Effekte auf Bauwerke erfolgt in sogenannten makroseismischen Intensitätsskalen [31]. Diese können empirisch in Ankerpunkte von Spektralbeschleunigungen umgerechnet werden,

z. B. in die Spitzenbodenbeschleunigung (PGA). Für Kalifornien haben Gutenberg und Richter (entnommen [32]) folgenden empirischen Zusammenhang vorgestellt:

$$\log a_{\text{PGA}} = \frac{I_{\text{MM}}}{3} - 2,5 \quad [\text{in m/s}^2] \quad (1)$$

mit: a_{PGA} PGA-Spektralbeschleunigung

I_{MM} Momenten-Magnitude-Intensität

Die Spektralbeschleunigungen sind Bestandteil der Spektren, die zum Entwurf der Brückenbauwerke verwendet werden. Das Bodenantwortspektrum mit einer spezifizierten jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit wird auch *Gefährdungsspektrum* oder *Uniform Hazard Spectrum* genannt. Im Folgenden werden die Begriffe *Bodenantwortspektrum* und *Uniform Hazard Spectrum* verwendet.

Es ist allerdings bekannt, dass die Anwendung der Spektralbeschleunigungen konservativ ist, da der PGA-Wert eine Vielzahl von seismischen Parametern, die für die Bestimmung des Bauwerks widerstandes unter einem Erdbeben notwendig sind, vernachlässigt.

Die Cumulative Absolute Velocity wird nun bestimmt, indem der Beschleunigungs-Zeit-Verlauf über die Starkbebendauer integriert wird. Dabei werden die Dauer, die Frequenz, die Amplitude und die Anzahl der Schwingungen der Zeitverläufe berücksichtigt, das heißt es werden deutlich mehr für das Bauwerk relevante Informationen verwendet.

Ein weiteres Verfahren, welches im folgenden Abschnitt vorgestellt werden soll, ist die Anwendung von Szenario-Spektren, die im englischen Sprachgebrauch als *Conditional Spectrum* (CS) bzw. *Conditional Mean Spectrum* (CMS) bezeichnet werden.

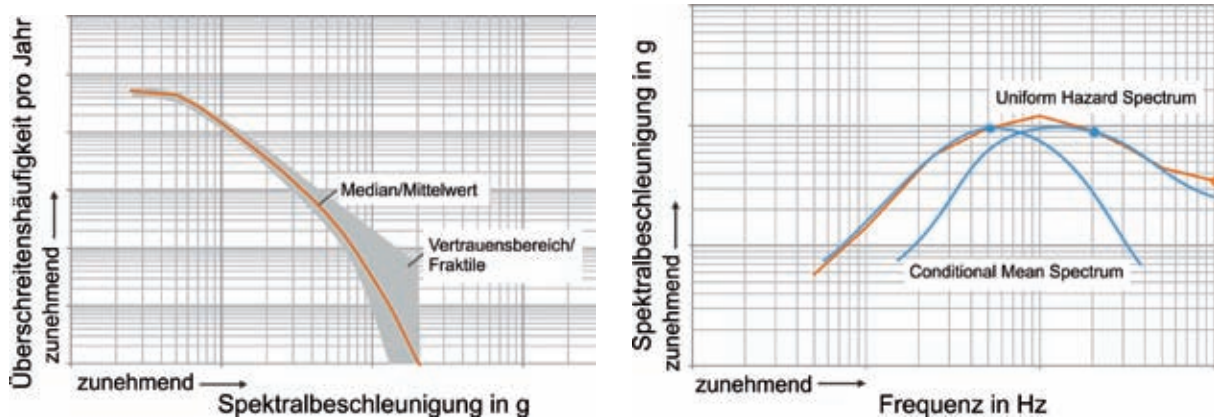


Bild 4: Gefährdungskurve für eine seismische Einwirkung (links) und rechts das Bodenantwortspektrum mit Conditional Mean Spectrum an zwei Ankerpunkten

4 Szenario-Spektren

4.1 Ausgangslage

Das *Conditional-Mean-Spectrum*- und das *Conditional-Spectrum-Verfahren* sind ein formaler Prozess, um Zeitverläufe zu definieren, die der vorgegebenen Gefährdung eines *Uniform-Hazard-Spektrums* entsprechen. Der theoretische Vorteil dieser Verfahren wird in diesem Abschnitt kurz erläutert. Im Anschluss wird gezeigt, dass die Ermittlung des Conditional Spectrum mit den heute vorliegenden Werkzeugen relativ einfach ist. Anschließend werden verschiedene empirische Vergleichsrechnungen vorgestellt.

Die in einem Spektrum angegebenen Spektralbeschleunigungen können über Beschleunigungs-Zeit-Verläufe realisiert werden, mit denen das Bauwerk rechnerisch beaufschlagt wird. Grundlage für die Auswahl der kompatiblen Beschleunigungs-Zeit-Verläufe sind vorgegebene Bodenant-

wortspektren nach verschiedenen Normen, die häufig sehr breitbandig sind. Diese normativen Bodenantwortspektren bzw. Uniform-Hazard-Spektren geben für jede Frequenz die maximal mögliche Spektralbeschleunigung an, die sich aus der Gefährdung ergibt. In anderen Worten, das vorgegebene Spektrum ist ein abdeckendes Spektrum aller möglichen Erdbeben über alle Frequenzen. Für die konformen Beschleunigungs-Zeit-Verläufe wird dann unterstellt, dass sich bei einem einzigen Erdbeben die maximalen Spektralbeschleunigungen über alle Frequenzen ergeben. Das ist für die meisten Standorte eine sehr konservative Annahme, da Erdbeben von verschiedenen Quellen mit verschiedenen Zeitverläufen auftreten können und in der Gefährdung zusammengeführt wurden.

Tatsächlich werden Erdbeben von verschiedenen Erdbebenquellen und aus verschiedenen Entfernungen verschiedene Beschleunigungs-Zeit-Verläufe am Standort und damit verschiedene Spektren erzeugen. Das heißt, ein nahes schwaches Erdbeben

wird über einen anderen Frequenzbereich eine maximale Spektralbeschleunigung verursachen als ein fernes starkes Erdbeben. Bild 4 versucht diesen Zusammenhang darzustellen. Im Bild 4 sieht man links die Gefährdungskurve für einen bestimmten Ankerpunkt des Spektrums, z. B. PGA. Mit diesem Ankerpunkt und der vorgegebenen Wiederkehrperiode kann das Spektrum, dessen Form ebenfalls vorgegeben ist, genau angegeben werden. Im Bild 4 rechts wird dieses Spektrum in zwei Unterspektren (Conditional Mean Spectrum) unterteilt, die wiederum an bestimmten Ankerpunkten dem vorgegebenen Bodenantwortspektrum bzw. Uniform-Hazard-Spektrum entsprechen.

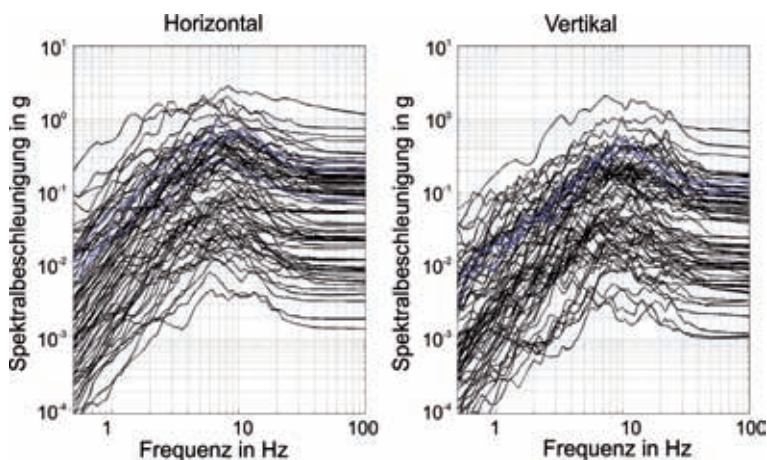


Bild 5: Vergleich von 74 standortspezifischen Szenario-Spektren mit einem standortspezifischen Uniform-Hazard-Spektrum (Diagramm erstellt von P. Renault, angepasst durch den Autor)

Deutlich erkennt man, dass jedes der beiden Spektren nicht mehr überall die Spektralbeschleunigung des Uniform-Hazard-Spektrums erreicht.

Die Anzahl der zu ermittelnden Spektren hängt vom verwendeten Verfahren ab (Conditional Mean Spectrum, Conditional Spectrum). Bild 5 zeigt ein Beispiel, in dem für einen Standort 74 individuelle Szenario-Spektren ermittelt wurden, um das Uniform-Hazard-Spektrum abzudecken.

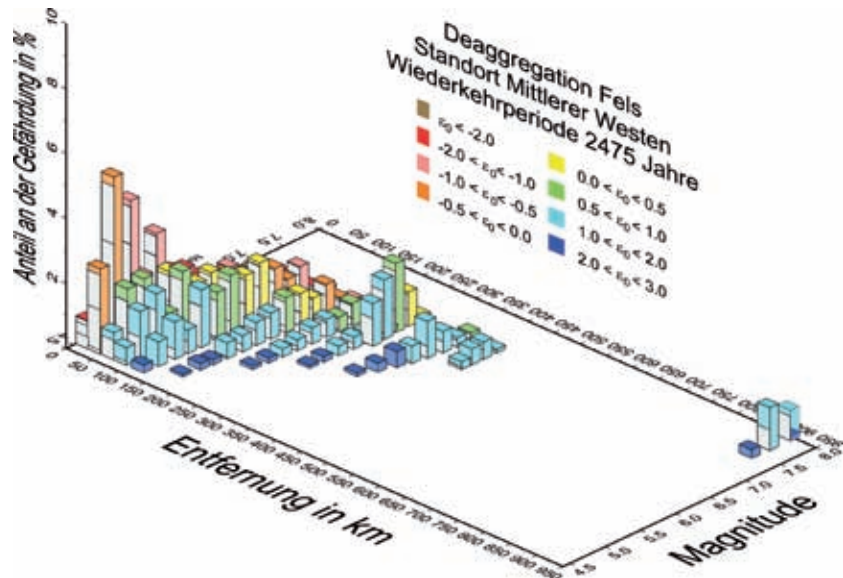


Bild 6: Beispiel einer Deaggregation

Um diese Spektren, die einer Vielzahl verschiedener Erdbeben entsprechen, ermitteln zu können, muss man die Gefährdungskurve aus Bild 4 links zerlegen. Dieser Prozess wird als Deaggregation bezeichnet. In Bild 6 ist eine Deaggregation für einen Standort im mittleren Westen der USA dargestellt. Für die Deaggregation steht für das Gebiet der USA heute freie Software zur Verfügung [33].

fernung von 10 km sein. Die von einem solchen Erdbeben verursachten Bodenbeschleunigen am Standort können mit einem Abminderungsmodell (*Attenuation* oder *Ground Motion Prediction Model*) ermittelt werden. Bild 7 visualisiert ein solches Abminderungsmodell mit einer freien Software.

4.2 Berechnungsschritte

Im Rahmen der Deaggregation der Erdbebengefährdung wird in der Regel auch das relevante Erdbeben, welches die maximale Beschleunigung für eine bestimmte Frequenz, z. B. die erste Eigenfrequenz, bestimmt. Das kann z. B. ein Erdbeben der mittleren Magnitude 7 mit einer mittleren Ent-

fernung von 10 km sein. Die von einem solchen Erdbeben verursachten Bodenbeschleunigen am Standort können mit einem Abminderungsmodell (*Attenuation* oder *Ground Motion Prediction Model*) ermittelt werden. Bild 7 visualisiert ein solches Abminderungsmodell mit einer freien Software.

$$\varepsilon(T) = \frac{\ln S_a(T) - \mu_{\ln S_a}(M, R, T)}{\sigma_{\ln S_a}(T)} \quad (2)$$

- mit:
- ε Unterschied zwischen Spektralbeschleunigung aus Abminderungsmodell und dem Uniform-Hazard-Spektrum
 - T Periode in Sekunden
 - S_a Spektralbeschleunigung in g
 - $\ln S_a$ Natürlicher Logarithmus von S_a
 - $\mu_{\ln S_a}(M, R, T)$ Prognostizierter Mittelwert von $\ln S_a$
 - $\sigma_{\ln S_a}(T)$ Prognostizierte Standardabweichung von $\ln S_a$
 - M Magnitude
 - R Abstand zur Erdbebenquelle

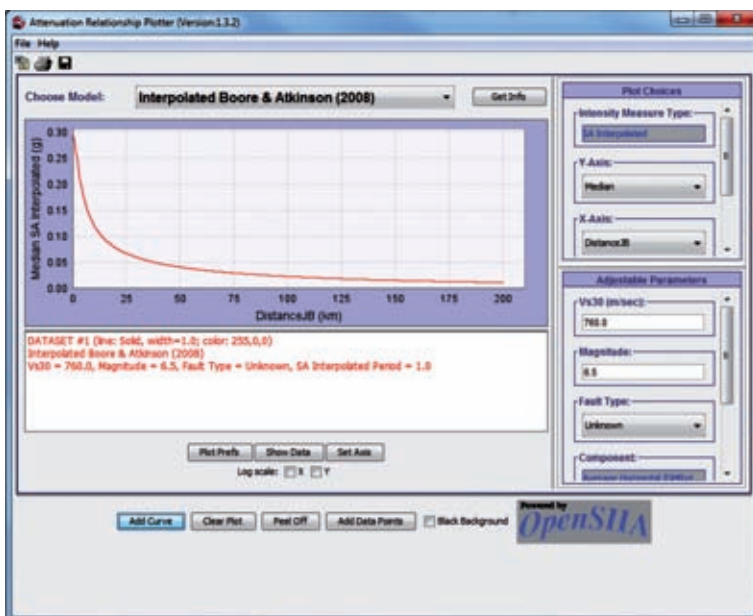


Bild 7: Abminderungsmodell (Attenuation Model) zur Bestimmung der Spektralbeschleunigung für das mittlere Erdbeben

Man verwendet anstelle von S_a den natürlichen Logarithmus und erhält dafür eine standardnormalverteilte Größe.

Im Folgenden sollen vereinfacht die Berechnungsschritte für die Erstellung des Conditional Mean Spect-

rum vorgestellt werden. Die Berechnungsschritte sind relativ einfach und liegen programmtechnisch in freier Software vor. Im Gegensatz zum Conditional Spectrum versucht man beim Conditional Mean Spectrum nicht das gesamte Frequenzband durch beliebige Conditional Spectra abzudecken, sondern man wählt Ankerpunkte T^* . Als Ankerpunkte wählt man häufig die erste Eigenfrequenz der Baustruktur. Für die zugehörige Spektralbeschleunigung ermittelt man die Magnitude, die Entfernung und das ϵ . Wie bereits erwähnt, kann man diese Werte für die USA im Internet beim geologischen Dienst abfragen [33].

Im nächsten Schritt werden der Mittelwert $\mu_{\ln Sa}(M, R, T)$ und die Standardabweichung $\sigma_{\ln Sa}(T)$ der logarithmischen Spektralbeschleunigung für den Ankerpunkt basierend auf der mittleren Magnitude und der mittleren Entfernung ermittelt. Dafür stehen im Internet Programme (Bild 7) zur Verfügung [35], [36].

Im dritten Schritt wird der Conditional Mean für $\epsilon(T)$ für verschiedene Frequenzen bestimmt. Dieser Wert ergibt sich als Produkt von $\epsilon(T^*)$ des Ankerpunktes mit dem Korrelationskoeffizient $\rho(T_i, T^*)$ [34]:

$$\mu_{\epsilon(T_i) | \epsilon(T^*)} = \rho(T_i, T^*) \cdot \epsilon(T^*) \quad (3)$$

mit: $\mu_{\epsilon(T_i) | \epsilon(T^*)}$ Conditional Mean von $\epsilon(T_i)$ in Abhängigkeit von $\epsilon(T^*)$

Für die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten (Bild 8) liegen verschiedene Verfahren für bestimmte Frequenzen vor, die programmtechnisch umgesetzt sind.

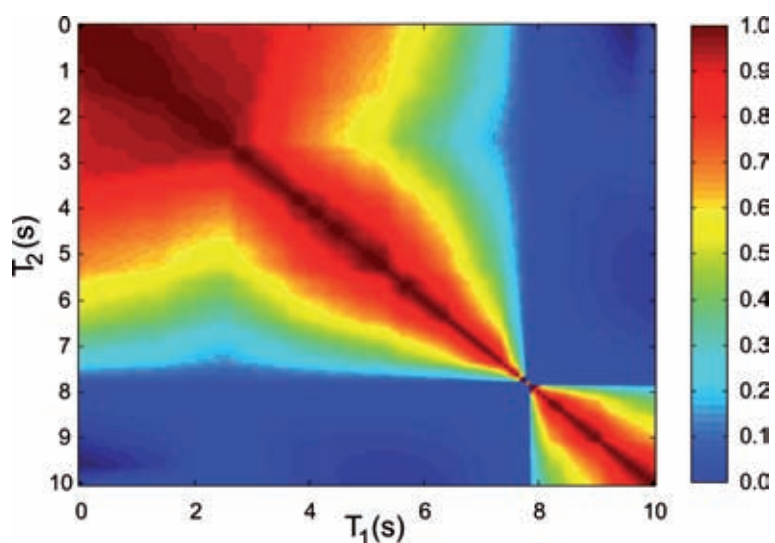


Bild 8: Visualisierung der bedingten Baker-Jayaram-Korrelation nach [37]

Im letzten Schritt wird das Conditional Mean Spectrum gemäß folgender Formel bestimmt [34]:

$$\mu_{\ln Sa(u) | \ln Sa(T^*)} = \mu_{\ln Sa}(M, R, T) + \rho(T_i, T^*) \cdot \epsilon(T^*) \cdot \sigma_{\ln Sa}(T_i) \quad (4)$$

Mit den Open-Access-Programmen, die im Internet vorliegen, und den Daten des Geologischen Dienstes der USA kann man praktisch innerhalb kürzester Zeit selbst Zeitverläufe für ein Conditional Mean Spectrum erstellen (Bild 9). Die einzige notwendige kommerzielle Software ist Matlab, für das Matlab-Dateien in Matlab vorliegen. Allerdings kann man diese Dateien mit etwas Aufwand in OCTAVE-Dateien umwandeln. OCTAVE ist freie Software.

Die Variabilität der mittleren Spektren kann man über eine hohe Anzahl der Realisierungen von Zeitverläufen decken, z. B. 30 Zeitverläufe (Bild 9). Wiederholt man den Prozess nicht nur für eine Wiederkehrperiode, mittlere Magnitude und Entfernung (Ankerpunkt T^*), so kann man die gesamte seismische Gefährdung über eine Menge von Zeitverläufen abdecken. Dies nennt man Conditional Spectra und kann zu Hunderten von Zeitverläufen führen (Bild 5).

Details zur Entwicklung der Szenario-Spektren finden sich in zahlreichen Veröffentlichungen, z. B. in [34], [38], [39].

4.3 Nutzen der Szenario-Spektren

Der Nutzen durch die Anwendung des Conditional Spectrum bzw. Conditional Mean Spectrum hängt sowohl von den dynamischen Eigenschaften der Brücke als auch von der Erdbebengefährdung am Standort ab.

Für einen elastischen Einmassenschwinger bringt das Verfahren keine Vorteile, aber für Strukturen, deren Gesamtverhalten auch von höheren Eigenformen abhängt, ergeben sich geringere Einwirkungen [34], [40]. Man muss also mindestens eine Modellauflösung, wie z. B. in Bild 10 für eine Brücke gezeigt, verwenden.

Auf der Einwirkungsseite hängt der Nutzen vom Verhältnis der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens zur Eintrittswahrscheinlichkeit der Bodenbeschleunigung für den Ankerpunkt ab. Wenn z. B. die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdbebens gleich der Eintrittswahrscheinlichkeit der Spektralbeschleunigung für

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.

die erste Eigenfrequenz ist, dann ist die Einsparung durch die Conditional Mean Spectra vernachlässigbar. Ist jedoch die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen dieser spektralen Beschleunigung geringer als die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Erdbebens, so ergibt sich ein Nutzen aus der Anwendung der Conditional Spectra. Üblicherweise ist dies der Fall in Regionen mit höherer seismischer Aktivität, weil dort verschiedene Erdbeben auf die Strukturen einwirken können. Inwieweit sich eine Einsparung für Regionen mit geringer seismischer Aktivität ergibt, ist in der Fachliteratur noch strittig.

Bild 11 zeigt Mittelwerte eines Etagenantwortspektrums für eine bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeit nach Uniform-Hazard-Spektrum (UHS) und Conditional Spectrum (CS) für eine Region mit mittlerer seismischer Aktivität. Man sieht, dass im Großteil des Frequenzbandes die Spektralbeschleunigung basierend auf Szenario-Spektren deutlich unterhalb der Spektralbeschleunigung basierend auf dem Uniform-Hazard-Spektrum liegt. Allerdings gilt das nicht für den gesamten Frequenzbereich. Es gibt durchaus Bereiche (im Bild bei 10 Hz), in denen Szenario-Spektren und Uniform-Hazard-Spektrum zur gleichen Spektralbeschleunigung führen.

Auch für probabilistische Berechnungen mit Bauwerken konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Conditional Spectra eine deutliche Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit bringt [43].

4.4 Stand und zukünftige Anwendungen der Szenario-Spektren

Nach derzeitigem Kenntnisstand wurde weltweit erst ein Brückenneubau mit dem Verfahren der Conditional Mean Spectra geplant. Es handelt sich dabei um eine Schrägkabelbrücke über den Mississippi in Saint Louis in den USA. Zwei weitere Brücken wurden in Kanada im Rahmen von

Promotionsarbeiten untersucht, eine Brücke in Vancouver und eine Brücke in Montreal. In mindestens zwei weiteren Fällen wurde das Verfahren der Conditional Spectra bzw. Conditional Mean Spectra für Forschungsarbeiten zum dynamischen Verhalten von Brücken bzw. Brücken-

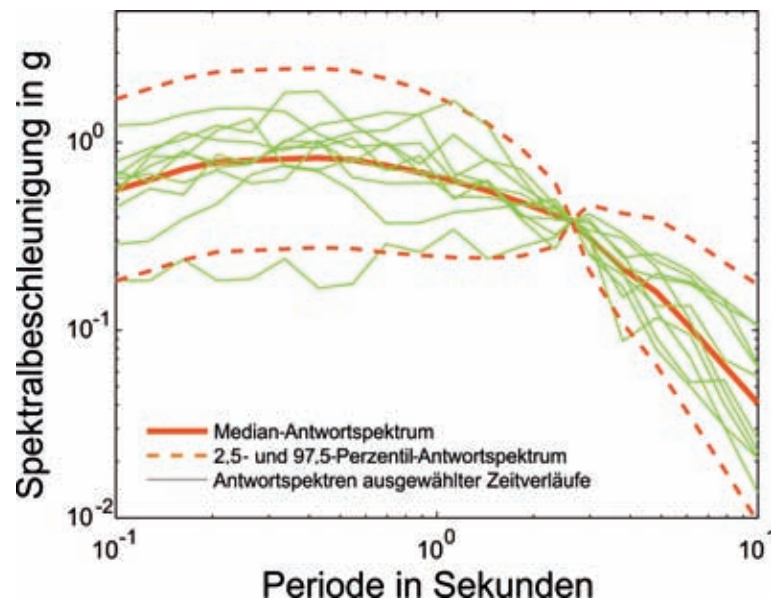


Bild 9: Conditional Mean Spectrum und ausgewählte Zeitverläufe, die das CMS treffen

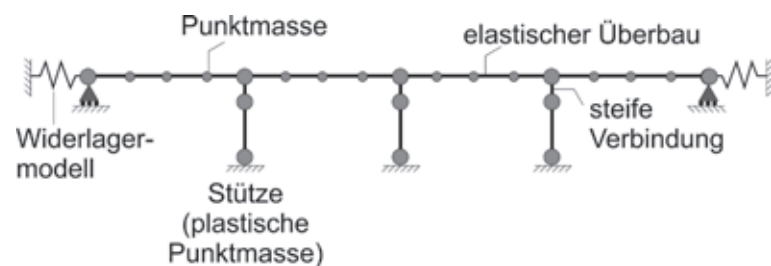


Bild 10: Dynamisches Brückenmodell nach [42]

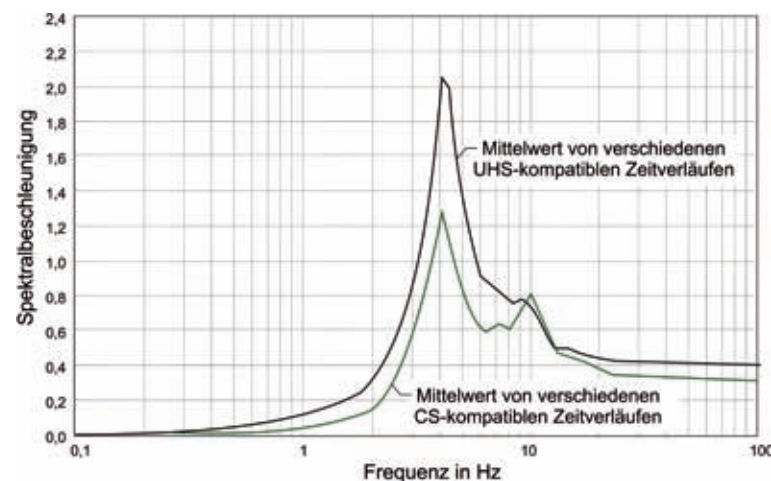


Bild 11: Vergleich zweier Etagenantwortspektrums basierend auf UHS-konformen Zeitverläufen und CS-kompatiblen Zeitverläufen (Diagramm erstellt von D. Kurmann, angepasst durch den Autor)

Tabelle 2: Anwendungen des Conditional Spectrum/Conditional Mean Spectrum für Brückenbauwerke

Ort	Brücke	Verfahren	Bemerkungen	Quelle
St. Louis	Schrägakabelbrücke, Hauptspannweite 460 m	CMS während Entwurf	Anwendung, auch konstruktive Änderungen	[44], [45]
Vancouver	Vier-Feld-Durchlaufträger, Spannweite 50 m	CS und CMS	Forschung, Variantenanalyse	[42], [46]
Montreal	Fünf-Feld-Durchlaufträger, Stahlverbundbrücke, Gesamtlänge 232 m	CMS	Forschung, Berechnung von Fragilities*	[47]
Kalifornien	Jack Tone Road Overcrossing La Veta Avenue Overcrossing Jack Tone Road Overhead	CMS	Forschung, Sensitivitätsstudie für Beschleunigungszeitverläufe	[41]
Kalifornien	Brückenpfeiler, getestet bei PEER/NEES in San Diego	CS	Forschung, nur bezogen auf Brückenpfeiler, die Anwendung der CMS war nicht das primäre Ziel der Studie	[48]

* *Fragilities beschreiben die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit als Funktion der Intensität der Einwirkung, bei seismischen Einwirkungen meistens eine Spektralbeschleunigung oder PGA*

elementen verwendet. Tabelle 2 fasst die bekannten Anwendungen zusammen. Bisher liegen bis auf eine Anwendung nur Forschungsarbeiten vor.

Um eine Verbreitung des hier vorgestellten Verfahrens in der Praxis zu erreichen, ist eine normative Grundlage zwingend. Im ersten Schritt wurde das Verfahren der Conditional Mean Spectra in den 2015er Bericht des US-Programms zur Verringerung der Erdbebengefährdung für die Anforderungen an neue Bauwerke und damit auch für Brücken aufgenommen (NEHRP [49]). Die Empfehlungen aus diesem Bericht werden in die sich in Überarbeitung befindende amerikanische Norm ASCE-7 im Abschnitt 16.2 „Ground Motions“ eingearbeitet [50]. Der Entwurf dieser Norm hat bereits den Bearbeitungsschritt „öffentliche Anhörung“ erreicht. Die Norm soll planmässig 2016 in Kraft gesetzt werden. Damit liegt in den USA ab 2016 eine normative Grundlage für die Verwendung der Conditional-Mean-Spectrum-Methode vor. Mit dieser normativen Grundlage dürfte die Anzahl der Anwendungen des beschriebenen Verfahrens erheblich ansteigen.

Unter Berücksichtigung der Planungshorizonte für große Brückenbauprojekte sollte dies etwa ab 2020 in Veröffentlichungen und Planungsdokumentationen sichtbar werden. Für die Brückenbauingenieure in Europa wäre es überlegenswert, diese normative Entwicklung zu übernehmen. Parallel dazu gibt es Bestrebungen,

die Ermittlung der seismischen Gefährdungen weltweit zu homogenisieren, z. B. in der OPEN-QUAKE-Plattform. Sollte dies erreicht werden, würden praktisch für alle Standorte weltweit Werkzeuge für die Bestimmung der Conditional Spectra vorliegen. Für manche Länder, wie z. B. für die USA, liegen die Werkzeuge heute schon vor, für andere Länder liegen Ergebnisse für manche Standorte vor, wie z. B. in der Schweiz für Basel und Zürich oder in Deutschland gemäß [51]. Für die Schweiz ist die Berechnung einer Brücke mit Conditional Mean Spectrum in den nächsten Jahren vorgesehen.

5 Zusammenfassung

Im diesem Beitrag wurden die aktuellen Entwicklungen zur Anwendung von Szenario-Spektren für die seismische Nachweise von Brücken vorgestellt. Mit diesem Verfahren kann unter Umständen die rechnerische seismische Einwirkung auf Brücken signifikant, also um einen unteren zweistelligen Prozentbetrag verringert werden [42], [41]. Allerdings gilt diese Aussage nicht für das gesamte Frequenzband. Die Größenordnung der rechnerischen Verringerung der Einwirkung bzw. Erhöhung des Widerstandes kann bei bestehenden Brücken über den Erhalt bzw. die Sanierung der Brücke entscheiden und kann bei neuen Brückenbauwerken zu erheblichen Einsparungen führen. Eine gute konstruktive Durchbildung der Brücke bleibt davon aber unbenommen.

Prinzipiell ist das Verfahren mit einem deutlich erhöhten Rechenaufwand verbunden. Das Verfahren wird damit sicherlich Großinfrastrukturbauprojekten vorbehalten bleiben, wie z. B. einer Schrägkabelbrücke über den Mississippi [44]. Für manche Länder sind die notwendigen Daten und Programme heute bereits frei verfügbar. Mit der Einführung einer normativen Grundlage in den USA ist dort in den nächsten Jahren mit einer erhöhten Anzahl der Anwendung des Conditional-Spectrum- bzw. Conditional-Mean-Spectrum-Verfahrens zu rechnen.

Literatur

- [1] Proske, D.: Zur Unsicherheit der Abschätzung von natürlichen Einwirkungen. *Bau-technik* 92 (2015) 12, S. 854–859
- [2] Proske, D.: Massivbrücken unter extremen Wetterbedingungen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 25. Dresdner Brückenbausymposium am 10.3.2015 an der TU Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2015, S. 239–250
- [3] Proske, D.: Statistical Investigation of Extreme Weather Conditions. In: Haukaas, T. (Hrsg.): Proc. of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP12, 12.–15.7.2015 in Vancouver (Canada), erschienen online unter <http://hdl.handle.net/2429/53355>, 7 S. (Zugriff 11.12.2015)
- [4] Usbeck, T.; Wohlgemuth, T.; Pfister, Chr.; Volz, R.; Benistone, M.; Dobbertin, M.: Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *Int. J. Climatol.* 30 (2010), S. 347–358
- [5] Wetter, O.; Pfister, C.; Weingartner, R.; Luterbacher, J.; Reist, T.; Trösch, J.: The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal* 56 (2011) 5, S. 733–758
- [6] Smith, K.: *Environmental Hazards – Assessing Risk and Reducing Disaster*. London: Routledge, 1996
- [7] Vermeesch, P.: Lies, Damned Lies, and Statistics (in Geology). *Eos Trans. Am. Geophys. Union* 90 (2009) 47, S. 443
- [8] Abrahamson, N. A.; Coppersmith, K. J.; Koller, M.; Roth, P.; Sprecher, C.; Toro, G. R.; Youngs, R.: Probabilistic Seismic Hazards Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project). Final report, Wettingen: NAGRA, 7/2004, <http://www.swissnuclear.ch/upload/cms/user/PEGASOSProjectReportVolume1-new.pdf> (Zugriff 4.1.2016)
- [9] Stirewalt, G.; Salomone, L.; McDuffie, S.; Coppersmith, K.; Fuller, C.; Hartleb, R.; Lettis, W.; Lindvall, S.; McGuire, R.; Toro, G.; Slayter, D.; Cumbest, R.; Shumway, A.; Syms, F.; Glaser, L.; Hanson, K.; Youngs, R.; Bozkurt, S.; Montaldo Falero, V.; Perman, R.; Tuttle M.: Central and Eastern United States Seismic Source Characterization for Nuclear Facilities. Technical Report of NUREG-2115, Washington D.C.: NRC, 1/2012
- [10] SIGMA – Seismic Ground Motion Assessment: <http://www.projet-sigma.com/> (Zugriff 11.12.2015)
- [11] EMME – Earthquake Model of the Middle East region: Hazard, Risk Assessment, Economics & Mitigation. <http://www.emmegem.org/> (Zugriff 11.12.2015)
- [12] Giardini, D.; Woessner, J.; Danciu, L.; Crowley, H.; Cotton, F.; Grünthal, G.; Pinho, R.; Valensise, G.: SHARE European Seismic Hazard Map for Peak Ground Acceleration, 10 % Exceedance Probabilities in 50 years. Erdbebengefahrenkarte (DOI: 10.2777/30345), Zürich: ETH Zürich, 2013, more information e.g. under http://www.insu.cnrs.fr/files/share_brochure_public.pdf (Zugriff 4.1.2016)
- [13] Rovithis, E. N.; Ptilakis, K. D.: Seismic assessment and retrofitting measures of a historic stone masonry bridge. *International Journal of Earthquakes and Structures* (in Druck)
- [14] Federal Highway Administration (Hrsg.): China Earthquake Reconnaissance Report: Performance of Transportation Structures During the May 12, 2008, M7.9 Wenchuan Earthquake, Observed Damage to Bridges. Report, Publication No. FHWA-HRT-11-029, 2/2011, <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11029/> (Zugriff 4.1.2016)
- [15] Kiremidjian, A. A.; Basöz, N.: Evaluation of Bridge Damage Data from Recent Earthquakes. *NCEER Bulletin* 11 (1997) 2, S. 1–7
- [16] Lee, G. C.; Qi, J. C.; Huang, C.: Development of a Database Framework for Modeling Damaged Bridges. Technical Report MCEER-13-0009, 16.6.2013, Buffalo: University at Buffalo, 16.6.2013,
- [17] Cook, W.: Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends. Diss., Utah State University Logan, 2014
- [18] Wenk, T.: Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Strassenbrücken. Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2005
- [19] Wei, X.; Wang, Q.; Wang, J.: Damage pattern and failure mechanisms of bridge pile foundation under earthquake. Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12.-17.10.2008 in Beijing (China), published on CD, 7 S.

- [20] Kazama, M.; Noda, T.: Damage Statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage). *Soils and Foundations* 52 (2011) 5, S. 780–792
- [21] Hisada, M.; Hayasaka, T.; Kobayashi, M.; Maruyama, K.; Iwanami, M.; Kano, M.; Yamada, K.: How can concrete technology contribute? Review of certain issues arising in the recovery from the Great East Japan Earthquake. Concrete Committee, Japan Society of Civil Engineers 2012, Annual Meeting, 7.9.2012 on Nagoya University (Japan), 5 S.
- [22] Schexnayder, C.; Alarcón, L.; Antillo, E.; Morales, B.; Lopez, M.: Observations on Bridge Performance during the Chilean Earthquake of 2010. *J. Constr. Eng. Manage* 140 (2014) 4, S. B4013001
- [23] Jacobs, L. D.; DesRoches, R.; Leon, R. T.: Large Scale Shake Table Test of a Port Container Crane under Strong Motion Excitation. In: Senapathi, S.; Casey, K.; Hoit, M. (Hrsg.): Proc. of the ASCE Structures Congress, 12.–15.5.2010 in Orlando (Florida, USA), American Society of Civil Engineers, S. 2692–2701
- [24] Münchner Rück: Edition Wissen: Hurrikane – stärker, häufiger, teurer – Assekuranz im Änderungsrisiko. München: Münchner Rück, 2006
- [25] Port Nola: http://portno.com/Port_Facts (Zugriff 11/2015)
- [26] Proske, D.; Kurmann, D.; Cervenka, J.: Seismische Tragfähigkeit eines Stahlbetongebäudes. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 8, S. 552–561
- [27] Kurmann, D.; Proske, D.; Cervenka, J.: Seismic Fragility of a reinforced concrete structure. *Independent Journal for Nuclear Engineering* 78 (2013) 2, S. 120–126
- [28] Lin, T.; Baker, J. W.: Introducing adaptive incremental dynamic analysis: A new tool for linking ground motion selection and structural response assessment. In: Ellingwood; Frangopol (Hrsg.): Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures & Infrastructures – Deodatis, London: Taylor & Francis Group, 2013, 8 S.
- [29] Ramanathan, K. N.: Next Generation Seismic Fragility Curves for California Bridges Incorporation the Evolution in Seismic Design Philosophy. Diss., Georgia Institute of Technology, 2012
- [30] Campbell, K. W.; Bozorgnia, Y.: Cumulative Absolute Velocity (CAV) and Seismic Intensity Based on the PEER-NGA Database. *Earthquake Spectrum* 28 (2012) 2, S. 457–485
- [31] Meskouris, K.; Hinzen, K. G.; Butenweg, Chr.; Mistler, M.: *Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen – Anwendung – Beispiele*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- [32] Renault, P.: *Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Brückenbauwerken*. Diss., RWTH Aachen, 2005
- [33] U.S. Geological Survey: <http://geohazards.usgs.gov/deaggint/2008/> (Zugriff 11/2015)
- [34] Baker, J. W.: Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection. *Journal of Structural Engineering* 137 (2011) 3, S. 322–331
- [35] OPENSHA: <http://www.opensha.org/apps> (Zugriff 11/2015)
- [36] Pacific Earthquake Engineering Research Center: http://peer.berkeley.edu/products/rep_nga_models.html (Zugriff 11/2015)
- [37] Baker Research Group, Stanford University: <http://web.stanford.edu/~bakerjw/research/epsilon.html> (Zugriff 11/2015)
- [38] Baker, J. W.; Cornell, C. A.: Vector-Valued Ground Motion Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Analysis. PEER Report No. 2006/08, University of California, Berkeley, 10/2006
- [39] Lin, T.; Harmsen, S.; Baker, J.; Luco, N.: Conditional Spectrum Computation Incorporating Multiple Causal Earthquakes and Ground Motion Prediction Models. *Bulletin of Seismological Society of America* 103 (2013) 2a, S. 1103–1116
- [40] Ortiz, O.; Hutt, C.; Galasso, C.; Ghazizadeh, S.: Impact of Uniform Hazard Spectrum versus Conditional Mean Spectrum on Structural Response. London: UCL, 2013
- [41] Liang, X.; Günay, S.; Mosalam, K. M.: Seismic Response of Bridges considering Different Ground Motion Selection Methods. In: Caner, A.; Gülkan, P.; Mahmoud, K. (Hrsg.): *Developments in International Bridge Engineering: Selected Papers from Istanbul Bridge Conference 2014*, Heidelberg: Springer, 2016, S. 147–154
- [42] Tehrani, P.; Mitchell, D.: Incremental dynamic analysis (IDA) applied to seismic risk assessment of bridges. In: Tesfamariam, S.; Goda, K. (Hrsg.): *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, Cambridge: Woodhead, 2013, S. 561–595
- [43] Proske, D.; Renault, Ph.; Kurmann, D.; Asfura, A.: Computation of the seismic CDF of a NPP using Conditional Spectra Approach. In: Patelli, E.; Kougioumtzoglou, I. (Hrsg.): Proc. of 13th International Probabilistic Workshop, 11/2015 in Liverpool (GB), Liverpool: Research Publishing, 2011, S. 42–51
- [44] Hashash, Y.; Abrahamson, N.; Olson, S.; Hague, S.; Kim, B.: Conditional Mean Spectrum in Site-Specific Seismic Hazard Evaluation for a Major River Crossing in the Central United States. *Earthquake Spectrum* 31 (2015) 1, S. 47–69

- [45] Hashash, Y.; Abrahamson, N.; Olson, S.: Mississippi River Bridge using multiple CMS (New I-70 Mississippi River Bridge). Proc. of COSMOS Annual Meeting, 9.11.2010 in San Francisco (USA), 23 S.
- [46] Therani, P.; Goda, K.; Mitchell, D.; Atkinson G.; Chouinard, L.: Seismic Response Prediction of Bridges using Incremental Dynamic Analysis with Subduction Zone and Crustal Ground Motion Records. In: FEMA/US Department of Homeland Security (Hrsg.): Proc. of 10th US National Conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering, 21.–25.7.2014 in Anchorage (Alaska, USA), 11 S.
- [47] Mahmoudi, S.; Chouinard, L.: Seismic Fragility Assessment of Highway Bridge. In: Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, 24.–28.9.2012 in Lissabon (Portugal), 8 S.
- [48] Chandramohan, R.; Baker, J.; Deierlein, G.: Influence of Ground Motion Duration on the Collapse Response of Bridge Structures. In: Proc. of 7th National Seismic Conference on Bridges & Highways, 20.–22.5.2013 in Oakland (California, USA), 12 S.
- [49] NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary. FEMA P-1050-1/2015 Edition, San Francisco (California)
- [50] ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Structural Engineering Institute of American Society of Civil Engineers (ASCE). Draft 2015, Reston (Virginia)
- [51] Habenberger, J.: Gefährdungskonsistente Erdbebenszenarien für das Gebiet von Deutschland. DACH-Mitteilungsblatt 81 (2006) Sept., S. S2–S8

Alle Grafiken wurden vom Autor erstellt, so nicht abweichend davon vermerkt.

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.

Im gedruckten Tagungsband stand hier eine Anzeige. Sie wurde für die Online-Fassung entfernt.