

# Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen

Gottfried Grünthal, Dietrich Stromeyer, Oliver Heidbach  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*Probabilistic seismic hazard assessments (PSHA) represent one of the most practice-oriented products seismology can offer to society. As seismic load information, results of PSHA build the basis for earthquake-resistant building codes and safety proofs. They form the decisive input for seismic risk assessments and are, with this, of importance for the insurance industry. Thereby, PSHAs contribute directly to the reduction of earthquake risk, since the earthquake-resistant design of buildings represents the only sustainable protection against this kind of natural hazards.*

*This contribution provides in a compressed form a view into the methodical basis of PSHA. In the focus are here mathematical models, which enable the generation of PSHA with quantified uncertainties on the basis of geophysical and geological data. Typical results of a PSHA are presented in form of seismic hazard curves, seismic hazard maps and response spectra for the national code DIN19700 for safety proofs of hydraulic constructions like, e.g., dams of water reservoirs (Grünthal, 2008; Grünthal et al., 2009b).*



Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen (Englisch: probabilistic seismic hazard assessments PSHA) gehören zu den praxisrelevantesten Forschungsergebnissen, die die Seismologie der Gesellschaft bieten kann. PSHA beschreiben die Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder Überschreitens von Bodenerschütterungsparametern (1) von bestimmter Amplitude, (2) an konkreten Lokationen und (3) innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls, d.h. sie repräsentieren eine Langzeitprognose erwarteter Bodenerschütterungen für gewünschte Eintreffenswahrscheinlichkeiten. Diese werden parametrisiert z. B. in maximalen Bodenbeschleunigungen, Bodenschwinggeschwindigkeiten, Bodenverschiebungen, in Form von makroseismischen Intensitäten und in jüngster Zeit vor allem als spektrale Beschleunigungen der Resonanz von gedämpften Einmassenschwingern, die, stark vereinfacht, die Reaktion von Gebäuden mit ihren charakteristischen Eigenperioden wiedergeben.

Die Ergebnisse der PSHA bilden als seismische Lastannahmen das Rückgrat von Baunormen zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf und zum Sicherheitsnachweis bei Bebeeinwirkungen, sind die entscheidende Eingangsgröße für Abschätzungen zum Erdbebenrisiko und damit Grundlage relevanter Produkte der Versicherungswirtschaft. Damit stellen PSHA einen direkten Beitrag zur Reduktion von Risiken durch Erdbeben dar, da das erdbebengerechte Bauen den einzigen nachhaltigen Schutz vor dieser Naturgefahr bietet. Nicht nur global, sondern selbst in Deutschland ist mit den relativ seltenen stärkeren Beben das größte Potential zu erwartender Verluste im Vergleich zu anderen Naturgefahren verbunden (Munich Re, 1999; Allmann und Smolka, 2000; Grünthal et al., 2006).

PSHA verkörpern die Integration verschiedenster geowissenschaftlicher Disziplinen, d.h. sie fußen auf möglichst langen Beobachtungsreihen zur Seismizität einer Region, von paläoseismologischen Befunden über historische mittelalterliche Beben bis zu Daten modernster seismologischer Registriertechnik. Weitere wesentliche Eingabegrößen umfassen Daten zur Strukturgeologie und Neotektonik, die in Verbindung mit dem Spannungszustand Aufschluss geben zum Bebeeinwirkungspotential von Bruchstörungen in verschiedenen tektonischen

Regimen. Eine wichtige Eingangsgröße bilden Modelle des spektralen Verhaltens von Bodenbewegungen in Abhängigkeit von Magnituden, Entfernungen zwischen einem zu untersuchenden Standort und bebengenerierenden Bruchflächen, dem tektonischen Regime und den Baugrundeigenschaften am Standort. Statistische Modelle verbinden schließlich alle Eingangsdaten, wobei der Gegenstand dieses Beitrags im Wesentlichen der statistische Teil der hochkomplexen PSHA-Analysemethoden ist.

Eine Herausforderung moderner PSHA ist die vollständige Berücksichtigung der Unsicherheiten in allen Ausgangsparametern und Modellen, wobei zu unterscheiden ist zwischen aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten. Erstere beschreiben den inhärenten, intrinsischen Zufallscharakter einer Größe – über die zu integrieren ist –, wogegen die epistemischen Unsicherheiten unser unvollständiges Wissen, z. B. zu Modellannahmen, widerspiegeln. Sie werden in PSHA durch verschiedene Äste logischer Bäume berücksichtigt und führen zu Fraktalen der Ergebnisdarstellungen. Moderne PSHA beziehen schließlich mögliche Langzeit-Veränderlichkeiten (Grünthal et al., 2009a) in die Gefährdung ein. Ebenso wird derzeit die Simulation erwarteter Erdbebenszenarien anhand geomechanisch-numerischer Modelle mit PSHA-Methoden kombiniert, um Eintretenswahrscheinlichkeiten solcher Szenarien zu quantifizieren (vgl. Artikel Heidebach et al. in diesem Heft). Diese am Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ entwickelte Methodik zum Forward Induced Seismic Hazard Assessment (FISHA) befindet sich bereits in der Anwendungsphase. Gegenwärtig werden hiermit deterministische Simulationen zur Abschätzung der Änderung von Auftretensraten induzierter Seismizität bei Fluidstimulation von Georeservoirs vorgenommen (Hakim-hashemi et al., 2013).

Neben methodischen Grundlagen der PSHA werden weiter unten beispielhaft ausgewählte Aspekte der Gefährdungsabschätzung für die Wasserbaunorm DIN 19700 zum Sicherheitsnachweis von z. B. Talsperren präsentiert (Grünthal, 2008; Grünthal et al., 2009b).

## PSHA-Methodik

Gegenstand einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse ist die quantitative Abschätzung der Überschreitensrate  $\nu[A \geq a]$  eines Bodenbewegungsparameters  $A$  bezüglich eines vorgegebenen Niveaus  $a$  an einem Ort unter Berücksichtigung aller Beben, die an diesem Ort eine signifikante Bodenbewegung generieren könnten. Die ersten theoretischen Überlegungen zur PSHA gehen auf Cornell (1968), ein erstes Computerprogramm auf McGuire (1976) zurück. In allgemeiner Form gilt:

$$\nu(\vec{r}_0)[A \geq a] = \int_V \int_{m_{min}}^{m_{max}} P[A \geq a | m, \vec{r}, \vec{r}_0] \cdot \lambda(m, \vec{r}) \, dm d\vec{r} \quad (1)$$

Links: Linachtalsperre im Südschwarzwald – erdbebensicher nach denkmalgerechter Sanierung (Foto: Wilfried Dold, Vöhrenbach)

Left: Linach Dam in the southern Black Forest – earthquake resistant after monument protected restoration



Kontakt: G. Grünthal  
(ggrue@gfz-potsdam.de)

$P[A \geq a | m, \vec{r}, \vec{r}_0]$  ist die Wahrscheinlichkeit des Erreichens oder Überschreitens von  $a$  unter der Bedingung, dass am Quellpunkt  $\vec{r}$  ein Beben mit der Magnitude  $m$  eintritt und  $\lambda(m, \vec{r})$  beschreibt die Volumendichte der seismischen Rate in Abhängigkeit von der Magnitude an diesem Ort. Integriert wird über das gesamte für den Zielort  $\vec{r}_0$  relevante Quellgebiet  $V$  sowie den zugehörigen Magnitudenbereich  $m_{min} \leq m \leq m_{max}$ . Die Gefährdungskurve ist die grafische Darstellung der funktionalen Abhängigkeit der Überschreitensrate  $\nu[A \geq a]$  vom Niveau  $a$  des Bodenbewegungsparameters  $A$  an einem Beobachtungspunkt. Dieser Begriff wird i.d.R. jedoch für die aus  $\nu[A \geq a]$  abgeleitete Überschreitenswahrscheinlichkeit  $P[A \geq a]$  benutzt, vgl. Box 1 sowie Abb. 1.

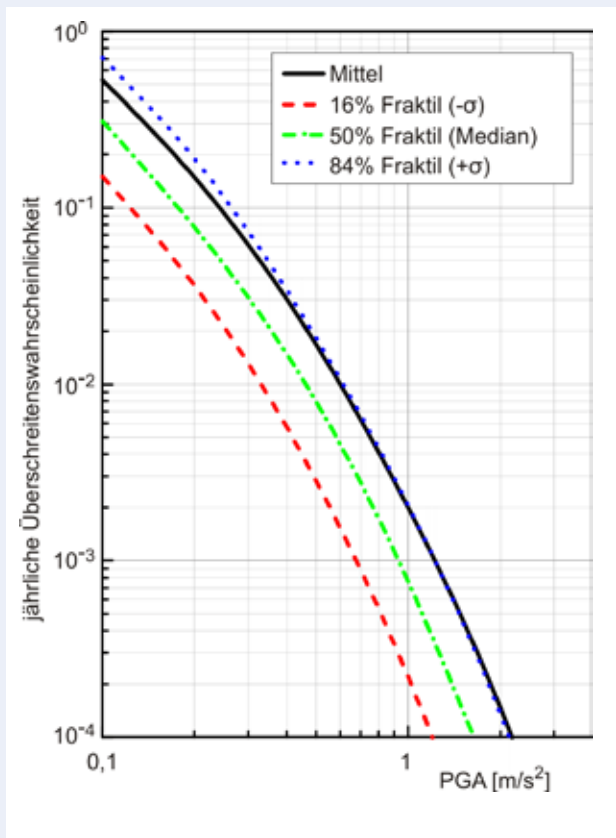


Abb. 1: Gefährdungskurven der maximalen Bodenbeschleunigung für das Zentrum von Köln in Form von Fraktile (Mittel, Median und Median  $\pm$  Standardabweichung (84% und 16%))

Fig. 1: Mean, median and median  $\pm$  standard deviation fractile (84% and 16%) hazard curve of peak ground acceleration for the centre of Cologne

### Box 1: Überschreitenshäufigkeiten als Poission-Prozess

Die zeitliche Abfolge von Erdbeben ist im einfachsten Fall ein diskreter Zufallsprozess und wird unter Annahme der Unabhängigkeit der Ereignisse (Gedächtnislosigkeit) durch eine homogene Poission-Verteilung (Stationarität) gut approximiert. Dieses Modell gilt aufgrund der Zufallsselektion auch für die Schätzung der Überschreitungen eines Bodenbewegungsparameters  $A$  bezogen auf ein vorgegebenes Gefährdungsniveau  $a$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Poission-Prozess mit einer stationären Ereignisrate  $\nu$  wenigstens ein Ereignis im Zeitintervall  $\tau$  eintritt, ist

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\nu \cdot \tau}$$

Diese Gleichung definiert den Zusammenhang zwischen den in seismischen Gefährdungsanalysen genutzten Begriffen: jährliche Überschreitensrate ( $\nu$ ), Überschreitenswahrscheinlichkeit ( $P[N \geq 1]$ ) von  $a$  und mittlere Wiederkehrperiode ( $T=1/\nu$ ). In Tabelle 1 sind Parameterwerte für einige typische normungsrelevante Anwendungen zusammengestellt.

Im Fall zeitabhängiger Seismizitätsdaten ist zu prüfen, welche Wahrscheinlichkeitsverteilung die Daten am besten beschreibt; hierzu gehören die Weibull-, Gamma-, Lognormal- und Brownian Passage Time-Verteilung oder deren Kombinationen (Grünthal et al., 2009a).

### Die seismische Intensitätsrate $\lambda(m, \vec{r})$

Die Volumendichte der seismischen Intensitätsrate  $\lambda(m, \vec{r})$  in Gleichung (1) verkörpert in einem quantitativen Modell das gesamte formalisierte Wissen zur Bebenaktivität in einem Untersuchungsgebiet. In dieser Größe werden in Abhängigkeit von der Modellwahl (Punkt-, Störungs- oder Volumenquelle, smoothed seismicity) die entsprechenden Magnitudenhäufigkeitsverteilungen im Bedarfsfall in Abhängigkeit vom tektonischen Regime (Aufschiebung, Abschiebung, Seitenverschiebung) berücksichtigt.

Berechnungsgrundlage zuverlässiger Intensitätsraten sind detaillierte katalogisierte Seismizitätsdaten, die möglichst weit in die Historie zurückreichen und in Form harmonisierter Momentmagnituden  $M_w$  parametrisiert sind. Einzig die Momentmagnitude fußt auf einem physikalischen Konzept und ist die Größe, für die die Abminderungsmodelle (s. u.) skaliert sind.  $M_w$  werden mittels Chi-Square-Regressionen (Stromeyer et al., 2004) aus anderen Magnitudenarten oder makroseismischen Intensitäten ermittelt. Moderne Bebenkataloge (Grünthal et al., 2009c; Grünthal und Wahlström, 2012) gründen sich zunehmend auf Interpretationen zeitgenössischer historischer Quellen. Danach erweisen sich in einzelnen Gebieten bis zu 58% der Schadenbeben aufgrund früherer Bundesdeutscher Bebenkataloge als nie stattgefunden Scheinbeben. Die Abb. 2 zeigt die katalogisierte Seismizität im Untersuchungsgebiet seit 1000 AD, das im Folgenden näher betrachtet wird.



Tabelle 1: Normungsrelevante Gefährdungsszenarien typischer Hoch- und Industriebauten

normungsrelevante Anwendungen	angenommene Standzeit (τ)	prozentuale Überschreitenswahrscheinlichkeit von Bodenbewegungen während der Standzeit	jährliche Überschreitensrate	mittlere Wiederholungsperiode
normale Hochbauten	50 a	10 %	$2,1 \cdot 10^{-3}/a$	475 a
große Talsperren	100 a	4 %	$4 \cdot 10^{-4}/a$	2500 a
kerntechnische Anlagen	50 a	0,05 %-0,005 %	$10^{-5}-10^{-6}/a$	10 000-100 000 a

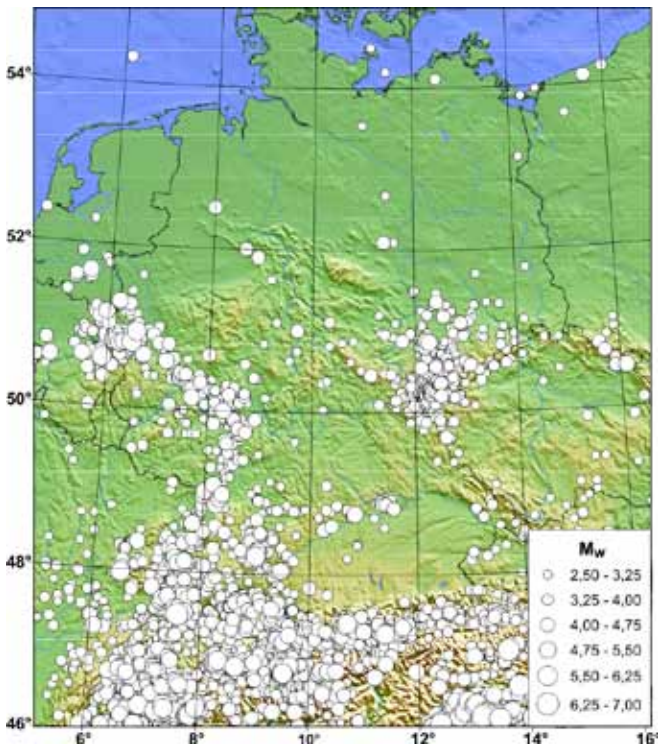


Abb. 2: Beobachtete Seismizität im Untersuchungsgebiet 1000 AD bis 2003 (Grünthal et al., 2009b,c)

Fig. 2: Observed seismicity in the study area 1000 AD to 2003 (Grünthal et al., 2009b,c)

Das in einer PSHA am häufigsten verwendeten Standardmodell für die seismische Intensitätsrate einer einzelnen Quellregion ist eine separierbare Volumenquelle (areal source model). Dieses Modell setzt sich zusammen aus der flächennormierten Magnitudenhäufigkeit einer homogenen seismischen Quelle  $\lambda_{as}(m)$  und einer tiefenabhängigen Magnitudendichteverteilung  $f_m(h)$

$$\lambda(m, \vec{r}) = \lambda_{as}(m) \cdot f_m(h) \quad (2)$$

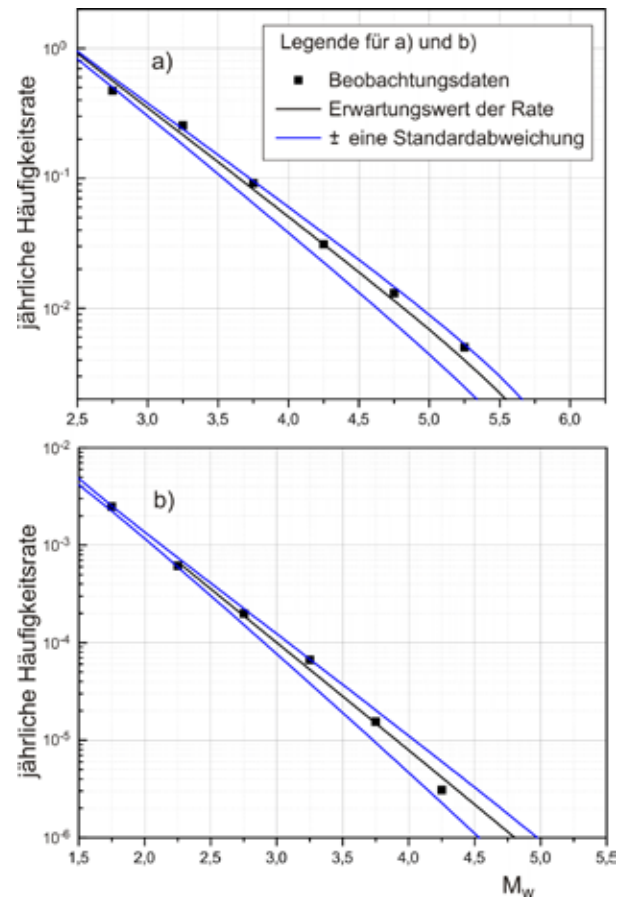


Abb. 3: Flächennormierte (pro 1000 km<sup>2</sup>) kumulative jährliche Magnitudenhäufigkeitsraten für zwei seismische Quellen: a) Hohenzollernalb, als Beispiel für eine seismische Quelle mit hoher Seismizität und b) für die kombinierte Quellregion Mitteleuropäische Senkungszone plus Dänische Bucht, als Beispiel für ein Gebiet sehr geringer Bebenaktivität

Fig. 3: Area normalized (per 1000 km<sup>2</sup>) cumulative annual frequency-magnitude rate of two seismic sources: a) Hohenzollernalb, example of a source with high seismicity and b) Central European Basin plus Danish Embayment, example of a region with low activity

### Box 2: Magnitudenhäufigkeitsverteilung

Die klassische Gutenberg-Richter-Relation beschreibt in ihrer kumulativen Form

$$v_C(m) = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot m)$$

die Magnitudenhäufigkeitsrate  $v_C(m)$  für das Auftreten von Erdbeben mit Magnituden  $\geq m$  in einer seismischen Quelle. Unter Berücksichtigung maximal zu erwartender Magnitude  $m_{max}$  ergibt sich

$$v_C(m) = v_0 \frac{\exp(-\beta \cdot m_{max}) - \exp(-\beta \cdot m)}{\exp(-\beta \cdot m_{max}) - \exp(-\beta \cdot m_0)}$$

mit der kumulativen Rate  $v_0$  für eine Magnitude  $m_0$  (der kleinsten Bebenklasse mit hinreichend vielen Beben) und der bei  $m_{max}$  abgeschnittenen exponentiellen Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Maximum-Likelihoodschätzung der Parameter  $v_0$  und  $\beta$  liefert nicht nur deren Erwartungswerte, sondern auch deren Unsicherheiten als zweidimensionale Verteilungsfunktion für  $v_0$  und  $\beta$ . In modernen PSHA wird diese Verteilungsfunktion durch optimal gewählte und gewichtete  $(v_0, \beta)$ -Paare diskretisiert und in logischen Bäumen berücksichtigt.

Die in Gleichung (2) benötigte Magnitudenhäufigkeitsverteilung  $\lambda_{as}(m)$  ist, bis auf einen flächenabhängigen Normierungsfaktor, mit der Ableitung von  $v_C(m)$  identisch:

$$\lambda_{as}(m) \sim -\frac{dv_C(m)}{dm}$$

Beide Verteilungen sind aus den Bebenkatalogen zu bestimmen. Das Standardmodell für die Magnitudenhäufigkeitsverteilung  $\lambda_{as}(m)$  leitet sich aus der klassischen Gutenberg-

Richter-Relation ab (vgl. Box 2). Die beiden Parameter  $v_0$  und  $\beta$  dieser Verteilung werden mittels Maximum-Likelihoodschätzung (M-L) aus Magnitudenhäufigkeiten diskreter Magnitudenklassen unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeitsdichte maximal zu erwartender Magnituden  $m_{max}$  der entsprechenden Quellregion bestimmt (vgl. Abb. 3). Die Resultate der nachfolgend skizzenhaft präsentierten Anwendung beruhen auf einer Kombination vieler dieser Standardquellmodelle.

### Die bedingte Wahrscheinlichkeit $P[A \geq a | m, \vec{r}, \vec{r}_0]$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P[A \geq a | m, \vec{r}, \vec{r}_0]$  beschreibt die Probabilistik der aleatorischen Unsicherheiten in der entfernungsabhängigen Amplitudenabminderung eines Bodenbewegungsparameters von der Quelle bis zum Zielort (Box 3). Für das zugehörige Dämpfungsmodell hat sich international der Begriff „Ground motion prediction equation“ GMPE durchgesetzt. Nur sehr einfache frühe GMPE sind unmittelbar mit den Variablen  $m$ ,  $\vec{r}$  und  $\vec{r}_0$  beschreibbar. Moderne Relationen benötigen zusätzliche regionale Modellparameter mit indirektem Bezug zu den Basisvariablen. So ist etwa der Abstand  $R$  zwischen Quelle und Zielort nur für Beben kleiner Magnitude (Punktquelle) mit der Hypozentralentfernung  $R = |\vec{r} - \vec{r}_0|$  oder der Epizentralentfernung identisch. Für stärkere Beben ( $m > 5$ ) ist  $R$  häufig eine spezifische Metrik bezüglich Herdfläche und Zielort (Joyner-Boore distance, rupture distance). Deren Berechnung erfordert neben den Ortsvariablen  $\vec{r}$  und  $\vec{r}_0$  die Kenntnis einer Verteilung der Geometrie (Orientierung und Größe) möglicher Herdflächen im Quellgebiet. Auch die Berücksichtigung des tektonischen Regimes sowie der Untergrundbedingungen in einer GMPE verlangt nach entsprechenden Modellen (Verteilungen) in der Quellregion bzw. am Zielort (vgl. Abb. 4).

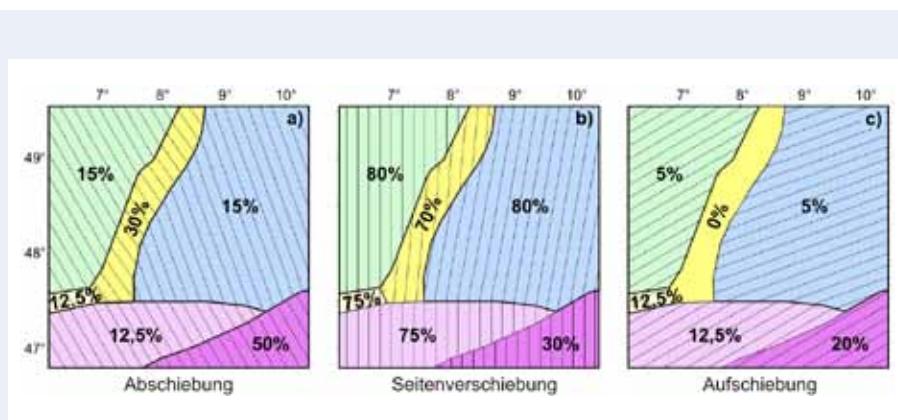


Abb. 4: Prozentualer Anteil von a) Abschiebungs-, b) Seitenverschiebungs- und c) Aufschiebungstektonik in einem Quellenmodell Süddeutschlands (Grünthal et al., 2009b)

Fig. 4: Percentage of a) normal b) strike slip c) thrust faulting for a source model of south Germany (Grünthal et al., 2009b)

**Box 3: Probabilistik der aleatorischen Unsicherheit in GMPEs (Ground motion prediction equation)**

Die Standardform einer GMPE lautet bei festen Werten für Untergrundbedingungen und tektonischem Regime

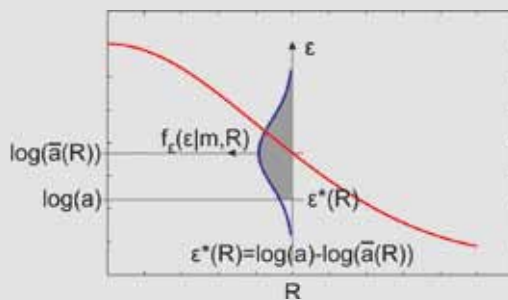
$$\log(A(m,R)) = \log(\bar{a}(m,R)) + \varepsilon(m,R)$$

$A(m,R)$  bezeichnet die Wahrscheinlichkeitsvariable eines Bodenbewegungsparameters (z. B. PGA),  $\bar{a}(m,R)$  ist irgendein mittleres empirisches Modell (Mittel oder Median) und  $\varepsilon(m,R)$  die aleatorische Unsicherheit von  $\bar{a}(m,R)$ .  $R$  steht für eine beliebige Abstandsmetrik zwischen Quelle und Zielort. Für makroseismische Intensitäten entfallen die Logarithmen.

Sei  $f_\varepsilon(\varepsilon|m,R)$  die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von  $\varepsilon(m,R)$  dann gilt

$$P[A \geq a|m,R] = \int_{\varepsilon^*}^{\infty} f_\varepsilon(\varepsilon|m,R) d\varepsilon$$

$P[A \geq a|m,R]$  ist die graue Fläche unter  $f_\varepsilon(\varepsilon|m,R)$ .



Das Residuum  $\varepsilon$  wird häufig als normalverteilt und unabhängig von  $m$  und  $R$  angenommen,  $f_\varepsilon(\varepsilon) = \phi(0,\sigma,\varepsilon)$ , wobei in PSHA in diesem Fall auf die Standardabweichung  $\sigma$  normiert wird,  $f_\varepsilon(\varepsilon) = \phi(0,1,\varepsilon)$ . Die Integration wird i.d.R. nur bis zwei oder drei  $\sigma$  ausgeführt.

**Anwendung zur Berechnung der seismischen Lastannahmen für die nationale Wasserbaunorm DIN19700**

Wie oben erwähnt, soll die beschriebene Methodik am Beispiel der Berechnung seismischer Lastannahmen zum Standicherheitsnachweis von Wasserbauten erläutert werden. Entsprechend des Anwendungsgebiets der Norm ist das Quellgebiet so groß zu wählen, dass alle Bebenherde mit Einfluss auf das Zielgebiet erfasst werden. Ein Quellmodell einer PSHA mit einer Vielzahl teils kleinräumiger Regionen mit angenommener homogener seismischer Intensitätsrate zeigt Abb. 5. Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten solcher Modelle finden mehrere in Form eines logischen Baums Eingang in die Berech-

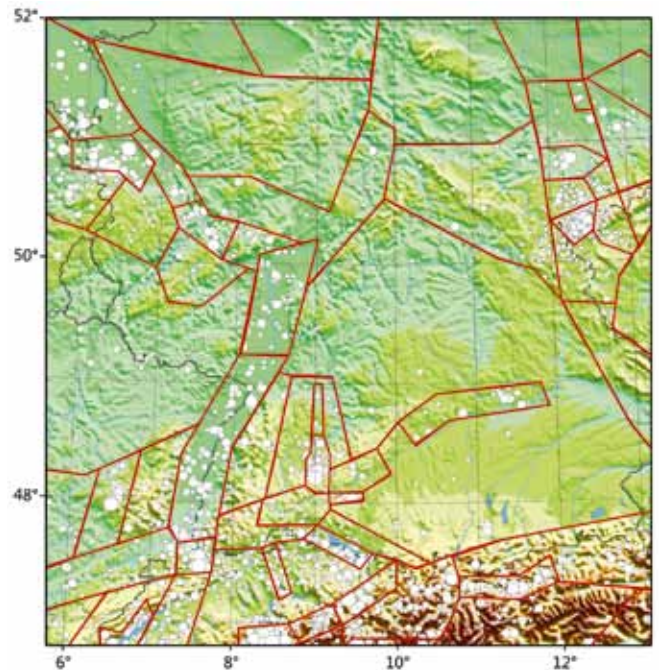


Abb. 5: D-A-CH Quellenmodell (Grünthal et al., 1998); Ausschnitt

Fig. 5: D-A-CH source model (Grünthal et al., 1998); excerpt

nungen. Der logische Baum der Quellregionenmodelle für die vorliegende Untersuchung mit sieben Endzweigen ist in Abb. 6 dargestellt. Die erste Knotenebene unterscheidet zwischen groß- und kleinräumigen Modellen, in der zweiten Ebene werden zwei Varianten großräumiger Modelle ausgewiesen während in der dritten Ebene drei Varianten kleinräumiger Modelle Eingang finden. Zusätzlich sind für eine dieser Varianten drei weitere lokale Variationen (für die Niederrheinische Bucht) vorgesehen. Somit ergeben sich insgesamt 528 separate Quellregionen.

Die epistemischen Unsicherheiten der Parameter jeder einzelnen seismischen Quelle sind als weiterer logischer Baum in Abb. 7 veranschaulicht. Die erste Knotenebene trifft die Auswahl der drei für die Quelle anwendbaren GMPE, wobei diese Auswahl die epistemische Unsicherheit dieser Modelle ausdrückt. In der zweiten Ebene spiegeln sich die Unsicherheiten der seismischen Intensität in Form mehrerer  $\nu_0$ - $\beta$  Paare für die Magnitudenhäufigkeitsverteilung der Quelle wider, sowie in der dritten Ebene die diskretisierten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen von  $m_{max}$ . Die Kombination beider Bäume ergibt 315 Endzweige für die Berechnung des Einflusses jeder einzelnen Quelle für die PSHA.

Das Ergebnis einer PSHA mit logischem Baum sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Überschreitensraten bzw. entsprechender Überschreitenswahrscheinlichkeiten eines Bodenbewegungsparameters bezogen auf ein vorgegebenes Niveau am Zielort. Diese Verteilungen erlauben die Berechnung von Ergebnisfraktilen. Für eine flächenmäßige Darstel-



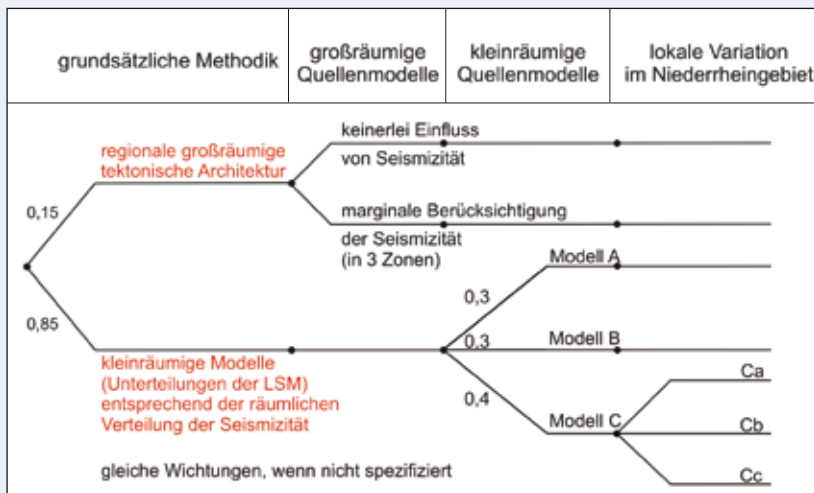


Abb. 6: Logischer Baum der Quellregionenmodelle zur Behandlung ihrer epistemischen Unsicherheiten

Fig 6: Logic tree of the source region models to address their epistemic uncertainties

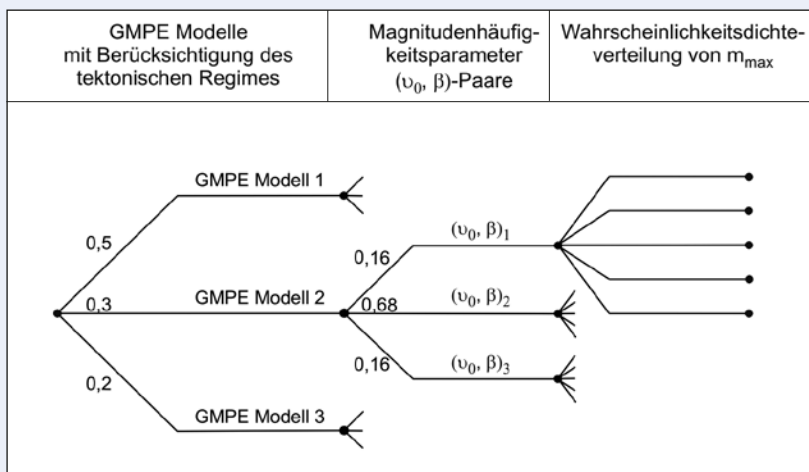


Abb. 7: Struktur des logischen Baums pro seismischer Quelle. An den Verzweigungen sind die jeweiligen Wichtungen angegeben; bei Nichtangabe sind sie identisch

Fig. 7: Structure of the logic tree per seismic source. At the branches the appropriate source weights are shown; if not given they are identical

lung der Ergebnisse in Form von Gefährdungskarten sind diese Rechnungen für eine große Anzahl von Zielorten durchzuführen (bei einem Raster von  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  6200 Punkte in dieser Anwendung), was eine extreme Herausforderung an Hard- und Software bedeutet. Abb. 8 zeigt beispielhaft eine Karte der spektralen Antwortbeschleunigung für 4% Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bei einer Schwingperiode von 0,4 Sekunden. Direkte Anwendung in baodynamischen Sicherheitsnachweisen finden gefährdungskonsistente Beschleunigungsantwortspektren (uniform hazard spectrum, UHS) für einen Zielort (Abb. 9). Diese umfassen die PSHA für einen Zielort für ein vorgegebenes Gefährdungsniveau anhand der Berechnungen für eine Vielzahl von Schwingungsperioden. Mit dem Web-Portal <http://www.gfz-potsdam.de/DIN19700> kann für jeden Punkt der Bundesrepublik Deutschland das zugehörige UHS für verschiedene Gefährdungsniveaus bezogen auf den Untergrundtyp am Zielpunkt interaktiv abgefragt werden.

## Literatur

- Allmann, A., Smolka, A. (2001): Increasing loss potential in earthquake risk – a reinsurance perspective, European Center for Geodynamics and Seismology Workshop “Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe” (Han-sur-Lesse, Belgium 2000), 1-4.
- Cornell, C. A. (1968): Engineering seismic risk analysis. - Bulletin of the Seismological Society of America, 58, 5, 1583-1606.
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D., Lenhardt, W. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. - Bautechnik, 75, 10, 753-767.
- Grünthal, G. (2008): Erdbebengefährdungskarten für die Bemessung von Stauanlagen nach DIN 19700, Erfahrungsaustausch Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg. Berichtsband 14. Jahrestagung ‘Sicherheitsrelevante Einwirkungen auf Hochwasserrückhaltebecken - Extreme Betriebszustände’, WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, 25-29.

- Grünthal, 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 , 09/07), Potsdam, 81 p.
- Grünthal, G., Hakimhashemi, A., Schelle, H., Bosse, C., Wahlström, R. (2009): The long-term temporal behaviour of the seismicity of the Dead Sea Fault Zone and its implication for time-dependent seismic hazard assessments: a report related to the DFG project Geo-DESIRE (Geoscientific Dead Sea Integrated Research Project), (Scientific Technical Report , 09/09), Potsdam, 45 p.
- Grünthal, 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. - *Journal of Seismology*, 13, 4, 517-541, 10.1007/s10950-008-9144-9.
- Grünthal, G., Thieken, A. H., Schwarz, J., Radtke, K. S., Smolka, A., Merz, B. (2006): Comparative risk assessments for the city of Cologne, Germany - storms, floods, earthquakes. - *Natural Hazards*, 38, 1-2, 21-44, 10.1007/s11069-005-8598-0.
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2006): New generation of probabilistic seismic hazard assessment for the area Cologne/Aachen considering the uncertainties of the input data. - *Natural Hazards*, 38, 1-2, 159-176, 10.1007/s11069-005-8611-7.
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - *Journal of Seismology*, 16, 3, 535-570, 10.1007/s10950-012-9302-y.
- Hakimhashemi, A., Yoon, J. S., Heidbach, O., Zang, A., Grünthal, G. (2013): FISHA - forward induced seismic hazard assessment application to synthetic seismicity catalog generated by hydraulic stimulation modeling. - *PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, February 11-13, 2013. CD-ROM SGP-TR-198, 455-461.
- Heidbach, O., Hergert, T., Grünthal, G., Stromeyer, D. (2013): Erdbebensimulation im Computer. - *System Erde*, 3, 1, 46-53
- McGuire, R. K. (1976): FORTRAN computer program for seismic risk analysis, (Open-file report / United States Department of the Interior, Geological Survey ; 76-67), [Denver, Colo.], 90 p.
- Münchener Rückversicherungsgesellschaft (1999): Naturkatastrophen in Deutschland – Schadenserfahrungen und Schadenspotentiale, München.
- Stromeyer, D., Grünthal, G., Wahlström, R. (2004): Chi-square regression for seismic strength parameter relations, and their uncertainties, with applications to an Mw based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe. - *Journal of Seismology*, 8, 1, 143-153, 10.1023/B:JOSE.000009503.80673.51.

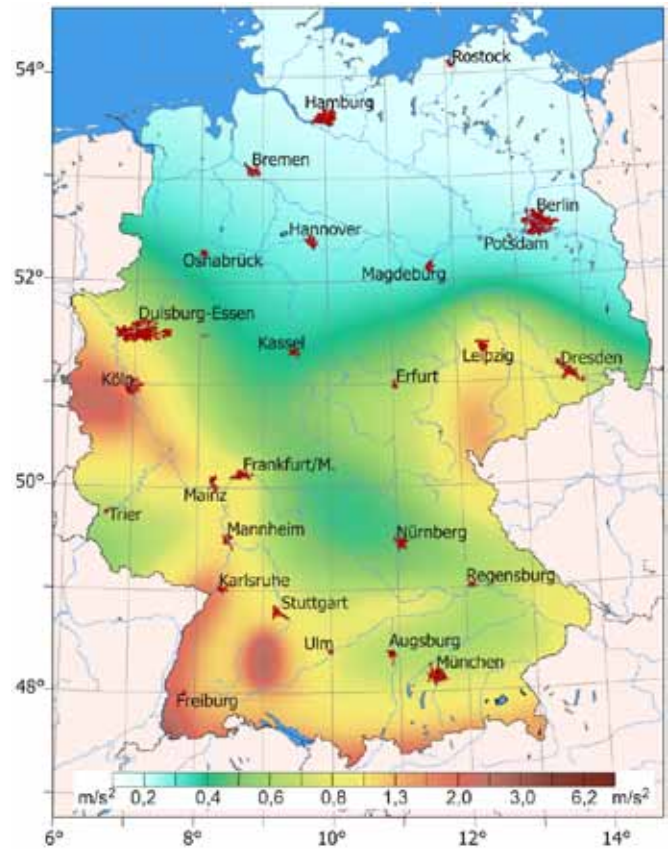


Abb. 8: Karte der spektralen Antwortbeschleunigung für 4 % Überschreitenswahrscheinlichkeit in 100 Jahren bei 0,4 sec (bzw.  $v = 4 \cdot 10^{-4}/a$  oder  $T = 2500$  Jahre)

Fig. 8: Map of spectral acceleration for 4 % probability of exceedence in 100 years for 0.4 s (corresponding to  $v = 4 \cdot 10^{-4}/a$  or  $T = 2500$  years)

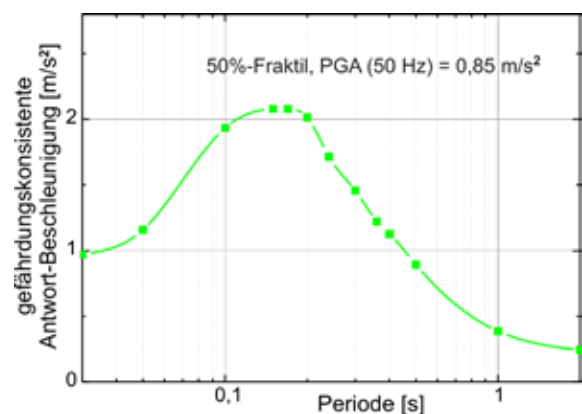


Abb. 9: Gefährdungskonsistentes horizontales Antwortspektrum (5 % Dämpfung) der Bodenbeschleunigung für die Ortslage Breisach ( $T = 500$  Jahre, felsiger Untergrund)

Fig. 9: Uniform hazard spectrum (5 % attenuation) of horizontal ground acceleration for the site Breisach ( $T = 500$  years, hard rock)