

Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands – Version 2016 – für DIN EN 1998-1/NA

Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands – Version 2016 – für DIN EN 1998-1/NA

Die grundlegenden seismischen Lastannahmen für den neuen Nationalen Anhang DIN EN 1998-1/NA resultieren aus der vom Deutschen Institut für Bautechnik geförderten Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands. Sie gründet sich auf eine umfassende Einbeziehung aller zu berücksichtigenden Unsicherheiten in Eingangsmodellen und -parametern und die Bereitstellung eines rationalen transparenten Rahmens zu deren Umsetzung. Das Vorgehen ermöglicht die solide und robuste Berechnung sowohl von Mittelwerten als auch jeglicher Quantile von geforderten Parametrisierungen seismischer Lastannahmen. Wesentliche Verbesserungen des Gefährdungsmodells beruhen auf aktualisierten und erweiterten Datenbeständen, umfassenden Unsicherheitsbereichen von Modellen, stabilen Methoden und ausgewählten Bodenbewegungsmodellen jüngster Generation. Die berechneten Gefährdungsparameter entsprechen den nutzerbezogenen Anforderungen und wurden für Felsuntergrund ($v_{S30} = 800$ m/s) und mittlere Wiederholungsperioden von 475, 975 und 2475 a berechnet und in Form von gefährdungskonsistenten Antwortspektren, seismischen Gefährdungskarten für spektrale Antwortbeschleunigungen und für makroseismische Intensitäten standardmäßig als Mittelwerte, Mediane und 84%-Quantile bereitgestellt. Die resultierenden Unsicherheiten der Gefährdungsparameter werden analysiert und die Stabilität der Gefährdungskarten bezüglich früherer Versionen sowie ihre Kompatibilität zu Gefährdungseinschätzungen von Nachbarstaaten diskutiert.

Keywords Erdbebengefährdungseinschätzung; Deutschland; DIN EN 1998-1/NA; Lastannahmen, seismische; Modell- und Parameterunsicherheiten; Ergebnisquantile

1 Veranlassung für die Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands

Die Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands erfolgte im Rahmen eines Forschungsvertrags zwischen dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) und dem Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ. Das Vorhaben kam mit maßgeblicher Unterstützung des DIN-Normenausschusses Bauwesen (NABau) NA 005-01-06 AA „Erdbeben, Sonderfragen (SpA CEN/TC250/SC 8)“ zustande. Das Ziel der Neueinschätzung bestand darin, ingenieurseismologische Last-

Reappraisal of the seismic hazard assessment of Germany – version 2016 – for DIN EN 1998-1/NA

The basic seismic load parameters for the upcoming national design regulation for DIN EN 1998-1/NA result from the reassessment of the seismic hazard supported by the German Institution for Civil Engineering (DIBt). This study is based on a comprehensive involvement of accessible uncertainties in models and parameters. It includes the provision of a rational framework for integrating epistemic uncertainties and aleatory variabilities in a comprehensive way and incorporates significant improvements. It is based on updated and extended databases, robust methods to evolve sets of models representing epistemic uncertainties and a selection of latest ground-motion prediction equations.

The output specifications were designed according to the user oriented needs. Seismic load parameters are calculated for rock conditions, mean return periods of 475, 975 and 2475 yrs and delivered as uniform hazard spectra, seismic hazard maps for peak ground acceleration, spectral response accelerations and macroseismic intensities. Results are supplied as mean, median and 84th percentile. Resulting uncertainties of calculated seismic load parameters are analyzed. The stability of the hazard maps with respect to previous versions and cross-border comparisons are emphasized.

Keywords probabilistic seismic hazard assessment; Germany; DIN EN 1998-1/NA; seismic loads; uncertainties in models and parameters; resulting quantiles

annahmen für einen Untergrund, charakterisiert durch die Scherwellengeschwindigkeit $v_{S30} = 800$ m/s, unter umfassender Berücksichtigung von Unsicherheiten in Modellen und Parametern zu berechnen und in Form gefährdungskonsistenter horizontaler Antwortspektren (Uniform Hazard Spectra UHS) mit 5% viskoser Dämpfung für verschiedene Gefährdungsniveaus und beliebige Punkte innerhalb Deutschlands über ein Internetportal interaktiv bereitzustellen. Im Mittelpunkt standen die Gefährdungsniveaus von 10%, 5% und 2% Eintreffens- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeit von Bodenbewegungsparametern innerhalb von 50 Jahren (a) angenommener Standzeiten, denen mittlere Wiederholungsperioden (return period RP) von 475, 975 und 2475 a entsprechen.

Zwei Betreuergruppen begleiteten die Arbeiten. Eine Gruppe wurde direkt vom Auftraggeber, dem DIBt, einge-

*) Corresponding author: ggrue@gfz-potsdam.de
Submitted for review: 06 November 2017
Revised: 19 January 2018
Accepted for publication: 16 February 2018

setzt, die zweite bestand aus den Mitgliedern der AG Performance-Based Design des NABau. Darüber hinaus wurde der Fortschritt der Arbeiten regelmäßig im Normenausschuss vorgestellt. Dank dieser Rückkopplungen konnten wichtige Anregungen aus den genannten Gruppen in die Arbeiten einfließen.

Die Bereitstellung moderner, auf probabilistischer Grundlage berechneter, belastbarer ingenieurseismologischer Lastannahmen ist überfällig für eine Neufassung des Nationalen Anhangs (NA) zum Eurocode 8 (DIN EN 1998-1) [1]. Die derzeit gültige Erdbebenzonenkarte des NA zum EC 8 wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens, welches ebenso seitens des DIBt teilfinanziert wurde, im Zeitraum von 1993–1995 erarbeitet [2]. Danach erfolgte die Erweiterung der intensitätsbasierten Gefährdungskarte für RP = 475 a auf die D-A-CH-Staaten [3].

Die Gründe für die Notwendigkeit einer Aktualisierung sind vielfältig – neben der Nutzung physikalischer Bodenbewegungsgrößen zur Parametrisierung der Ergebnisse probabilistischer seismischer Hazard-Abschätzungen (PSHA) sind es u. a. die Seismizitätsdaten selbst. Diese konnten in den letzten ca. 2 Jahrzehnten seit Beendigung der Arbeiten zur Gefährdungskarte von 1995 grundlegend überarbeitet werden. In einzelnen Erdbebenherdzone Deutschlands haben nach den nunmehr vorliegenden Erkenntnissen mehr als 60% der Schadenbeben im deutschen Erdbebenkatalog überhaupt nicht stattgefunden [4–6]. Solche drastischen Änderungen in der Datenbasis schlagen sich natürlich in den Erdbebengefährdungseinschätzungen nieder. Des Weiteren konnten grundlegende Harmonisierungen in der Stärkebemessung historischer und instrumenteller Seismizitätsdaten in Momentmagnituden M_w erreicht werden [6–8]. Auf die heute bestehenden Möglichkeiten, Unsicherheiten in den Eingangsgrößen und in den der Berechnung zugrunde liegenden Modellen umfassend in PSHA einfließen zu lassen [9–11], wurde bereits hingewiesen. Schließlich liegt seit 2014 eine grundlegend verbesserte Generation von Prognosemodellen der Starkbodenbewegungen (*Ground Motion Prediction Equations GMPE*) vor, welche ebenso maßgeblich zu realistischeren Abschätzungen der Erdbebengefährdung beitragen.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Kurzfassung der ausführlichen Veröffentlichung zum Thema [12] dar. Parallel zum hier skizzierten Erdbebenmodell D2016 aus genanntem Forschungsvorhaben wurden am Erdbebenzentrum der Bauhaus-Universität Weimar spektrale Lastannahmen für die übrigen Untergrundtypen des NA, d. h. für nicht felsigen Untergrund, erarbeitet [13].

2 Seismizitätsdaten

Bekanntermaßen können Erdbebengefährdungseinschätzungen nur so gut sein, wie die Seismizität des Untersuchungsgebiets bekannt ist, mit möglichst vollständigen und weit in die Historie zurückreichenden, harmonisier-

ten Daten zu den natürlichen tektonischen Erdbeben. Es ist ein Gebiet in die Analyse einzubeziehen, das sämtliche Quellregionen überdeckt, die prinzipielle makroseismische Auswirkungen auf das Zielgebiet, die Bundesrepublik Deutschland, haben. Die Datenbasis bildeten die online verfügbaren, in Momentmagnituden M_w harmonisierten Erdbebenkataloge CENEC [6] bzw. deren räumliche und zeitliche Erweiterung EMEC [8], der für das Vorhaben mit Daten von 1000 AD bis zum Jahr 2014 weitergeführt wurde. Bezüglich der Beben in Deutschland sind die monatlichen Bulletins der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [14] eine wesentliche Quelle bezüglich der neueren Daten. Bild 1a zeigt die natürlichen tektonischen Erdbeben im Untersuchungsgebiet. Es bezieht seismische Herdzone großräumig um das Zielgebiet ein. In Bild 1b ist die natürliche tektonische Seismizität Deutschlands samt Randgebieten im Detail dargestellt (weiße Kreise in der Abbildung).

Zusätzlich zeigt Bild 1b neben der natürlichen tektonischen Bebenaktivität auch die Seismizität infolge induzierter seismischer Ereignisse, die in räumlich gut definierten Teilen des Untersuchungsgebiets beobachtet wird. Diese seismischen Ereignisse werden durch menschliche Tätigkeit induziert, d. h. im Zusammenhang mit Kali- und Salzbergbau, dem Kohlebergbau, der Förderung von Erdöl und Erdgas, dem Erzbergbau sowie der Gewinnung tiefer geothermischer Energie (farblich nach Typen unterschieden in Bild 1b). Des Weiteren werden induzierte seismische Ereignisse beobachtet in Verbindung mit Wasserstandsänderungen von Stauseen sowie getriggerten Erdbeben infolge Starkregens in Karstgebieten. In einem Übersichtsartikel geht GRÜNTHAL [15] auf die jeweils mind. zehn stärksten Ereignisse dieser Seismizitätstypen ein und stellt für die fünf erstgenannten Typen die detaillierte zeitliche Entwicklung des Auftretens ihrer Magnituden sowie die zugehörigen Magnitudenhäufigkeitsverteilungen dar.

Die Intensität der induzierten Seismizität setzte, wie in [15] gezeigt, mit dem Beginn signifikanter Eingriffe des Menschen im Untergrund ein, erreichte in Abhängigkeit vom Ereignistyp jeweilige Maxima und setzt sich für einzelne Ereignistypen mit abnehmender Intensität fort, da es durch verbesserte Technologien gelingt, die Magnituden solcher induzierter Ereignisse zu begrenzen. Oder aber, bestimmte Abbauregionen wurden geschlossen, was zur dramatischen Abnahme von Anzahl und Magnituden induzierter seismischer Ereignisse führt [15]. Diese induzierten seismischen Ereignisse sind somit signifikant zeitabhängig. Sie sind nicht Gegenstand der hier vorgestellten zeitunabhängigen PSHA infolge natürlicher, tektonischer Erdbeben; ausgenommen sind die durch Starkregen in Karstgebieten getriggerten Beben, da auch sie natürlichen Ursprungs sind.

Während die Karten aus Bild 1 einen qualitativen Eindruck von der räumlichen Verteilung der Seismizität vermitteln, lässt sich anhand der beobachteten Erdbeben innerhalb von Magnitudenklassen qualitativ die jährliche

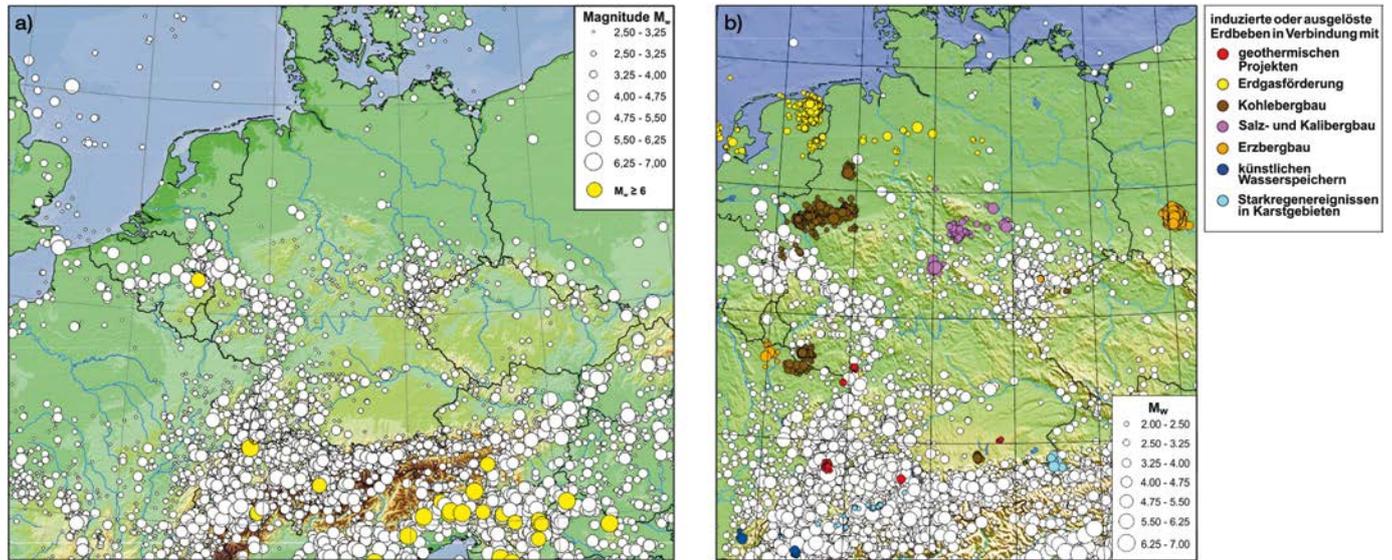


Bild 1 Katalogisierte natürliche tektonische Erdbeben im Untersuchungsgebiet seit 1000 AD mit a) hervorgehobenen Erdbeben für Momentmagnituden $M_w \geq 6,0$ sowie mit b) zusätzlicher Darstellung induzierter seismischer Ereignisse (farbig unterlegt) nach [15] innerhalb Deutschlands samt Umgebung; a) und b) nach erweiterter und bis 2014 aktualisierter Datenbasis von EMEC [8], aber zur besseren Lesbarkeit ohne Vor- und Nachbeben
 Catalogued natural tectonic earthquakes in the study area since 1000 AD with a) highlighted earthquakes for moment magnitudes $M_w \geq 6,0$ and with b) additionally depicted induced seismic events (colour-contrasted) after [15] within Germany and surroundings; a) and b) after the extended and up to 2014 updated database of EMEC [8], however for better readability without foreshocks and aftershocks

Rate ν ihres Auftretens bestimmen. Der Reziprokwert von ν ergibt deren jährliche mittlere RP. Der Logarithmus der jährlichen Rate als Funktion der Magnitude M besitzt nach der Gutenberg-Richter-Relation den funktionalen Zusammenhang $\log \nu (M) = a - bM$. Der Parameter b nimmt typischerweise Werte nahe eins an. Bild 2 zeigt die kumulative Magnitudenhäufigkeitsrelation für das Gebiet Deutschlands inklusive eines Rands von ca. 10 km jenseits der Grenze für die beobachteten Hauptstöße; d. h., Vor- und Nachbeben von Hauptbeben sind im betrachteten Datensatz durch ein Declusterungsverfahren eliminiert [9, 12]. Dieser Randsaum jenseits der Grenze ist, wie die Bilder 1a, 1b zeigen, in weiten Bereichen durch eine deutliche Seismizität gekennzeichnet, die unmittelbare Auswirkungen innerhalb Deutschlands hervorrufen kann. Aus den Beobachtungsdaten lassen sich mittels Maximum-Likelihood-Schätzung die in Bild 2 genannten Parameter a und b bestimmen sowie die RP charakteristischer Beben, wie eine RP für $M_w = 3,5$ von einem Jahr (a), $RP(4,5) = 10$ a, $RP(5,5) = 100$ a.

3 Das Erdbebenmodell zur Neuberechnung der Erdbebengefährdung

Besonderes Augenmerk wurde in vorliegender Gefährdungsanalyse auf eine umfassende Einbeziehung aller zu berücksichtigenden Unsicherheiten in Eingangsmodellen und -parametern gelegt. Dieses Vorgehen ermöglicht die solide und robuste Berechnung sowohl von Mittelwerten als auch jeglicher Quantile geforderter Parametrisierungen seismischer Lastannahmen. Entscheidend für die korrekte Berücksichtigung von Unsicherheiten ist die strikte Unterscheidung von epistemischen Unsicherheiten, die im logischen Baum (Logic Tree LT) behandelt

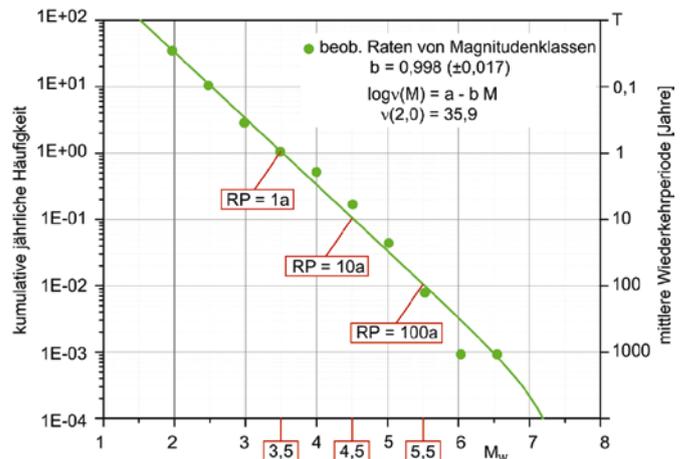


Bild 2 Kumulative Magnitudenhäufigkeitsverteilung der beobachteten jährlichen Erdbebenraten in Deutschland samt einem Randsaum von ca. 10 km; die Parameter der Magnitudenhäufigkeitsverteilung sowie die mittleren Wiederholungsperioden RP einzelner Bebenmagnituden werden im Bild benannt
 Cumulative frequency-magnitude relation of the observed yearly rates of earthquakes within Germany plus a margin of about 10 km; the parameters of the frequency-magnitude relation as well as the mean return periods RP of earthquake magnitudes are given in the figure

werden, und den aleatorischen Variabilitäten, über die integriert wird.

3.1 Logischer Baum zur Berücksichtigung epistemischer Unsicherheiten

Die Behandlung der epistemischen Unsicherheiten von Modellen und Parametern im LT wird der Übersichtlichkeit halber in drei Teilen beschrieben; d. h. bildlich im

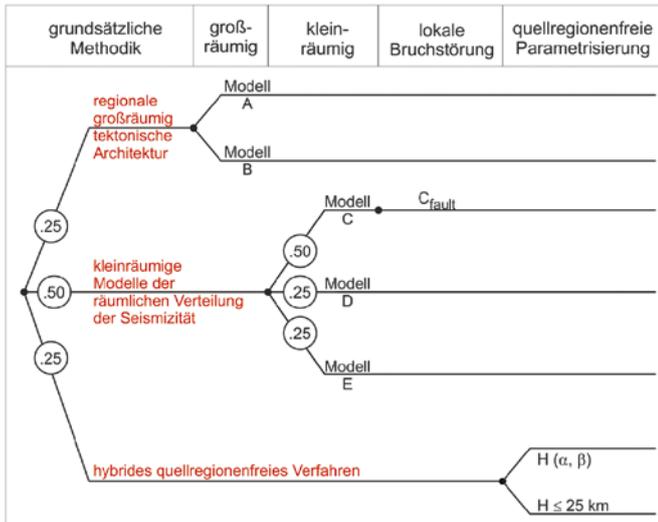


Bild 3 Logischer Baum (LT) zur Modellierung der epistemischen Unsicherheiten seismischer Quellen (unterster Teil des LT)
 Logic tree (LT) for the modelling of the epistemic uncertainties of seismic source zones (lowermost part of the LT)

Sinne eines Baums mit unteren, mittleren und oberen Teilen von Verzweigungsebenen.

3.1.1 Unsicherheitsmodellierung seismischer Quellen

Zur Modellierung der epistemischen Unsicherheiten seismischer Quellen wird in der ersten Verzweigungsebene des LT zwischen drei prinzipiell unterschiedlichen Ansätzen unterschieden (Bild 3). Das ist zum Ersten eine großräumige Modellierung seismischer Flächenquellen, die lediglich den prinzipiellen tektonischen Strukturbaue widerspiegeln. Zweitens sind es kleinräumige Quellen, die neben tektonischen Strukturen die räumliche Verteilung der Seismizität abbilden. Zum Dritten sind es Versionen

eines quellregionenfreien Ansatzes mit unterschiedlichen Kernel-Funktionen. Die Wichtungen dieser und aller weiteren Verzweigungsebenen sind den Bildern 3, 11, 13 zum LT zu entnehmen. Zu allen Wichtungen konnte grundsätzlich Konsens erreicht werden bzw. folgen diese aus mathematischen Methoden (s. Abschn. 3.1.2).

Die zweite Verzweigung beschreibt die Nutzung von zwei großräumigen Modellen (A, B), die dritte die Heranziehung von drei unabhängig gewonnenen kleinräumigen Modellen (C, D, E), wobei im Modell C für den Niederrhein-Graben (*Lower Rhine Graben LRG*) das tektonische 3-D-Störungsmuster nach VANNESTE u. a. [16] verwendet wird. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt sowie das gesamte Modell A, Bild 5 einen Ausschnitt des Modells C, Bild 6 die Überlagerung der Modelle C, D, E, womit räumliche Variationen der Unsicherheiten in der Modellbildung deutlich werden, sowie Bild 7 das tektonische Störungsmodell für den LRG [16].

3.1.2 Unsicherheitsmodellierung der Parameter jeder seismischen Quelle

Zu jeder der insgesamt 394 seismischen Quellen in den Modellen A–E sind die Seismizitätsraten für jedes Magnitudenintervall mit ihren Unsicherheiten zu bestimmen. Die klassische Gutenberg-Richter-Relation, als Standardmodell der Magnitudenhäufigkeitsverteilung, beschreibt in ihrer kumulativen Form

$$v(M) = \int_M^{M_{\max}} 10^{a-bm} dm \quad (1)$$

die jährliche Häufigkeitsrate v aller Beben im Magnitudenintervall von M bis zu einer Maximalmagnitude M_{\max} .

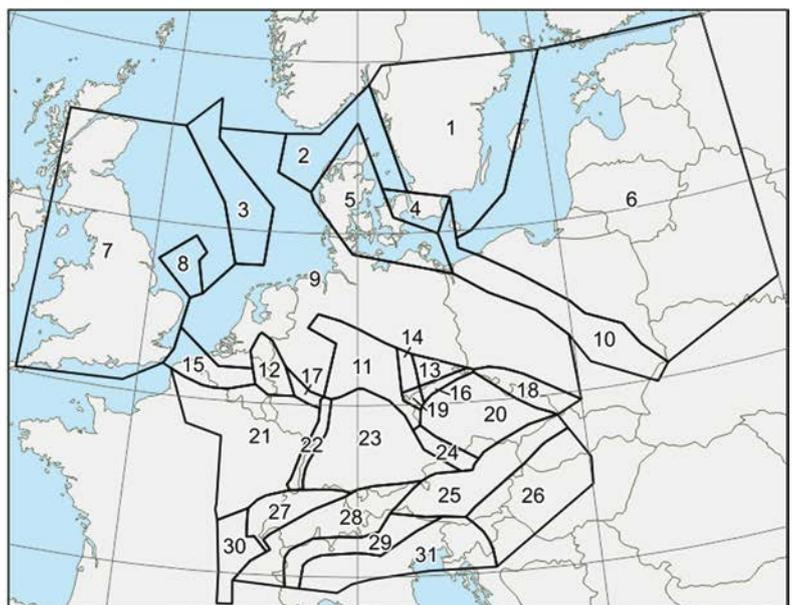
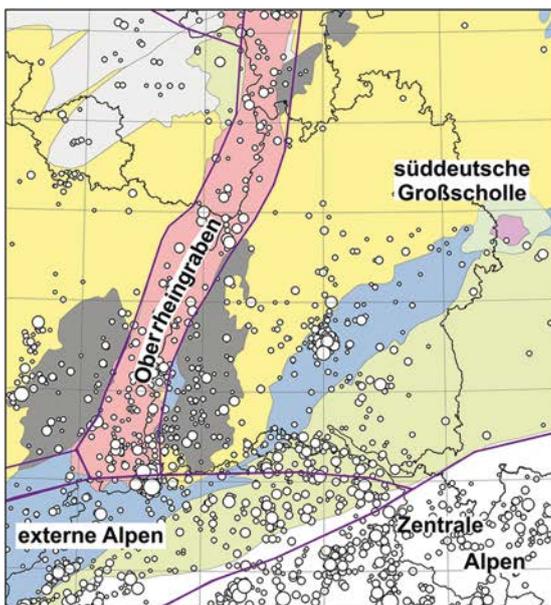


Bild 4 Das großräumige seismische Quellenmodell A; Ausschnitt mit dem SW-Teil von Deutschland als Zielgebiet (links), Gesamtmodell (rechts)
 The large scale seismic source zone model A; excerpt with the SW part of Germany as target area (left), entire model (right)

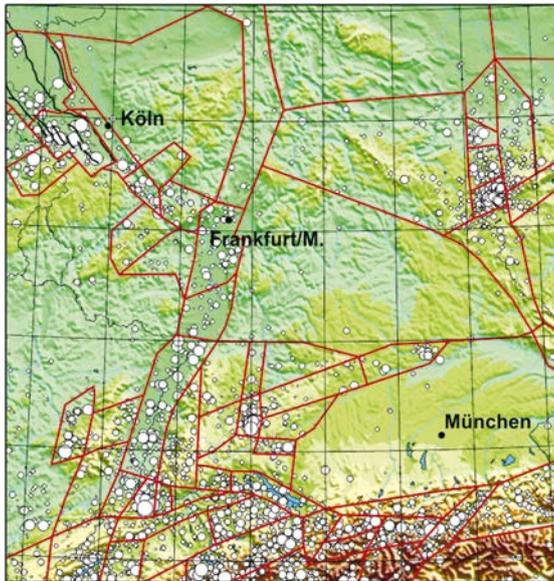


Bild 5 Ausschnitt des Quellenmodells C
Excerpt of the seismic source zone model C

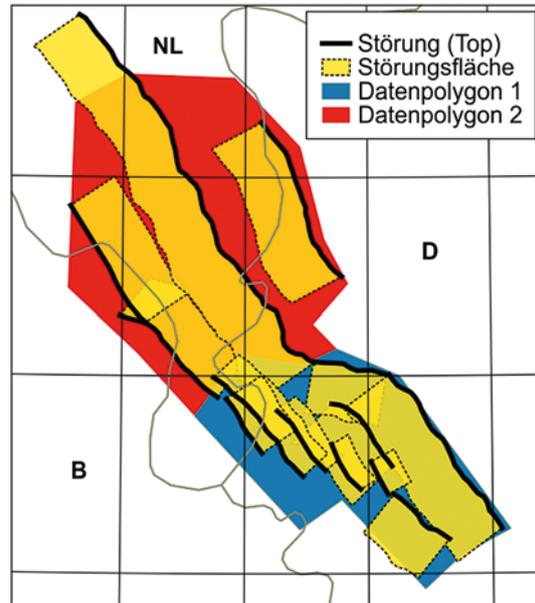


Bild 7 Aufsicht auf das tektonische 3-D-Störungsmodell für den Niederrhein-Graben nach [16]
Plan view of the tectonic 3D fault model for the Lower Rhine Graben after [16]

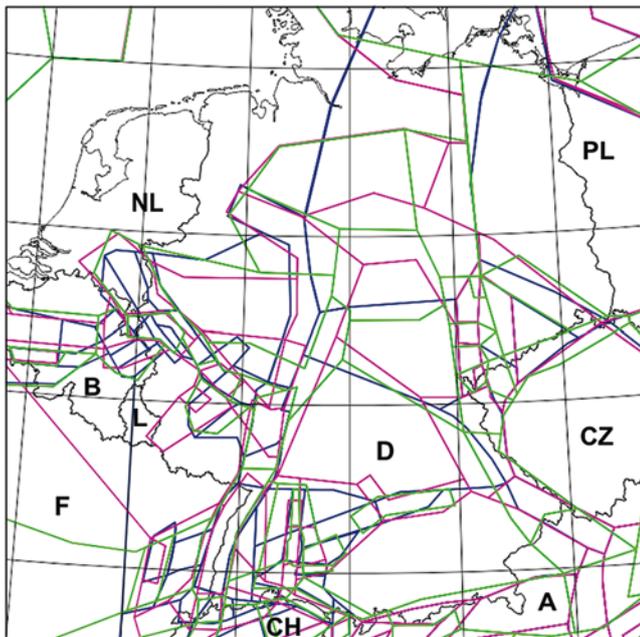


Bild 6 Überlagerung der Modelle C, D, E, die die räumliche Variation der Unsicherheiten in der Modellbildung verdeutlicht; Modell C: blau, D: grün, E: rot
Overlay of models C, D, E, which illustrates the spatial variation of uncertainties in the modelling; model C: blue, D: green, E: red

Unter Berücksichtigung einer Minimalmagnitude M_{\min} gilt

$$v(M) = v_0 \int_M^{M_{\max}} \frac{\ln(10) \cdot b \cdot 10^{-bm}}{10^{-bM_{\min}} - 10^{-bM_{\max}}} dm \quad (2)$$

mit $v_0 = v(M_{\min})$ als kumulative Rate für $M = M_{\min}$. Der Integrand beschreibt die Dichtefunktion einer beidseitig abgeschnittenen exponentiellen Wahrscheinlichkeitsfunktion mit dem Parameter b .

Die Schätzung der Gutenberg-Richter-Parameter a und b erfolgt nach dem etablierten Verfahren von WEICHERT [17], modifiziert durch JOHNSTON [18]. Neu in diesem Projekt ist die statistisch korrekte Verwendung der Kovarianzmatrix $C(a,b)$ von a und b

$$C(a,b) = \begin{pmatrix} C_{aa} & C_{ba} \\ C_{ab} & C_{bb} \end{pmatrix}, C_{ba} = C_{ab} \quad (3)$$

zur Charakterisierung der Unsicherheit der Magnitudenhäufigkeitsverteilung $v(M)$ [11]. Die Wahrscheinlichkeit von $a - bM$ ist, bei fixierter Magnitude M , normalverteilt mit der Varianz $\sigma(M)^2 = C_{aa} - 2C_{ab}M + C_{bb}M^2$. Die Wahrscheinlichkeitsdichte von $v(M)$ kann deshalb mit k Stützstellen z_k und Gewichten w_k so approximiert werden, dass die ersten $2k - 1$ Momente der Diskretisierung von $a - bM$ exakt mit den Momenten von $a - bM$ übereinstimmen [19], womit erstmals eine statistisch quantifizierbare Güte für die Berücksichtigung der Unsicherheiten von Magnitudenhäufigkeitsverteilungen in PSHA verfügbar ist.

$$v_i(M) = \int_M^{M_{\max}} 10^{a-bm+\sigma(m)z_i} dm \quad i = 1 \dots k \quad (4)$$

Für das Vorhaben ist $k = 4$ gewählt worden. Die entsprechenden Stützstellen und Gewichte werden in Tab. 1 angegeben. Die Berechnung von $v(M)$ wird dabei für jeweils konkrete M_{\max} vorgenommen. Daher wird zunächst die Bestimmung dieses Parameters kurz umrissen.

M_{\max} ist eine Größe, die messtechnisch nicht zugänglich und damit nur unscharf bekannt ist. Verwendet wird hier, wie standardmäßig in den PSHA seit GRÜNTAL &

Tab. 1 Optimale Stützstellen und Gewichte für $k = 4$
Optimal sampling point positions and weights for $k = 4$

Stützstellen z_k	$-\sqrt{3+\sqrt{6}}$	$-\sqrt{3-\sqrt{6}}$	$\sqrt{3-\sqrt{6}}$	$\sqrt{3+\sqrt{6}}$
Gewichte w_k	$\frac{3-\sqrt{6}}{12}$	$\frac{3+\sqrt{6}}{12}$	$\frac{3+\sqrt{6}}{12}$	$\frac{3-\sqrt{6}}{12}$

WAHLSTRÖM [20], der Bayessche Ansatz unter Nutzung des ergodischen Prinzips nach dem EPRI-Report von COPPERSMITH [21], CORNELL [22] und JOHNSTON [18], welcher ursprünglich für Gebiete stabiler kontinentaler Erdkruste entwickelt wurde. Da bereits oft von den Autoren beschrieben, fassen sie sich kurz. Im Verfahren wird eine *a priori* Verteilung von M_{max} (abhängig vom Krustentyp) multipliziert mit einer u. a. *b*-wertabhängigen Likelihood-Funktion für die jeweilige Quellregion, hier die entsprechende Superzone für die Ableitung der M_{max} (Bild 8), woraus die zugehörige *a posteriori* Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF) folgt. Auf der Abszisse startet die Likelihood-Funktion abrupt mit einer Sprungfunktion bei der max. beobachteten Magnitude der Superzone unter Einbeziehung des jeweils größten paläoseismologisch bekannten Bebens und einem min. M_w von 5,5. Die PDF werden zudem in ihrem oberen Magnitudenbereich beschnitten – hier unter Nutzung eines Inkrements oberhalb des max. historisch beobachteten Bebens des jeweiligen Krustentyps. Dieses Inkrement beträgt 0,7 Magnitudeneinheiten für die internen Alpen sowie die südlich angrenzende Po-Ebene, 0,8 für die externen, zentralen und östlichen Alpen und 1,3 für alle anderen Gebiete, d. h. insbesondere für die Gebiete nördlich der Alpen. Die

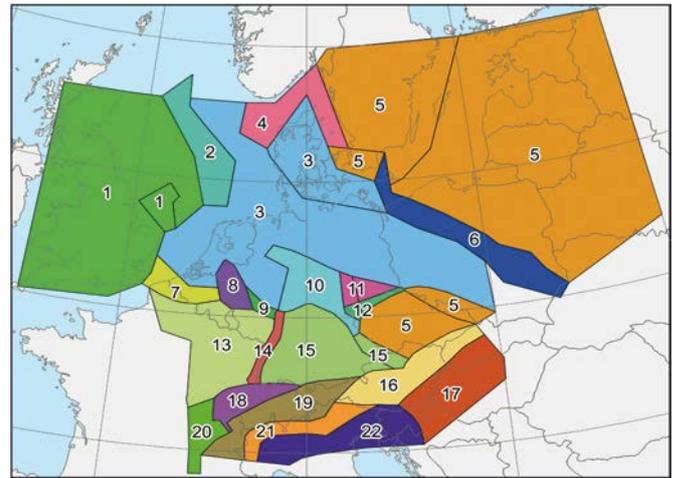


Bild 8 Die 22 Superzonen, für die jeweils einheitliche M_{max} -Verteilungen berechnet wurden, hier angepasst an das Quellenmodell A
The 22 superzones, within which uniform distributions of M_{max} were calculated; here fitted to the source model A

so erhaltene, mehr oder weniger breite PDF wird schließlich mittels eines Verfahrens nach [19] in Form von fünf gleich gewichteten Werten M_{max} diskretisiert. Bild 9 zeigt beispielhaft die dimensionslosen PDF mit Diskretisierungen für vier der insgesamt 22 M_{max} -Superzonen (Bild 8).

Die diskretisierten Verteilungen der Seismizitätsraten können somit für jeden der diskretisierten $M_{max,i}$ -Werte berechnet werden. Bild 10 zeigt die 20 Verteilungen für die vier Raten-Modelle und die fünf $M_{max,i}$ -Werte der seismische Quelle „Thüringen/Hessische Senke“ vom Quel-

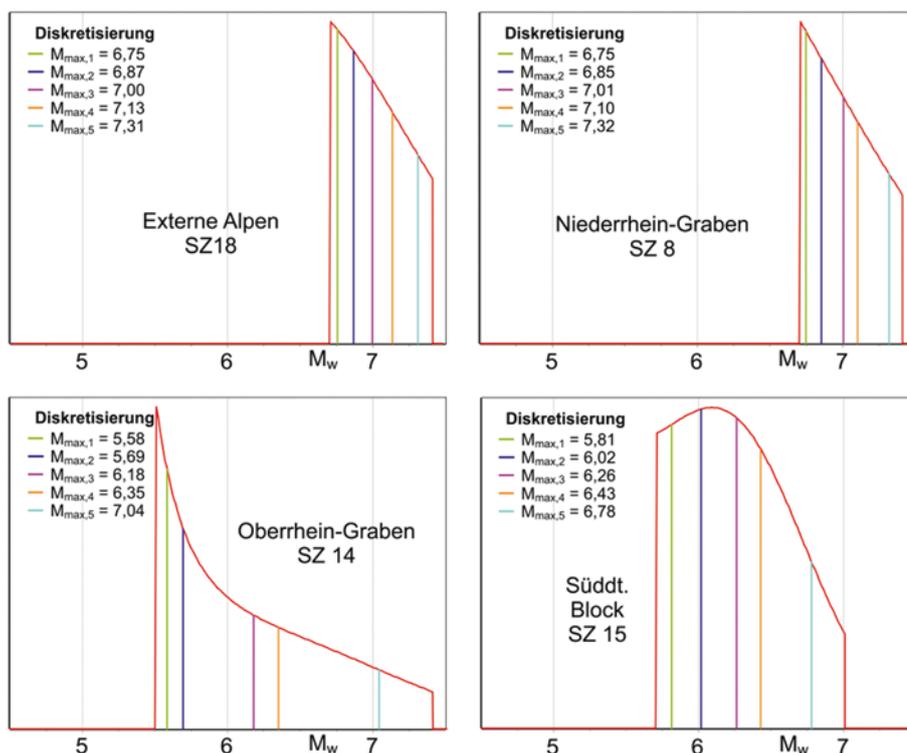


Bild 9 Beispiele von M_{max} -Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDF) für vier M_{max} -Superzonen (SZ), diskretisiert durch fünf gleich gewichtete Werte $M_{max,i}$
Examples of M_{max} probability density functions (PDF) for four M_{max} superzones (SZ), discretized in five equally weighted values of $M_{max,i}$

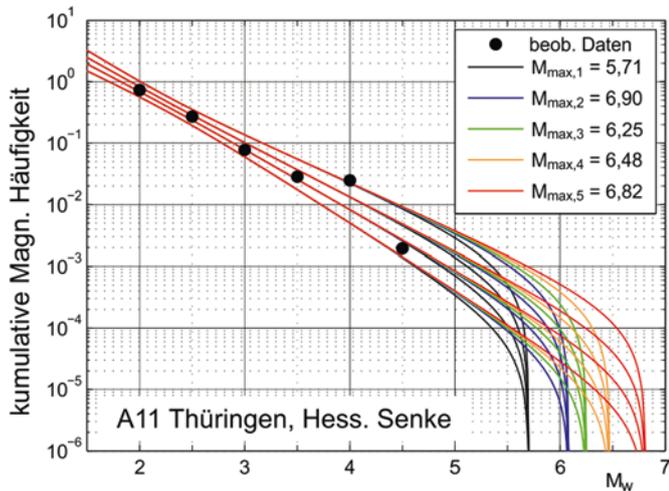


Bild 10 Die vier diskretisierten Verteilungen der Seismizitätsraten für die fünf diskretisierten $M_{max,i}$ -Werte am Beispiel der seismischen Quelle „Thüringen/Hessische Senke“ (Modell A)
The four discretised distributions of seismicity rates for the five discretised $M_{max,i}$ values according to the seismic source “Thüringen/Hessische Senke” (model A)

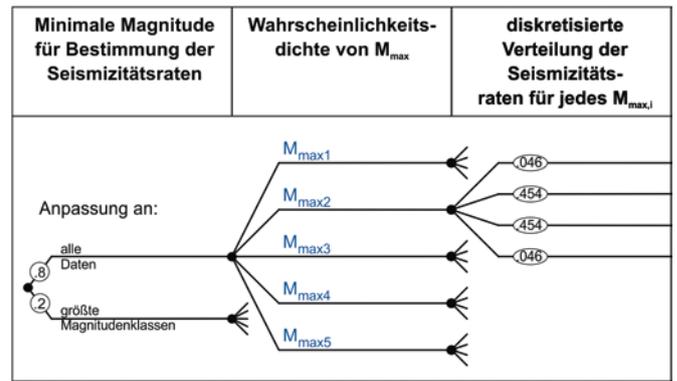


Bild 11 Fortsetzung des LT mit der Unsicherheitsmodellierung der Parameter jeder seismischen Quelle
Continuation of the LT with uncertainty modelling of the parameters of each seismic source

lenmodell A. Den zugehörigen Teil des LT, in dem die Unsicherheitsmodellierung der Parameter jeder seismischen Quelle formalisiert dargestellt ist, zeigt Bild 11. Darin wird in der ersten Verzweigungsebene unterschieden zwischen kleiner und größerer Magnitude, bei der die Anpassung an die beobachteten Raten pro Quelle erfolgt. In ca. 35% der Quellen ist diese Unterscheidung möglich. In Bild 12 sind am Beispiel der Quelle des Oberrhein-Grabens vom Modell A beide Varianten der Anpassung dargestellt.

3.1.3 Modellierung epistemischer Unsicherheiten von Starkbodenbewegungsmodellen

Die Auswahl geeigneter GMPE ist essenziell für realistische PSHA. Die Autoren nutzen GMPE, die auf drei aktuellen und unabhängigen Strong-Ground-Motion-Datenbanken beruhen, (1) den RESORCE-Datensatz

mit Aufzeichnungen aus Europa und dem Nahen und Mittleren Osten, (2) NGA2 mit dem Schwerpunkt kalifornische Daten und (3) Daten hauptsächlich anhand von krustalen japanischen Beben (s. zugehöriger dritter Teil des LT in Bild 13). Die ausgewählten GMPE zu (1) sind AKKAR u. a. [23], BINDI u. a. [24], DERRAS u. a. [25], zu (2) BINDI u. a. [26] und zu (3) CAUZZI u. a. [27]. Bezüglich der detaillierten Begründung dieser Auswahl sei auf [12] verwiesen. In der letzten Verzweigungsebene wird die Unsicherheit im Spannungsabfall künftiger Beben modelliert. Sämtliche Wichtungen sind dem LT in Bild 13 zu entnehmen. Insgesamt umfasst der LT somit 4040 Endzweige.

3.2 Berücksichtigung aleatorischer Variabilitäten im Gefährdungsintegral

Anhand aleatorischer Variabilitäten von Parametern, dargestellt in Verteilungsfunktionen, wird, bezogen auf jede einzelne Quellzone und jeden der Zielpunkte, die bedingte Wahrscheinlichkeit P berechnet, mit der die Zufallsgröße A einen gegebenen Wert a in Abhängigkeit von den genannten Parametern erreicht oder übersteigt.

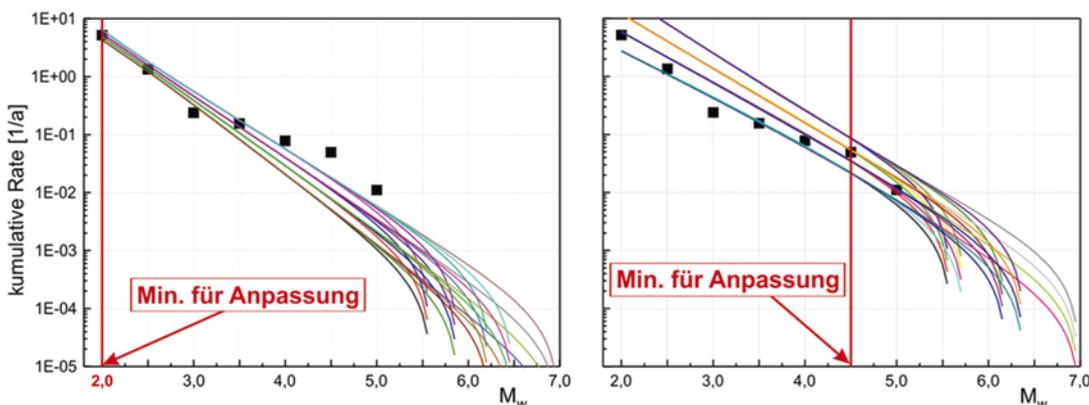


Bild 12 Unterscheidung zwischen kleiner und größerer min. Magnitude zur Anpassung an beobachtete Seismizitätsraten am Beispiel der Quelle Oberrhein-Graben (Modell A) mit beträchtlichen Differenzen in der Unsicherheit der Anpassung
Differentiation between smaller and larger minimum magnitude for fitting to observed seismicity rates for the example of the seismic source Upper Rhine Graben (model A) with considerable differences in the uncertainties in the fit

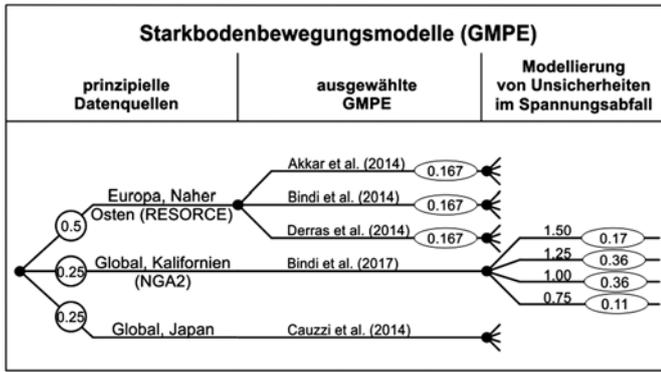


Bild 13 Dritter und oberster Teil des LT zur Modellierung epistemischer Unsicherheiten von Starkbodenbewegungsmodellen
Third and uppermost part of the LT for the modelling of epistemic uncertainties of strong ground motion models

$$P[A \geq a] = \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} \int_0^{r_{\max}} \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_{\epsilon_{\min}}^{\epsilon_{\max}} \int_{TR} P[A \geq a | m, r, h, \epsilon, tr] f_{TR}(tr) f_{\epsilon}(\epsilon) f_M(m) f_R(r|h) f_H(h) dF_{TR}(tr) d\epsilon dm dr dh \quad (5)$$

Im Einzelnen sind dies die Verteilung über die Herdtiefen h , Entfernungen r , Momentmagnituden m , die aleatorische Unsicherheit der GMPE (mit ϵ als Vielfachem der Standardabweichung, hier $\pm 3\epsilon$) und schließlich die Verteilung über die Komponenten des tektonischen Regimes tr . Die Verteilungen für h und tr werden jeweils für entsprechende Superzonen eines Modells bestimmt; h aus den Beobachtungen der Beben mit $M_w \geq 4,0$ und tr aus dem Verhältnis zu erwartender Beben im Seiten-, Ab- oder Aufschiebungsmodus. Das Integral wird gelöst für 6226 Gitterpunkte im Zielgebiet und dessen Randbereich im Raster von $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, die 19 Spektralwerte der UHS plus der Intensitätsrechnung, für 14 gegebene Beschleunigungswerte, jede der 394 Quellregionen und jeden der 4040 Endzweige vom LT. Aus der Verteilung der 4040 Ergebnisse von jedem der Endzweige des LT lassen sich sämtliche Quantile berechnen sowie das arithmetische Mittel aus den 4040 Werten, kurz der Mittelwert.

4 Resultate der seismischen Gefährdungsberechnung

Ein prinzipielles Ergebnis der PSHA ist die Berechnung der UHS für jeden Gitterpunkt. Zur Generierung von Erdbebengefährdungskarten und der möglichst punktgenauen Angabe der Werte über das interaktive Internetportal (http://gfz-potsdam.de/EqHaz_D2016) werden zusätzliche Resultate mittels zweidimensionaler Interpolation für ein Raster von $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ gewonnen. Bild 14 zeigt entsprechende UHS am Beispiel von Aachen für die drei eingangs genannten Gefährdungsniveaus, denen die mittleren Wiederholungsperioden $RP = 475$ a, 975 a und 2475 a entsprechen, für die Quantile von 16%, 50% (Median) und 84% sowie die Mittelwerte.

Der im Rahmen des Projekts zwischen den Partnern vereinbarte Untergrundtyp in Form von $v_{S30} = 800$ m/s für die Gefährdungsberechnungen entspricht dem Übergangsbereich der Baugrundklasse A (unverwittertes Festgestein mit hoher Festigkeit, $v_S > 800$ m/s) zur Klasse B (mäßig verwitterte Festgesteine mit geringerer Festigkeit, 350 m/s $< v_S < 800$ m/s) gemäß DIN 4149:2005-04 [28] bzw. dem NA zum EC 8 (DIN EN 1998-1/NA:2011-01 [1]). Wie bereits im Abschn. 1 erwähnt, erfolgten die Berechnungen von Antwortbeschleunigungen generell für eine viskose Dämpfung von 5%.

Jeweilige Maxima zeigen die einzelnen UHS für Aachen bei 0,1 s und 0,15 s. Als weiteres Maximum stellt sich für andere Zielorte eines bei 0,2 s ein. Da ein zentrales Resultat der PSHA der Autoren im Hinblick auf den NA eine Gefährdungskarte ist, deren Periode T das Plateau der UHS repräsentiert, und nur eine solche Karte Eingang in das NA finden kann, wurden auf Anregung des Review-Teams Karten der Mittelwerte der Amplituden bei $T = 0,1$ s, $0,15$ s und $0,2$ s (abgekürzt: meanSRA) berechnet. Des Weiteren wurde im entsprechenden, eingangs bereits erwähnten DIN-Normenausschuss beschlossen, die Ergebnisdarstellungen der Mittelwerte aus den Resultaten des LT für den NA zu nutzen. Die Mittelwertkarte des meanSRA für $RP = 475$ a nimmt im NA eine zentrale Stellung ein. Mit der getroffenen Ent-

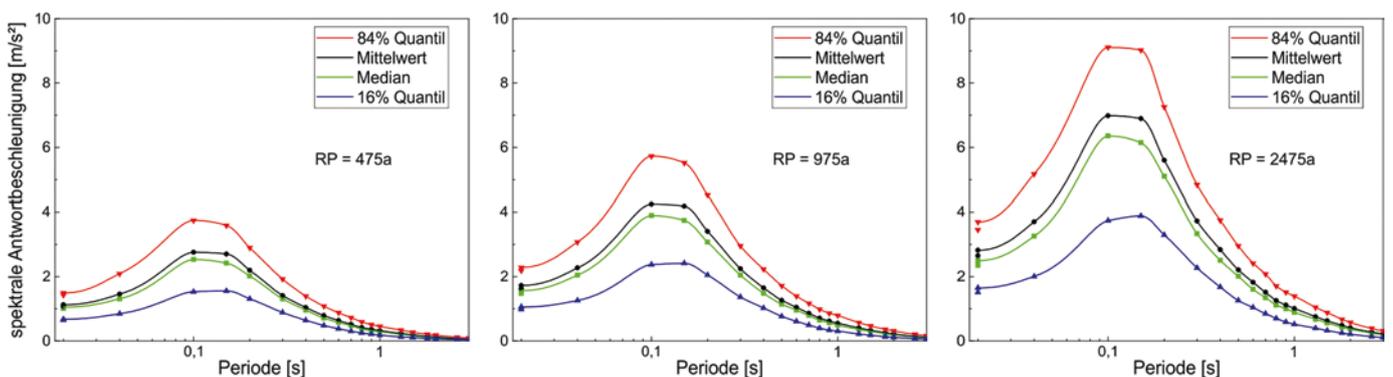


Bild 14 UHS für Aachen für die mittleren Wiederholungsperioden $RP = 475$ a, 975 a und 2475 a jeweils für die Quantile von 16%, 50% und 84% sowie die Mittelwerte; die viskose Dämpfung ist hier und in sämtlichen weiteren Darstellungen spektraler Antwortspektren mit 5% angenommen worden
UHS for the city of Aachen for mean return periods $RP = 475$ a, 975 a and 2475 a respectively for the quantiles of 16%, 50% and 84% and for the mean values; the viscose damping has been assumed here and in all further depictions of spectral response spectra with 5%

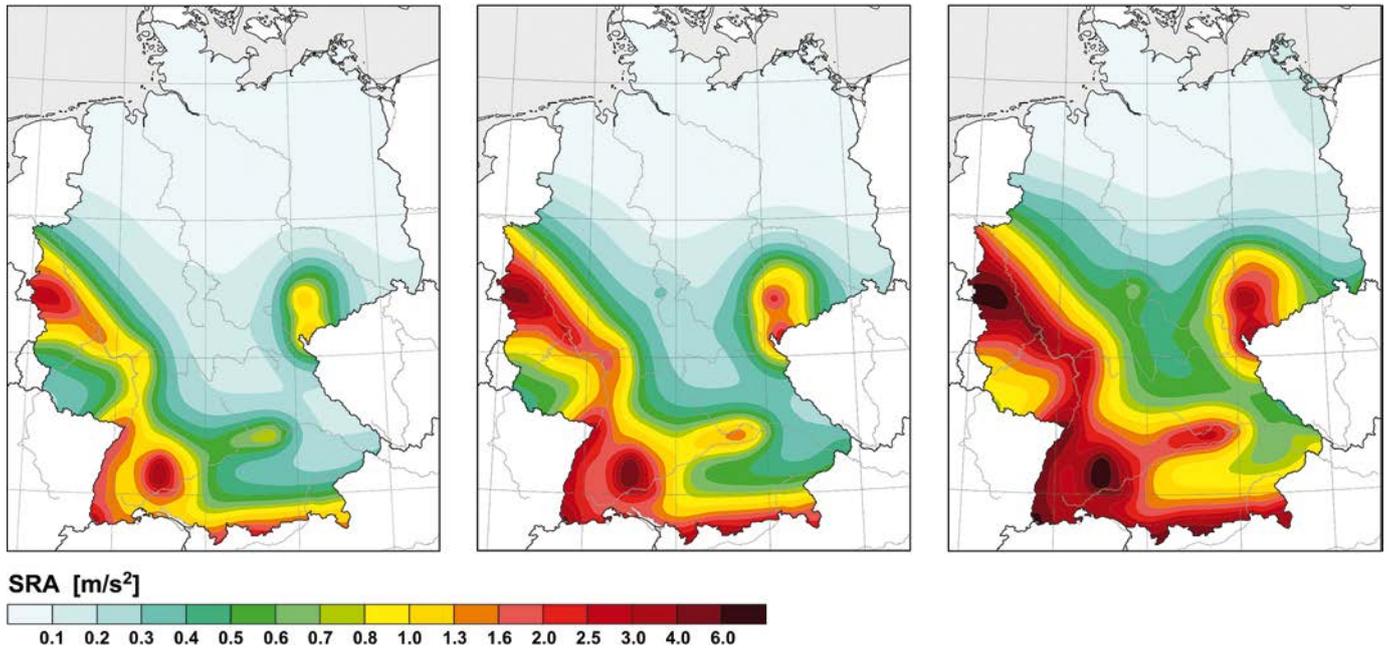


Bild 15 Gefährdungskarten der Mittelwerte der Amplituden bei $T = 0,1$ s, $0,15$ s und $0,2$ s (meanSRA) für Mittelwerte aus den Resultaten des LT für mittlere Wiederholungsperioden $RP = 475$ a, 975 a und 2475 a (von links nach rechts)
 Seismic hazard maps for the mean values of the response acceleration amplitudes of 0.1 s, 0.15 s, and 0.2 s (meanSRA) for the mean return period $RP = 475$ a, 975 a and 2475 a (from left to right)

scheidung wird den Empfehlungen von MCGUIRE u. a. [29] und MUSSON [30] gefolgt, die diese als Entgegnung auf Meinungen von ABRAHAMSON & BOMMER [31] diskutierten. Aus Ergebnisdarstellungen wird zudem deutlich, dass Mittelwerte aus einer großen Anzahl gut begründeter Einzelergebnisse, wie im vorliegenden Projekt, ein stabileres Verhalten zeigen als die sich eher zufällig ergebenden Medianwerte [12]. Mittelwerte entsprechen den Erwartungswerten. Mittelwerte von Wahrscheinlichkeitsaussagen werden für praktische und ingenieurtechnische Anwendungen zunehmend bevorzugt. So basieren neuere Baunormen (wie z. B. der 2015 National Building Code of Canada (NBCC2015) oder die neue Baunorm Italiens (MELETTI, pers. Mitteilung 2017)) auf Mittelwerten. Folgerichtig werden Mittelwerte vom CEN SC8 im Ergebnis von SHARE [32] für die Europäische Baunormung empfohlen. Auch die Ermittlung von Schadenserwartungswerten von Bauwerken, Kosten-Nutzen-Abschätzungen und Risikoberechnungen, die stets als Mittelwerte ausgewiesen werden, beruhen dementsprechend auf Mittelwerten der Erdbebengefährdung.

Mittelwerte spektraler Antwortbeschleunigungen werden im vorliegenden Projekt mit ihren spezifischen Werten mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. $33 \pm 5\%$ überschritten. Dagegen werden Medianwerte mit einer 50%-Wahrscheinlichkeit überschritten. Medianwerte enthalten keine Information zur Größe der Werte, mit denen diese mit 50% Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Die Nutzung von Medianwerten ist somit nur geeignet in Verbindung mit höheren Quantilen, die ein Maß dafür bieten, in welchem Bereich die mit 50% Wahrscheinlichkeit überschrittenen Werte liegen.

Die Gefährdungskarte für meanSRA anhand der Mittelwerte der Berechnungen für die Endzweige im LT zeigt Bild 15 für die drei o. g. Gefährdungsniveaus $RP = 475$ a, 975 a und 2475 a. Diese Karten stellen eines der zentralen Ergebnisse des Projekts dar und sind daher großformatiger dargestellt.

Größte Antwortbeschleunigungen zeigt in den Mittelwertkarten jeweils das Gebiet der Herdzone der Hohenzollernalb. Gefolgt werden die berechneten Beschleunigungen in den genannten Karten vom Zentrum des Niederrhein-Grabens, dem Raum Basel und der gesamten Rhein-Zone.

Da das Input-Modell umfänglich Unsicherheiten einbezieht, ist es interessant, die räumliche Variation der Unsicherheiten in den Gefährdungskarten darzustellen. Für $RP = 475$ a zeigt Bild 16 die Werte von meanSRA für das 16., das 50. und das 84. Perzentil.

Auffällig ist, dass die 16%-Karte das Maximum der Gefährdung in der Hohenzollernalb quasi nicht abbildet, d. h., dass hier die Unsicherheit in der Gefährdungsaussage relativ weit zu kleineren Lastannahmen „ausschlägt“. Quantifizieren lässt sich diese Aussage mithilfe der Unsicherheitsmetrik in PSHA nach [33], die hier in der Form $100 \times \log(\text{meanSRA}(84\%)/\text{meanSRA}(16\%))$ Verwendung findet (Bild 17).

Die Erklärung für diese lokal stark erhöhte Unsicherheit liegt u. a. darin begründet, die erhöhte Seismizitätszone der Hohenzollernalb, die seit 1911 mit einer Reihe von Schadenbeben aktiv ist, in Jahrhunderten davor aber keine oder kaum nennenswerte Seismizität

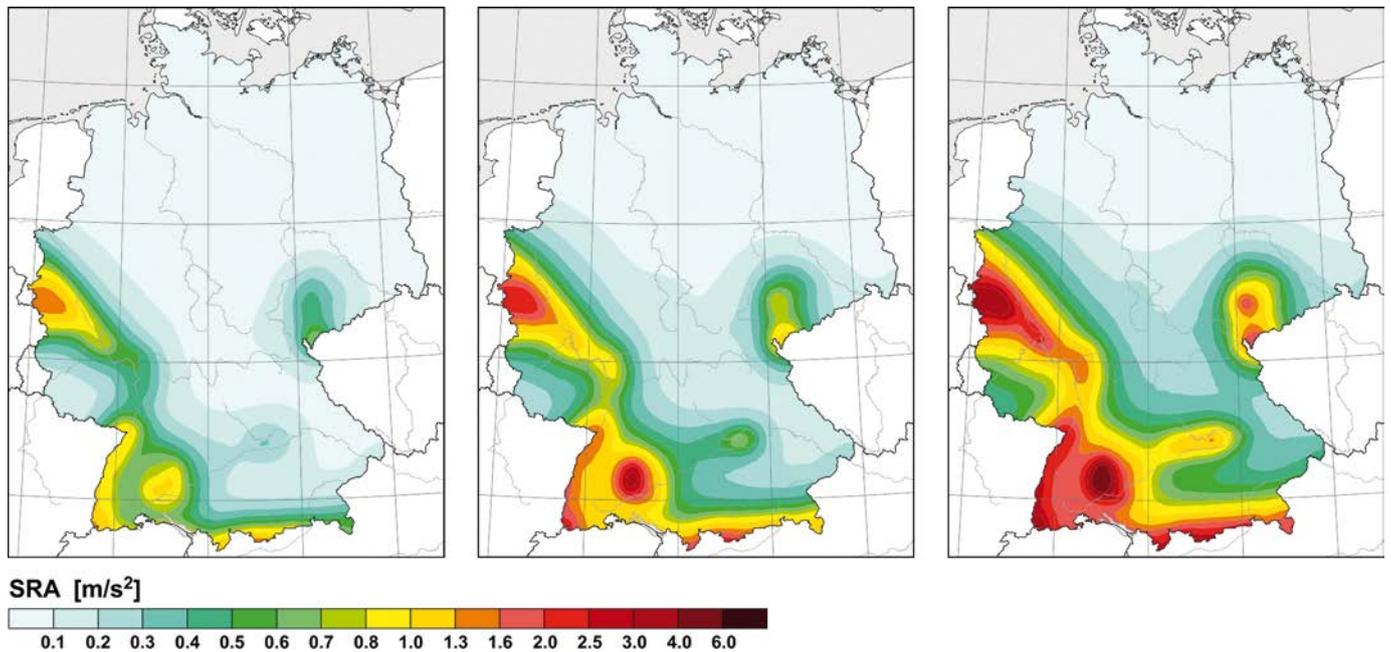


Bild 16 Gefährdungskarten für meanSRA für (von links nach rechts) das 16., das 50. und das 84. Perzentil für RP = 475 a
Seismic hazard maps for meanSRA for (from left to right) the 16th, the 50th and the 84th percentile for RP = 475 a

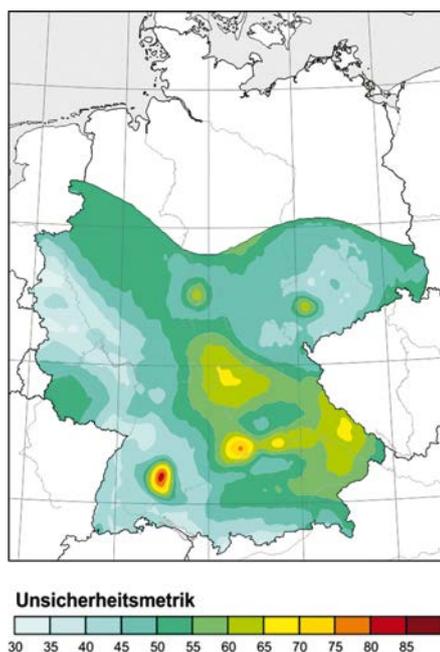


Bild 17 Räumliche Variation der Unsicherheitsmetrik nach [33] für meanSRA und RP = 475 a
Spatial Variation of the uncertainty metric after [33] for meanSRA and RP = 475 a

zeigte, prinzipiell auch an anderen Lokationen des süd-deutschen Blocks anzunehmen. Aus diesem Grund wurden die beiden großräumigen seismischen Quellregionenmodelle A und B eingeführt. Diese stellen einen signifikanten Seismizitätskontrast zu den drei kleinräumigen Quellenmodellen dar und tragen dadurch zum ausgedehnten Unsicherheitsbereich im Hinblick auf untere Perzentile bei. Weitere Gebiete erhöhter Unsicherheiten zeigen Teile Bayerns, insbesondere die Herzzone zwischen Altmühl und Donau, Teile

Hessens sowie, wenn auch weniger ausgeprägt, die Herzzone im Raum Gera (Thüringen).

Entscheidend für ingenieurtechnische Anwendungen von UHS sind Anpassungen der berechneten Amplituden der 19 Spektralstützstellen pro Gitterpunkt an die Form des elastischen EC-8-Antwortspektrums [34]. Es ist definiert durch jeweilige Werte der Kontrollperioden T_C , T_B und T_D sowie F_0 , das Verhältnis vom Maximum (Plateau) der Antwortbeschleunigung (für 5%-Dämpfung) zu PGA. Bild 18 zeigt beispielhaft zwei dieser horizontalen elastischen Antwortspektrumformen für Köln und Stuttgart für RP = 475 a mit den für beide Orte sehr ähnlichen und hier gemittelten Kontrollperioden $T_B = 0,11$ s, $T_C = 0,16$ s und $T_D = 1,15$ s. Für F_0 wird dessen räumliche Variation kartennmäßig dargestellt (Bild 19). F_0 nimmt in den Gebieten erhöhter Bebenaktivität großräumig Werte von 2,4–2,5 an, jedoch in kleinräumigen Arealen höchster Aktivität Werte bis 2,65. In Gebieten sehr schwacher Bebenaktivität ist $F_0 < 2,4$.

5 Vergleich der Resultate mit früheren PSHA und denen von Nachbarländern

Vergleiche mit früheren probabilistischen Erdbebengefährdungskarten, die für ingenieurtechnische Anwendungen entwickelt wurden, sind für die Praxis des Erdbebeningenieurwesens von Relevanz. Zuerst wird der Vergleich mit Resultaten zur Berechnung seismischer Lastannahmen für Felsuntergrund für die Regel zum Sicherheitsnachweis von Wasserbauten DIN 19700 [9] diskutiert. Bild 20 zeigt den Vergleich der UHS für Köln, aber mit RP = 500 a, da für diese Regel auf ganze Hunderter gerundete mittlere RP gefordert werden. Während die max. Amplituden beider Spektren, d.h. nach den Berechnun-

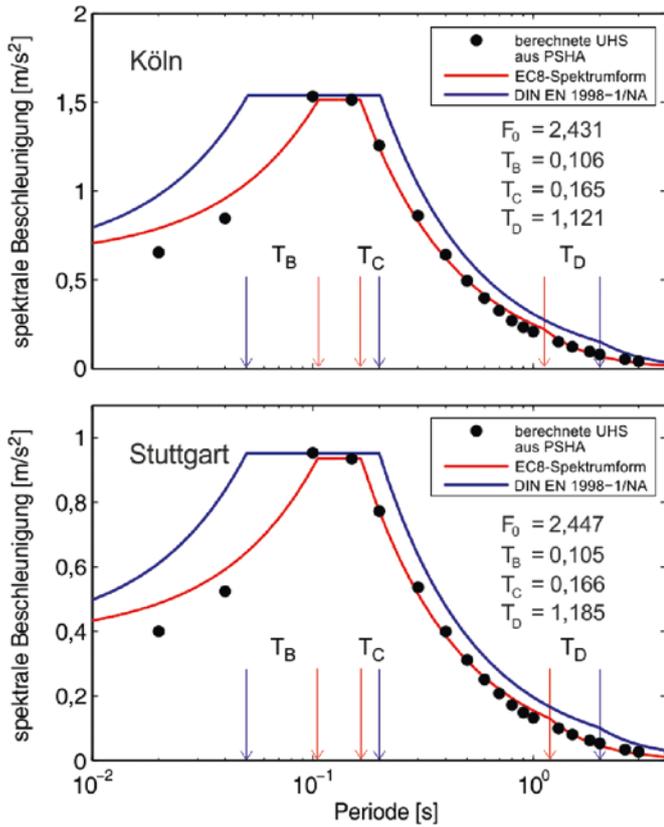


Bild 18 EC 8 elastische Antwortspektrumformen [34], angepasst an die berechneten Mittelwerte der 19 Spektralantwort-Beschleunigungen für RP = 475 a am Beispiel für Köln (oben) und Stuttgart (unten); zum Vergleich die entsprechenden Spektren des aktuellen Nationalen Anhangs zum EC 8 (DIN EN 1998-1/NA) für Baugrundklasse A
EC 8 elastic response spectrum shapes [34] fitted according to the calculated mean values of the 19 spectral response amplitudes for RP = 475 a as examples for Cologne (top) and Stuttgart (bottom); for comparison, the spectra of the current National Annex to the EC 8 (DIN EN 1998-1/NA) for subsoil class A

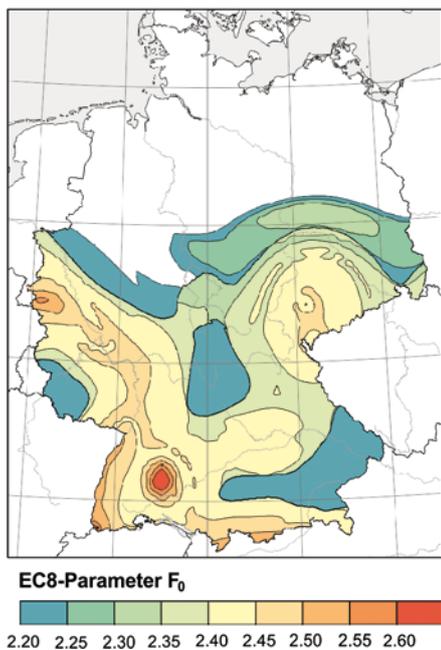


Bild 19 Räumliche Variation von F_0 , dem Verhältnis vom Plateau der Antwortbeschleunigung zu PGA, für RP = 475 a und Mittelwerte des LT
Spatial variation of the EC 8 spectral parameter F_0 ; i. e. the ratio of the plateau of the response acceleration to PGA for RP = 475 a and mean values of LT

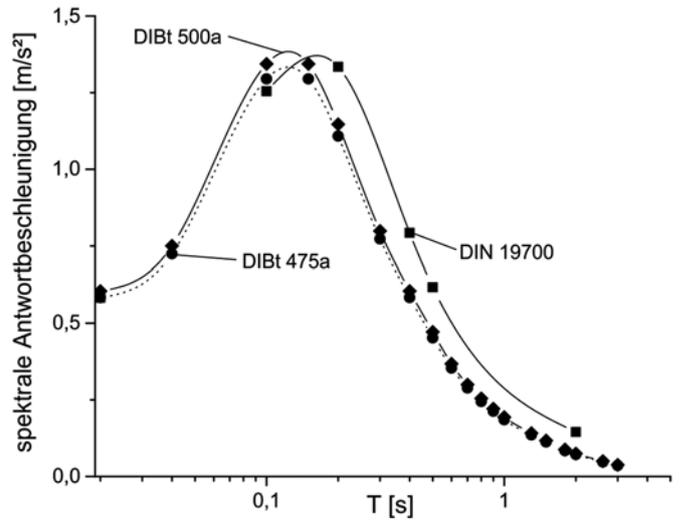


Bild 20 Vergleich der UHS für Köln für das D2016-Modell und nach [9] gemäß DIN 19700 mit RP = 500 a; zusätzlich wird das UHS für RP = 475 a dargestellt
Comparison of the UHS for Cologne for the D2016 model and according to [9] for DIN 19700 with RP = 500 a; additionally the UHS for RP = 475 a is depicted

gen der Autoren für die DIN 19700 und für das neue Projekt D2016, quasi gleich sind, ist eine Verschiebung zu höheren Frequenzen nach dem neuen Modell auffällig. Diese resultiert aus den Eigenschaften der neuen Generation von GMPE. Die Unterschiede zwischen Median und Mittelwert fallen für die Ergebnisse des vorliegenden DIN-19700-Projekts klein aus. In Bild 21 ist der Vergleich der PGA-Karten nach beiden Projekten für RP = 500 a dargestellt. Auch hier ist die generelle Übereinstimmung bemerkenswert.

Die derzeit gültige Zonierungskarte im NA zur DIN EN 1998-1 [1] stammt, wie eingangs beschrieben, noch von der intensitätsbasierten PSHA-Karte [2] bzw. erweitert für die Karte der D-A-CH-Staaten von [3]. Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts wurde eine intensitätsbasierte Gefährdungskarte zur Plausibilitätskontrolle berechnet – sie eignet sich selbstverständlich auch für den Vergleich mit der alten Karte von vor 22 Jahren (Bild 22). Auch hier zeigt sich eine generell frappierend gute Übereinstimmung. Höhere Gefährdungen zeigt die alte Karte jedoch z. B. im nördlichen Oberrhein-Graben, in den Herdzone vom Vogtland bis in den Raum Leipzig sowie zwischen Altmühl und Donau. Die Ursache für die geringere Neubewertung der Gefährdung liegt u. a. darin begründet, dass hier ein Teil der bisherigen signifikanten bzw. Schadenbeben im Rahmen der Arbeiten für den CENEC-Katalog [6] als Fake-Beben identifiziert wurde.

Abschließend wird der Vergleich der PGA-Erdbebengefährdungskarte der Schweiz anhand einer grundlegenden Neubewertung (CH2015) [35] mit vorliegender Neueinschätzung (D2016) entlang der gemeinsamen Grenze von Basel bis zum Bodensee vorgenommen (Bild 23). Beide Karten für RP = 475 a sind in Form der Erdbeschleunigung g parametrisiert sowie für Medianwerte und gleiche

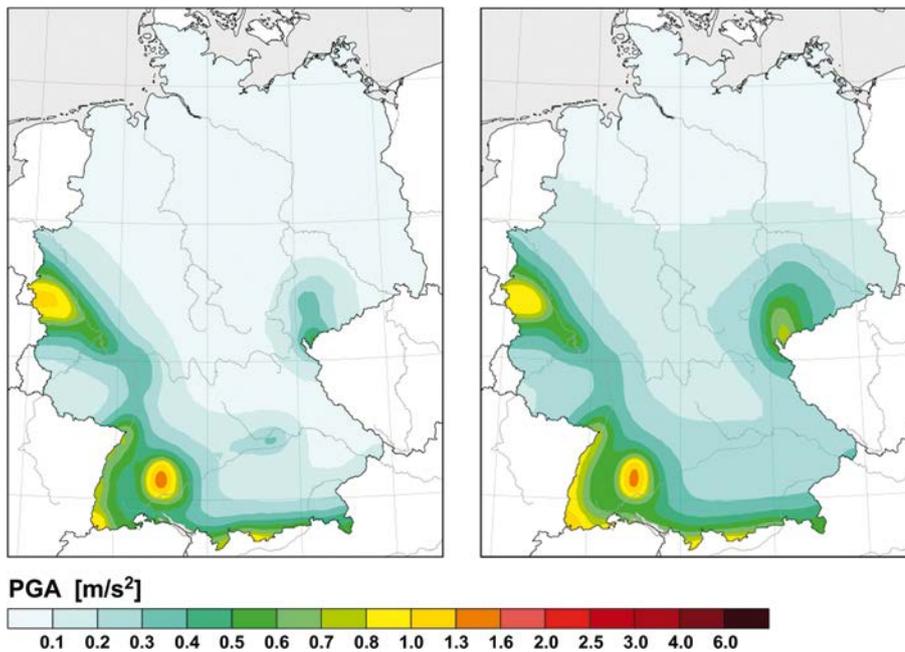


Bild 21 Vergleich der PGA-Karten für $RP = 500$ a; nach dem D2016-Modell für Mittelwerte (links), für die DIN 19700 (rechts) nach [9]
Comparison of the PGA maps for $RP = 500$ a according to the D2016 model for mean values (left) and for DIN 19700 (right) after [9]

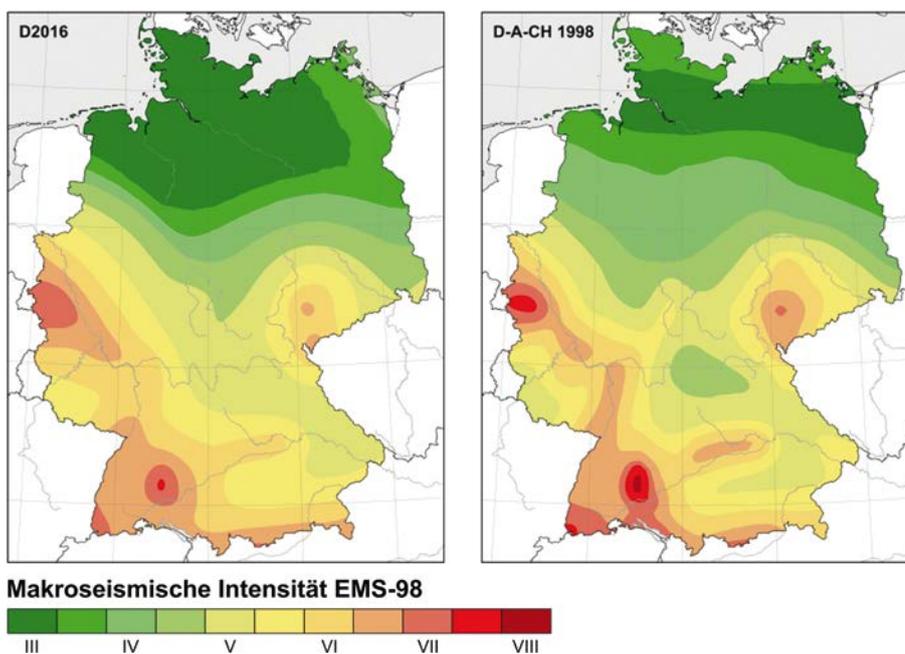


Bild 22 Vergleich der im Rahmen des neuen Projekts berechneten intensitätsbasierten Gefährdungskarte (links) mit derjenigen, die der derzeit gültigen Zonierungskarte im NA zur DIN EN 1998-1 zugrunde liegt (rechts), nach [2 bzw. 3]; beide Karten für $RP = 475$ a
Comparison of the intensity based hazard map according to the D2016 project (left) with that one, which is the basis of the currently valid zonation map of the NA to the DIN EN 1998-1 according to [2 resp. 3]; both maps are for $RP = 475$ a

$v_{S30} = 800$ m/s. Die Übereinstimmung beider Karten ist entlang der Grenze verblüffend gut. Zu berücksichtigen ist, dass die Legende Farbunterschiede in Hundertstel von g zeigt. Beide Projekte wurden völlig unabhängig voneinander durchgeführt.

Bezüglich des Vergleichs mit weiteren Gefährdungskarten, die hauptsächlich für europäische Projekte bzw. für Europa berechnet wurden, sei auf [36] verwiesen. In dieser Arbeit wird die generell gute Übereinstimmung der

europäischen Karten untereinander und mit den Ergebnissen für das DIN-19700-Projekt thematisiert.

Dank

Den Mitgliedern der Review-Teams, die das hier vorgestellte Forschungsvorhaben kritisch, aber stets konstruktiv begleiteten, sei an dieser Stelle Dank ausgesprochen, d.h. den Kollegen C. BUTENWEG, A. FÄCKE, E. FEHLING,

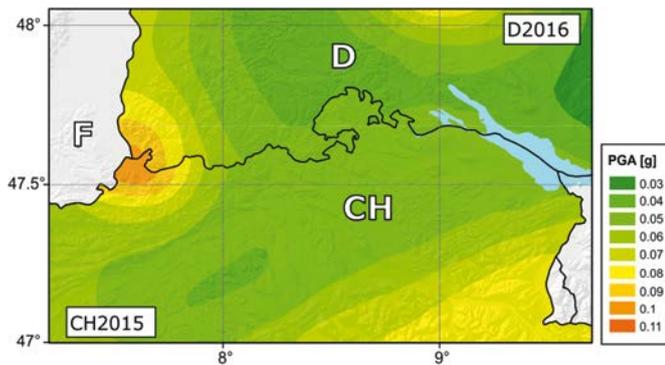


Bild 23 Vergleich der PGA-Erdbebengefährdungskarte der Schweiz [33] mit der Neueinschätzung nach D2016 entlang der gemeinsamen Grenze; beide Karten in g , für Median, $RP = 475$ a und $v_{S30} = 800$ m/s
Comparison of the PGA seismic hazard map for Switzerland [33] with the reappraisal according to D2016 along the common border; both maps are in g , for the median, $RP = 475$ a and $v_{S30} = 800$ m/s

H. SADEGH-AZAR, F.-H. SCHLÜTER, H. SCHNEIDER, T. SCHMIDT, J. SCHWARZ, T. SPIES und S. STÖHR. Eine enge Abstimmung erfolgte zudem während des gesamten Vorhabens mit den Mitgliedern des DIN-Normenausschusses Bauwesen „Erdbeben; Sonderfragen“. Für fachliche Diskussionen und Hinweise sowie für eine kritische Durchsicht des Manuskripts sind die Autoren OLIVER HEIDBACH und GRAEME WEATHERILL zu Dank verpflichtet. Die Verfasser danken zudem dem Deutschen Institut für Bautechnik für die finanzielle Unterstützung. Gedankt sei des Weiteren zwei anonymen Gutachtern für ihre Einschätzungen und konstruktiven Hinweise.

Literatur

- [1] DIN EN 1998-1/NA:2011-01 (2011) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [2] GRÜNTAL, G.; BOSSE, C. (1996) *Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht (Scientific Technical Report STR 96/10)*. Potsdam: GeoForschungszentrum Potsdam.
- [3] GRÜNTAL, G.; MAYER-ROSA, D.; LENHARDT, W. (1998) *Ab-schätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz* in: *Bautechnik* 75, H. 10, S. 753–767.
- [4] GRÜNTAL, G.; FISCHER, J. (2001) *Eine Serie irrtümlicher Schadenbeben im Gebiet zwischen Nördlingen und Neuburg an der Donau vom 15. bis zum 18. Jahrhundert* in: *Mainzer naturwissenschaftliches Archiv* 39, S. 15–32.
- [5] GRÜNTAL, G. (2004) *The history of historical earthquake research in Germany* in: *Annals of Geophysics* 47, H. 2/3, S. 631–643.
- [6] GRÜNTAL, G.; WAHLSTRÖM, R.; STROMEYER, D. (2009) *The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) – updated and expanded to the last millennium* in: *Journal of Seismology* 13, H. 4, S. 517–541.
- [7] GRÜNTAL, G.; WAHLSTRÖM, R.; STROMEYER, D. (2009) *Har-monization check of M_w within the central, northern, and northwestern European earthquake catalogue (CENEC)* in: *Journal of Seismology* 13, H. 4, S. 613–632.
- [8] GRÜNTAL, G.; WAHLSTRÖM, R. (2012) *The European-Mediterranean earthquake catalogue (EMEC) for the last millennium* in: *Journal of Seismology* 16, H. 3, S. 535–570.
- [9] GRÜNTAL, G.; BOSSE, C.; STROMEYER, D. (2009) *Die neue Generation der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland: Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 ‚Stauanlagen‘ (Scientific Technical Report STR 09/07)*. Potsdam: GeoForschungszentrum Potsdam.
- [10] GRÜNTAL, G.; STROMEYER, D.; HEIDBACH, O. (2013) *Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen* in: *GFZ Journal* 3, H. 1, S. 54–61.
- [11] STROMEYER, D.; GRÜNTAL, G. (2015) *Capturing the epis-temic uncertainty of seismic activity rates in logic tree driven PSHA* in: *Bulletin of the Seismological Society of America* 105, H. 2a, S. 580–589.
- [12] GRÜNTAL, G.; BOSSE, C.; STROMEYER, D.; COTTON, F.; BINDI, D. (2018) *The probabilistic seismic hazard assessment of Germany – version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability* in: *Bull Earthquake Eng* (online first). doi 10.1007/s10518-018-0315-y
- [13] SCHWARZ, J.; KAUFMANN, C.; MAIWALD, H. (2017) *Seismi-sche Einwirkungen für die neue Generation von Erdbeben-baunormen: Gefährdungskonsistente und untergrundspezi-fische Spektren für die aktualisierte Erdbebenzonenkarte [Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 246 40175]*. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Earthquake Damage Analysis Center.
- [14] BGR (2014) *Erdbebengefährdungsanalyse* [online]. Hanno-ver: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/Seismologie/Seismologie/Erdbebenauswertung/Erdbebenkataloge/Kataloge_Bulletins/kataloge_bulle-tins_node.html
- [15] GRÜNTAL, G. (2014) *Induced seismicity related to geother-mal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe* in: *Geo-thermics* 52, S. 22–35.
- [16] VANNESTE, K.; CAMELBECK, T.; VERBEECK, K. (2013) *A model of composite seismic sources for the Lower Rhine graben, northwest Europe* in: *Bulletin of the Seismological Society of America* 103, H. 2a, S. 984–1007.
- [17] WEICHERT, D. H. (1980) *Estimation of the earthquake re-currence parameters for unequal observation periods for different magnitudes* in: *Bulletin of the Seismological Society of America* 70, H. 4, S. 1337–1346.
- [18] JOHNSTON, A. C. (1994) *Seismotectonic interpretations and conclusions from the stable continental region seismicity*

- database* in: JOHNSTON, A. C.; COPPERSMITH, K. J.; KANTER, L. R.; CORNELL, C. A. [eds.] *The earthquakes of stable continental regions – v. 1, Assessment of large earthquake potential*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, S. 4-1–4-103.
- [19] MILLER, A. C.; RICE, T. R. (1983) *Discrete approximation of probability distributions* in: *Management Science* 29, H. 3, S. 352–362.
- [20] GRÜNTAL, G.; WAHLSTRÖM, R. (2001) *Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach* in: *Journal of Earthquake Engineering* 5, H. 3, S. 309–328.
- [21] COPPERSMITH, K. J. (1994) *Conclusions regarding maximum earthquake assessment* in: JOHNSTON, A. C.; COPPERSMITH, K. J.; KANTER, L. R.; CORNELL, C. A. [eds.] *The earthquakes of stable continental regions – v. 1, Assessment of large earthquake potential*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, S. 6-1–6-24.
- [22] CORNELL, C. A. (1994) *Statistical analysis of maximum magnitudes* in: JOHNSTON, A. C.; COPPERSMITH, K. J.; KANTER, L. R.; CORNELL, C. A. [eds.] *The earthquakes of stable continental regions – v. 1, Assessment of large earthquake potential*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, S. 5-1–5-27.
- [23] AKKAR, S.; SANDIKKAYA, M. A.; BOMMER, J. J. (2014) *Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East* in: *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, H. 1, S. 359–387.
- [24] BINDI, D.; MASSA, M.; LUZI, L.; AMERI, G.; PACOR, F.; PUGLIA, R.; AUGLIERA, P. (2014) *Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0s using the RESORCE dataset* in: *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, H. 1, S. 391–430.
- [25] DERRAS, B.; BARD, P. Y.; COTTON, F. (2014) *Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe* in: *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, H. 1, S. 495–516.
- [26] BINDI, D.; COTTON, F.; KOTHA, S. R.; BOSSE, C.; STROMEYER, D.; GRÜNTAL, G. (2017) *Application-driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments in non-cratonic moderate-seismicity areas* in: *Journal of Seismology* 21, H. 5, S. 1201–1218.
- [27] CAUZZI, C.; FACCIOLI, F.; VANINI, M.; BIANCHINI, A. (2014) *Updated predictive equations for broadband (0.01-10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records* in: *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, H. 6, S. 1587–1612.
- [28] DIN 4149:2005-04 (2005) *Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten* (April 2005). Berlin: Beuth.
- [29] MCGUIRE, R. K.; CORNELL, C. A.; TORO, G. R. (2005) *The case for using mean seismic hazard* in: *Earthquake Spectra* 21, H. 3, S. 879–886.
- [30] MUSSON, R. M. W. (2005) *Against fractiles* in: *Earthquake Spectra* 21, H. 3, S. 887–891.
- [31] ABRAHAMSON, N. A.; BOMMER, J. J. (2005) *Probability and Uncertainty in Seismic Hazard Analysis* in: *Earthquake Spectra* 21, H. 2, S. 603–607.
- [32] WOESSNER, J.; DANCIU, L.; GIARDINI, D.; CROWLEY, H.; COTTON, F.; GRÜNTAL, G.; VALENSISE, G.; ARVIDSSON, R.; BASILI, R.; DEMIRCIÖGLU, M. N.; HIEMER, S.; MELETTI, C.; MUSSON, R. W.; ROVIDA, A. N.; SESETYAN, K.; STUCCHI, M.; SHARE consortium (2015) *The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results* in: *Bulletin of Earthquake Engineering* 13, H. 2, S. 3553–3596.
- [33] DOUGLAS, J.; ULRICH, T.; BERTIL, D.; REY, J. (2014) *Comparison of the Ranges of Uncertainty Captured in Different Seismic Hazard Studies* in: *Seismological Research Letters* 85, H. 5, S. 977–985.
- [34] CEN (2004) *Eurocode 8: Design of structures for Earthquake Resistance. European Standard*. Berlin: Beuth.
- [35] WIEMER, S.; DANCIU, L.; EDWARDS, B.; MARTI, M.; FÄH, D.; HIEMER, S.; WÖSSNER, J.; CAUZZI, C.; KÄSTLI, P.; KREMER, K. (2016) *Seismic hazard model 2015 for Switzerland (SUIhaz2015)* [Technical report]. Zürich: Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich. doi 10.12686/a2
- [36] GRÜNTAL, G.; BOSSE, C.; STROMEYER, D. (2015) *Building code related seismic hazard analyses of Germany and their relation to SHARE* in: BUTENWEG, C.; KAISER, D. [eds.] *Seismic hazard harmonization in Europe (SHARE)*. DGEB-Publikation Nr. 16. Aachen: Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB), S. 25–41.

Autoren

Prof. Dr. Gottfried Grünthal
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Deutschland
ggroe@gfz-potsdam.de

Dr. Dietrich Stromeyer
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Deutschland
stro@gfz-potsdam.de

Dipl.-Phys. Christian Bosse
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Deutschland
bosse@gfz-potsdam.de

Prof. Dr. Fabrice Cotton
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Deutschland
fcotton@gfz-potsdam.de
auch: Institut für Erd- und Umweltwissenschaften
Universität Potsdam

Dr. Dino Bindi
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Sektion „Erdbebengefährdung und Spannungsfeld“
Telegrafenberg
14473 Potsdam
Deutschland
bindi@gfz-potsdam.de

GFZ



Helmholtz-Zentrum
POTSDAM

GFZ GeoForschungszentrum

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Telegrafenberg C3

14473 Potsdam

Tel. +49(0)331 288-0

info@gfz-potsdam.de

www.gfz-potsdam.de