

Erdbebengefährdung Deutschlands – neu bewertet für aktuelle Baunorm

Gottfried Grünthal, Dietrich Sromeyer, Christian Bosse, Fabrice Cotton, Dino Bindi
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

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 shaking prediction models. 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 years and delivered as uniform hazard spectra, seismic hazard maps for peak ground acceleration, spectral response accelerations and macroseismic intensities as mean, median and 84 % quantile. Examples of some elements of the input and a few basis results are shown.



Eine Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands wurde im vergangenen Jahr von einem Team der Sektion 2.6 „Erdbebengefährdung und dynamische Risiken“ des Deutschen GeoForschungszentrums GFZ veröffentlicht. Die wissenschaftliche Herausforderung bestand darin, die Unsicherheiten in allen Ausgangsmodellen und Eingangsparametern in möglichst vollem Umfang in der Analyse zu berücksichtigen, um sie erstmals für eine regionale seismische Gefährdungseinschätzung in den berechneten Erschütterungsparametern gesichert quantifizieren zu können.

Hört man von schadenverursachenden Erdbeben, hat man diese für Deutschland eher nicht im Sinn. Diese werden richtigerweise eher mit Regionen in Italien, dem östlichen Mittelmeerraum oder dem Zirkumpazifik verbunden. Trotz der relativ geringen Seismizität in Deutschland können auch hier auftretende Erdbeben ein zerstörerisches Schadensausmaß annehmen und höhere Schäden als die wesentlich häufigeren Stürme und Überschwemmungen verursachen. Daher ist in Deutschland eine entsprechende Baunorm zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf mit der Zielstellung des Bevölkerungsschutzes auch für normale Bauten bereits 1981 eingeführt worden. Für Objekte, von denen ein erhöhtes Risiko ausgeht, wie Staudämme, chemische und kerntechnische Anlagen, gelten entsprechende offizielle Regelungen zum Nachweis der Erdbebensicherheit. Dem generell relativ seltenen Auftreten zerstörerischer Beben wird in entsprechenden Regelwerken im internationalen Maßstab dadurch Rechnung getragen, dass Sicherheiten zum Konstruktionsentwurf bereits für relativ kleine Eintreffens- und Überschreitenswahrscheinlichkeiten potenziell zerstörerischer Erschütterungen normungsrelevant sind, wie 10 % Wahrscheinlichkeit innerhalb von 50 Jahren (a) Standzeit, dem eine mittlere Wiederholungsperiode (Return Period RP) von 475 a entspricht. Für Bauten mit erhöhtem Risikopotenzial, wie z. B. größere Staudämme, gelten in Deutschland Vorschriften zu Sicherheitsnachweisen für erdbebenbedingte Erschütterungen mit $RP = 2500\text{ a}$ (2 % in 50 a bzw. 4 % in 100 a) sowie für Kernkraftwerke $RP = 10^5\text{ a}$. Somit kommt dem Wissen zur Erdbebengefährdung eine besondere sicherheitsrelevante, ökonomische und versicherungswirtschaftliche Bedeutung zu mit einer großen gesellschaftlichen Verantwortung für die wissenschaftliche Erarbeitung seismischer Gefährdungsaussagen.

Links: Durch das Albstadt-Erdbeben am 3. September 1978 beschädigte und gesicherte Gebäude im Ortsteil Tailfingen (Foto: Landesstelle für Bautechnik Baden-Württemberg)

Left: Damaged buildings in Tailfingen, secured to prevent them from further damage or collapsing due to the 3 September 1978 Albstadt earthquake

Neueinschätzungen der Erdbebengefährdung werden notwendig, wenn sich signifikante Entwicklungen seitens der Methodik oder der Datenbasis ergeben haben. Da die bisherige normungsrelevante Erdbebenzonenkarte bereits 1995 seitens der zuständigen GFZ-Sektion (*Grünthal und Bosse, 1996*) an das Deutsche Institut für Normung (DIN) übergeben wurde, signalisierte der zuständige DIN-Normungsausschuss 2010, ein neues Projekt zu unterstützen. Finanzielle Förderung wurde, wie bei analogen früheren Projekten, vom Deutschen Institut für Bautechnik bereitgestellt. Von dort und dem Normungsausschuss wurden zwei Review-Teams erfahrener Bauingenieure als unmittelbare Nutzer unserer Arbeiten eingesetzt, die das Projekt permanent konstruktiv begleiteten. Die 2010 begonnenen Arbeiten wurden 2016 fertiggestellt und dem Normenausschuss zu Testzwecken übergeben. Eine ausführliche Dokumentation mit transparenter Bereitstellung des gesamten Inputs erfolgte in *Grünthal et al. (2018a, b)*. Nach intensiver Diskussion im Normungsausschuss wurden die Resultate in der Entwurfsfassung des Nationalen Anhangs (NA) des europäischen Normungswerkes DIN EN 1998-1/NA:2018-10 veröffentlicht. Nach Durchlaufen des Normungsprozederes ist geplant, den NA 2019 bauaufsichtlich einzuführen.

Sämtliche normungsrelevanten seismischen Gefährdungskarten für die Bauindustrie und den Anlagenbau wurden somit vom GFZ bereitgestellt – mit der ersten derartigen Karte von 1992. Darüber hinaus bilden diese Karten und Modelle die entsprechende Grundlage für die Versicherungsindustrie anhand von Verträgen mit der Deutschen Rückversicherung AG und dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., denn Erdbeben gehören in den Hauptbebengebieten Deutschlands für kleine Eintreffenswahrscheinlichkeiten neben Überschwemmungen und Stürmen zu den größten Verursachern von Elementarschäden.

Seismizität

Erdbebengefährdungseinschätzungen können nur so gut sein, wie die natürliche tektonische Seismizität des Untersuchungsgebiets bekannt ist mit möglichst weit in die Historie zurückreichenden und bezüglich der Magnitude harmonisierter Daten. In solche Analysen ist ein Gebiet einzubeziehen, das alle Erdbebenquellregionen umfasst, die Auswirkungen auf die Zielregion Deutschland haben, was mindestens zusätzliche 300 km ausmacht. Einen Teil des Untersuchungsgebiets zeigt die Epizentrenkarte der Abb. 1 mit einer größeren Umgebung Deutschlands (links). Diese Karte mit den katalogisierten Beben ab 1000 AD macht deutlich, dass die größte Bebenaktivität nördlich der tektonisch aktiven alpidischen Zone entlang der Rheinschiene nördlich von Basel beobachtet wird. Die rechte Karte zeigt das Zielgebiet in höherer Auflösung mit gut identifizierbaren Regionen erhöhter Bebenaktivität, wobei kein Teil als aseismisch anzusehen ist. Eine Auswahl stärkerer Beben in Deutschland samt unmittelbarer Umgebung seit 1910 wird in Tab. 1 gegeben.



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

Tab. 1: Auswahl stärkerer Beben in Deutschland samt unmittelbarer Umgebung seit 1910

Tab. 1: Selection of stronger earthquakes in Germany including their immediate surroundings since 1910

Ort (Bundesland oder Land)	Jahr	Maximale Intensität	Magnituden		Tote, beschädigte Gebäude, Schadenhöhe*
			M_l	M_w	
Albstadt (BW)	1911	VIII	6,1	5,7	6250 beschädigte Gebäude; 0,75 Mio. RM
Bad Saulgau (BW)	1835	VII-VIII	5,8	5,4	
Albstadt (BW)	1943	VII	5,6	5,3	
Euskirchen (NRW)	1951	VII-VIII	5,7	5,1	
Albstadt (BW)	1978	VII-VIII	5,7	5,2	6850 beschädigte Gebäude; 275 Mio. DM
Liège (im Osten Belgiens)	1983	VII	5,0	4,6	2 Tote, 26 Verletzte, Hunderte beschädigte Gebäude, 100 Mio. DM
Roermond (NL) / Heinsberg (NRW)	1992	VII	5,9	5,3	1 Toter, 25 Verletzte, 7200 beschädigte Gebäude, 290 Mio. DM
Rambervillers (F, Vogesen)	2003	VI-VII	5,9	4,8	10,5 Mio. €
Waldkirch/Kandelwald (BW)	2004	VI	5,4	4,6	etwa 3 Mio. €

* Schadenhöhe in jeweiliger Währung und nicht inflationsbereinigt

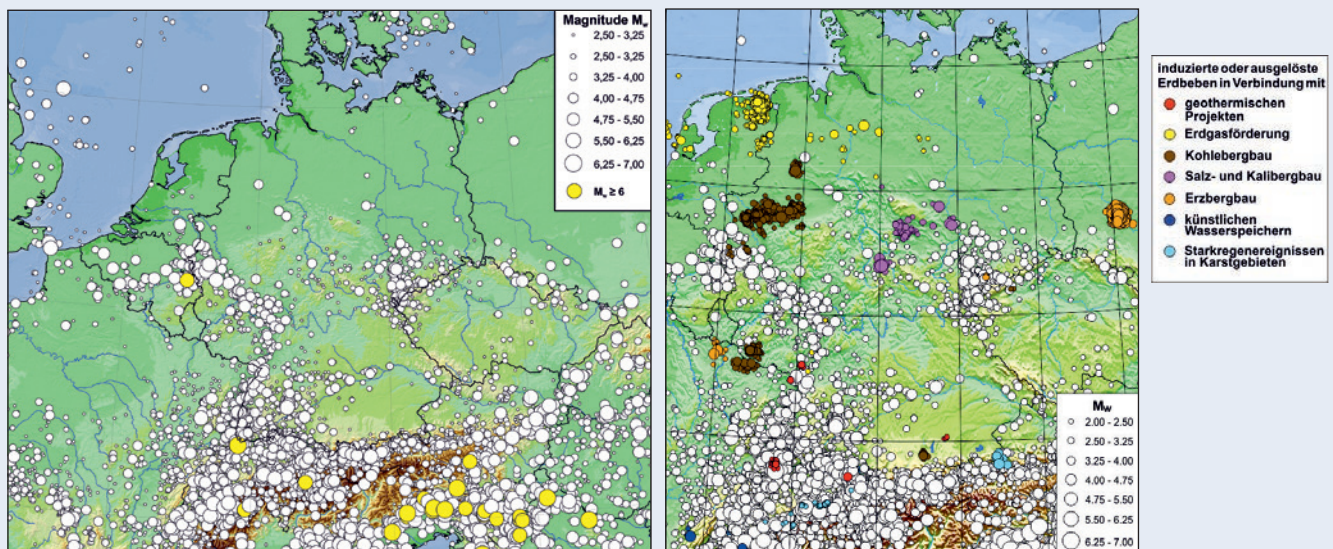


Abb. 1: Natürliche tektonische Erdbeben im Untersuchungsgebiet seit 1000 AD (links) mit gelb markierten Erdbeben für Momentmagnituden $M_w \geq 6,0$. Rechts ausschnittvergrößert mit zusätzlicher Darstellung induzierter seismischer Ereignisse nach Grünthal (2014). Datenbasis vom Europäischen-Mediterranen Erdbebenkatalog (Grünthal und Wahlström, 2012) erweitert und bis 2014 aktualisiert

Fig. 1: Natural tectonic earthquakes in the study area since 1000 AD (left) with highlighted earthquakes for moment magnitudes $M_w \geq 6,0$. Right: enlarged and with additionally depicted induced seismic events after Grünthal (2014). Database of the European-Mediterranean earthquake catalogue (Grünthal and Wahlström, 2012), updated and extended up to 2014

Zusätzlich zeigt die rechte Karte die durch menschliche Tätigkeit im Untergrund verursachte und ökonomisch hoch relevante induzierte Seismizität (Grünthal, 2014). Deren Typen werden innerhalb gut zu umreißender Zonen beobachtet. Ihre Aktivität korreliert unmittelbar mit der Intensität menschlicher Eingriffe in den Untergrund. Zudem gelingt es zunehmend, durch verbesserte Technologien die Magnituden solcher induzierter Ereignisse zu begrenzen. Diese somit stark zeitabhängige Aktivität induzierter Ereignisse ist nicht Gegenstand der Gefährdungsanalyse infolge tektonischer Beben für entsprechende Baunormen.

Anhand der beobachteten Anzahl von Erdbeben innerhalb von Klassen der Momentmagnituden M_w und der Zeitbereiche ihrer hinreichend vollständigen Katalogisierung lässt sich die jährliche Rate ihres Auftretens bestimmen. Der Reziprokwert der Rate ergibt deren mittlere RP. Abbildung 2 zeigt die kumulative Häufigkeit von Beben innerhalb von Magnitudenklassen in Deutschland inkl. eines Randsaums von etwa 10 km mit den Werten von RP für Beben der Klassenmitten von $M_w=3,5$, 4,5 und 5,5.

Das Berechnungsmodell

Im Rahmen seismischer Gefährdungsabschätzungen werden für einen vorgegebenen Punkt die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit denen zu betrachtende Bodenerschütterungsparameter erreicht oder überschritten werden. Hierfür werden ineinandergreifende geologisch-tektonische, physikalische und mathematische Modelle für die Parameter mit epistemischen Unsicherheiten entwickelt. Bezüglich der prinzipiellen methodischen Grundlagen sei verwiesen auf einen früheren Beitrag in dieser Reihe (Grünthal *et al.*, 2013) sowie im Speziellen auf Grünthal *et al.* (2018a, b). Die gesamte physikalisch, geologisch-tektonisch und logisch begründete Bandbreite des Inputs (Modelle und Ausgangsparameter) kam zur Anwendung, um das Ziel der umfassenden Berücksichtigung der Unsicherheiten erfolgreich umzusetzen. Aufbauend auf dieser Prämisse wurden die epistemischen Modellunsicherheiten in einem aus zehn Knotenebenen bestehenden Logischen Baum berücksichtigt, welcher insgesamt 4040 Endzweige mit jeweiliger Gewichtung besitzt. Für jeden dieser Endzweige war das Totale Wahrscheinlichkeitsintegral über fünf zu betrachtende Parameter mit aleatorischer Variabilität zu lösen. Die Berechnungen erfolgten für Gitterpunkte im Abstand von $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ innerhalb Deutschlands samt Randsaum, für angenommenen Festgesteinsuntergrund, für 15 vorgegebene Werte von 19 Spektralstützstellen der Antwortbeschleunigungen, Spitzenbodenbeschleunigungen (PGA) sowie makroseismischen Intensitäten und für 394 seismische Quellen. Gefährdungskonsistente Antwortbeschleunigungsspektren im Periodenbereich von 0,01 bis 3,0 s dienen im Erdbebenbauingenieurwesen als Modell für die Schwingungsantwort von Gebäuden auf Erdbebenanregungen. Somit ergeben sich $2,65 \times 10^{12}$ auszuführende Integrationen.

Eine maßgebliche Modellgruppe im Hinblick auf realistische Gefährdungsabschätzungen ist die zur Prognose magnituden- und entfernungsabhängiger Starkbodenbewegungen. Hierzu konnte auf eine neue Generation solcher Modelle zurückgegriffen werden, die zu deutlich besser abgesicherten Ergebnissen führt. Eine der vielfältigen Innovationen betraf die Entwicklung und den Einsatz einer neuen Methodik zur mathematisch korrekten Unsicherheitsmodellierung der kumulativen Raten der Magnitudenhäufigkeit in Abhängigkeit von der Diskretisierung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion maximaler Magnituden M_{max} einer seismischen Quelle (Stromeyer und Grünthal, 2015). Diese stellt *de facto* das Rückgrat probabilistischer seismischer Gefährdungsabschätzung dar. Abbildung 3 zeigt am Beispiel einer der 394 seismischen Quellen der fünf Quellenmodelle die gewichtete M_{max} -abhängige Unsicherheitsmodellierung – und zwar für die Quelle relativ geringer Aktivität „Thüringer Becken/Hessische Senke“ von einem der großräumigen Quellenmodelle.

Auswahl von Resultaten

Die Berechnungsergebnisse der probabilistischen Neueinschätzung der Erdbebengefährdung wurden in enger Abstimmung mit den Review-Teams gemäß den Erfordernissen des NA der neuen Baunorm parametrisiert. Diese Parametrisierungen lassen sich

aus den primären Resultaten für jeden Gitterpunkt in Form von Gefährdungskurven ableiten. Abbildung 4 zeigt eine typische Gefährdungskurve (am Beispiel von Köln) mit erwarteten jährlichen Auftretensraten der PGA bis 10^{-5} p. a. für alle Quantile von 1% bis 99% mit hervorgehobenen Kurven für die Median- und Mittelwerte sowie den 16%- und 84%-Quantilen.

Aus den Berechnungen der betrachteten Antwortbeschleunigungen werden gefährdungskonsistente Antwortspektren (Uniform Hazard Spectra UHS) erstellt, die in verallgemeinerter Form unmittelbar in Baunormen einfließen und den Standsicherheitsnachweisen des Erdbebeningenieurwesens zugrunde liegen. Abbildung 5 zeigt solche UHS für die drei betrachteten Gefährdungsniveaus, die für den NA gefordert sind (10%, 5% und 2% Überschreitungswahrscheinlichkeit in 50 a Standzeit, denen RP von 475, 975 und 2475 a entsprechen) am Beispiel von Aachen für Median- und Mittelwerte sowie die 16%- und 84%-Quantile. Der zuständige Normenausschuss hat die Mittelwerte anhand der Berechnungen gemäß dem Logischen Baum als normungsrelevant bestimmt.

Aus den Mittelwerten der größten Amplituden in den UHS bei Perioden von 0,1, 0,15 und 2 s folgen die Erdbebengefährdungskarten, die direkt in den NA der Norm einfließen und das Plateau der UHS repräsentieren. Abbildung 6 zeigt eine dieser Plateaukarten für RP = 475 a. Zur Verdeutlichung des Unsicherheitsbereichs sind die Karten für den Median und für das 84%-Quantil zusätzlich dargestellt. Die neuen UHS und Erdbebengefährdungskarten zeigen eine hohe Persistenz zu den früheren Resultaten.

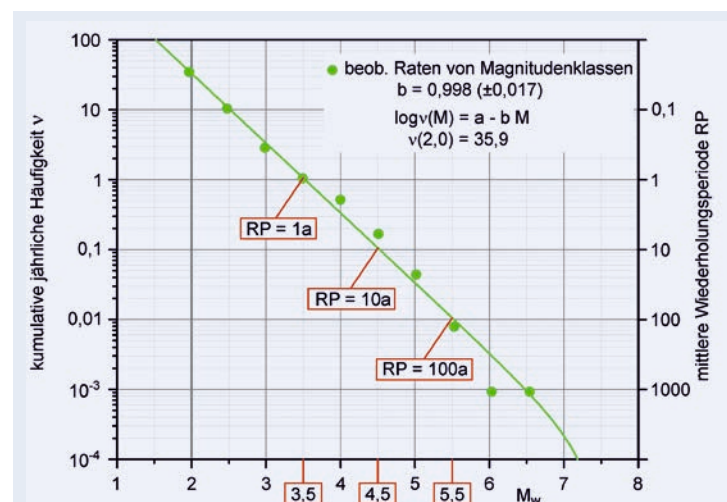


Abb. 2: Kumulative Häufigkeitsverteilung beobachteter jährlicher Raten von Erdbeben in Magnitudenklassen in Deutschland samt einem Randsaum von etwa 10 km mit den Parametern der Magnitudenhäufigkeitsverteilung sowie den mittleren Wiederholungsperioden (RP) von Beben

Fig. 2: Cumulative frequency relation of observed yearly rates of earthquakes within magnitude classes inside Germany plus a margin of about 10 km with the parameters of the frequency-magnitude relation as well as the mean return periods RP of earthquakes

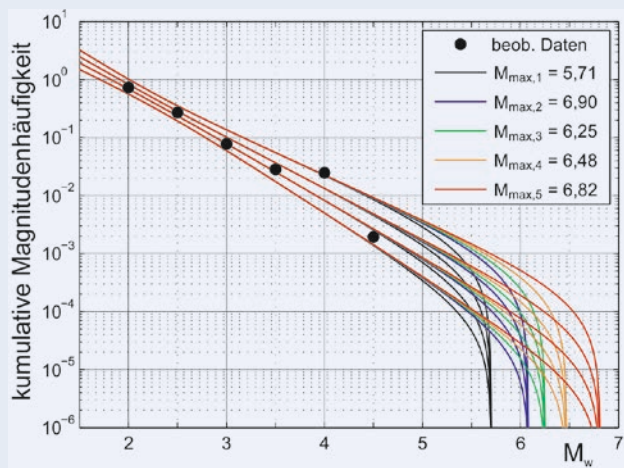


Abb. 3: Unsicherheitsmodellierung der kumulativen Raten der Magnitudenhäufigkeit in Form von vier Verteilungen in Abhängigkeit von diskretisierten Werten maximaler Magnituden M_{max} am Beispiel der seismischen Quelle „Thüringer Becken/Hessische Senke“. Beide innere Verteilungen haben das Gewicht von 0,45 und die äußeren von 0,05. Die Gewichte der $M_{max,i}$ sind gleich.

Fig. 3: Modelling of the uncertainty of cumulative rates of frequency magnitudes as four distributions depending on discretized values of maximum magnitudes M_{max} for the seismic source Thuringian basin/Hessian depression". Both inner distributions have a weight of 0.45 and both outer ones of 0.05. The weights of the $M_{max,i}$ are the same.

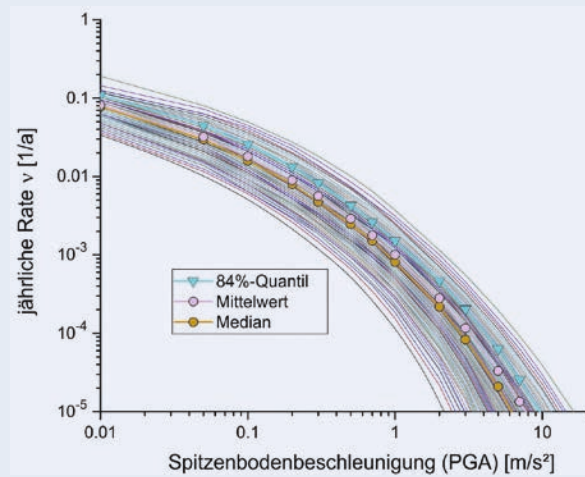


Abb. 4: Typische Gefährdungskurve, hier für Köln für PGA und alle Quantile von 1% bis 99%. Median, Mittelwerte und das 84 %-Quantil sind hervorgehoben.

Fig. 4: Typical hazard curve, here for the location Cologne for PGA for all quantiles from the 1% to 99%. Median, mean and the 84 % quantile are highlighted.

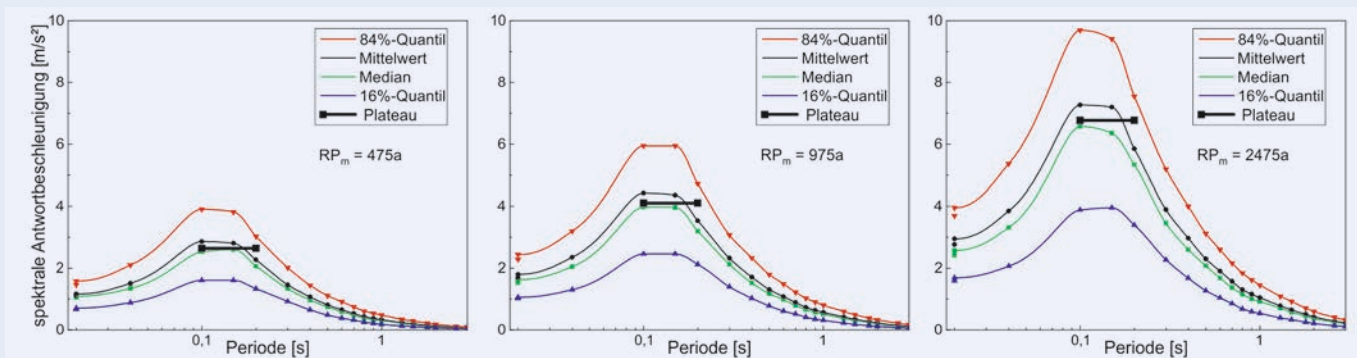


Abb. 5: UHS für Aachen für mittlere Wiederholungsperioden $RP = 475, 975$ und 2475 a für die Quantile von 16%, 50% und 84% sowie Mittelwerten. Der Periodenbereich, aus dem ein Plateaubereich für die Kartengenerierung gebildet wird, ist gekennzeichnet.

Fig. 5: UHS for the city of Aachen for mean return periods $RP = 475, 975$ and 2475 a respectively for quantiles of 16%, 50% and 84% and for mean values. The period range from which a plateau level for map generation is formed is marked.

Fazit und Ausblick

Der Fokus der hier vorgestellten Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands liegt auf einer möglichst vollständigen Einbeziehung von Unsicherheiten in allen Modellen und Ausgangsparametern. Das gestattet nicht nur die Gefährdung gesicherter einzuschätzen, sondern auch deren Unsicherheiten zu quantifizieren. Anhand der methodischen Innovationen liegen Ergebnisse vor, die dem neuesten Stand der Forschung nicht nur entsprechen, sondern ihn für schwach bis mittelstark seismisch aktive Gebiete mitbestimmen. Die Resultate bilden das ingenieurseismologische Rückgrat der neuen Baunorm zum erdbebengerechten Konstruktionsentwurf und fließen direkt in Modellierungen des Erdbebenrisikos der Versicherungswirtschaft ein. Mit diesen direkten Beiträgen der Forschungsergebnisse zur Langfristvorsorge vor einer Naturgefahr wird die unmittelbare gesellschaftliche und ökonomische Relevanz deutlich.

Die künftigen Arbeiten zu Erdbebengefährdungseinschätzungen werden sich neben permanenter Aktualisierung der Ausgangsdaten auch der Einengung der nicht unerheblichen Unsicherheiten in den Resultaten widmen. Dazu wäre die teils beträchtliche Variabilität in Ausgangsmodellen zu verringern, was anhand verbesserter Erkenntnisse z. B. zu Starkbodenbewegungen bei verschiedenen Untergrundbedingungen oder zum räumlichen Auftreten von Beben möglich wird. Zu letzterem tragen u. a. vertiefende neotektonische Untersuchungen bei.

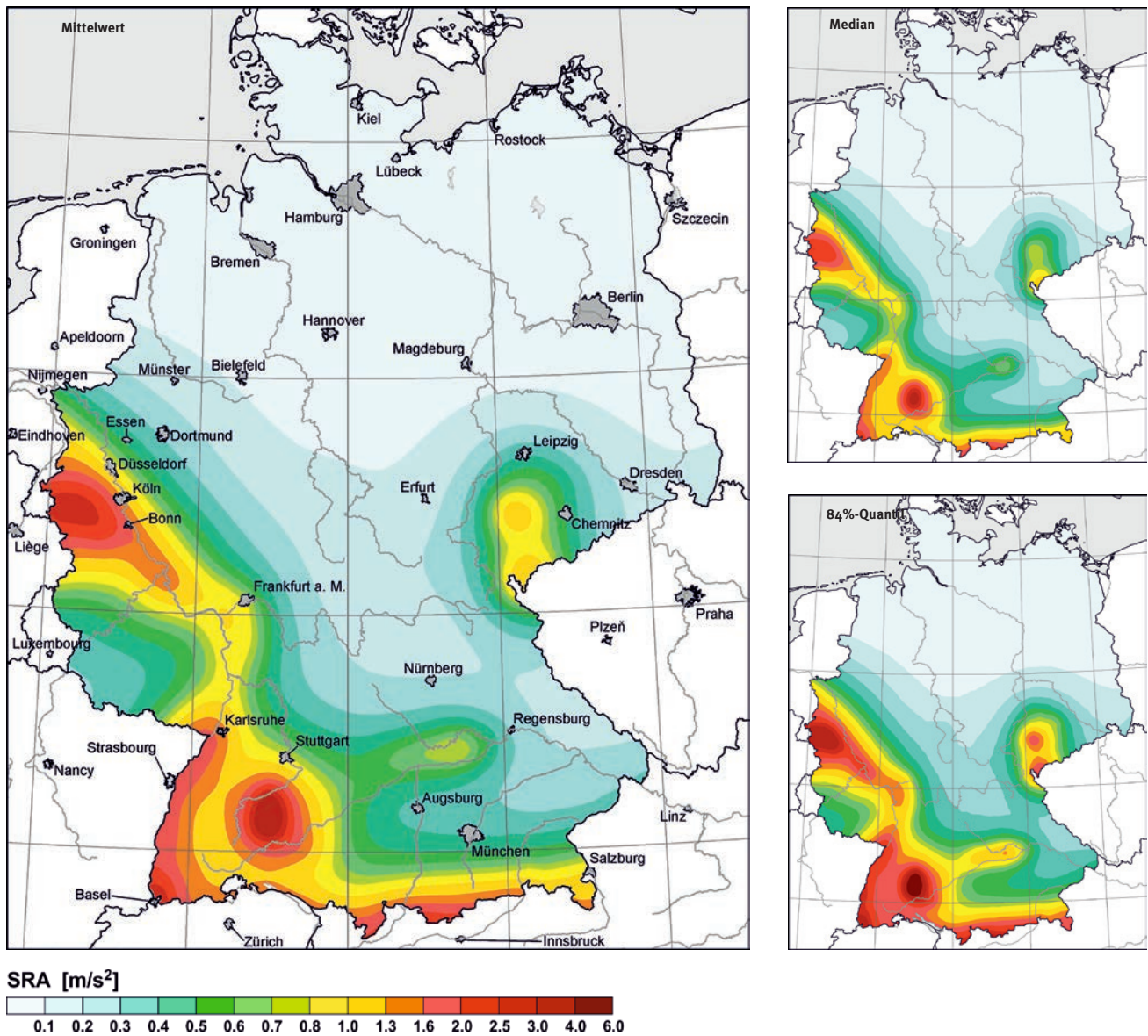


Abb. 6: Seismische Gefährdungskarten für Mittelwerte von Antwortbeschleunigungen von 0,1, 0,15 und 0,2 s (mean SRA) für die mittlere Wiederholungsperiode $RP = 475$ a; Mittelwerte aus Logischem Baum (links), Median (rechts oben) mit zugehörigem 84%-Quantil (rechts unten). Normungsrelevant ist die Karte der Mittelwerte.

Fig. 6: Seismic hazard maps for the mean values of the response acceleration amplitudes at the spectral periods of 0.1, 0.15 and 0.2 s (mean SRA) for the mean return period $RP = 475$ a; mean values according to the Logic Tree (left), median (top right) with the related 84% quantile (bottom right). The map of mean values is relevant for the building code.

Literatur

- Grünthal, G. (2014): Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. - *Geothermics*, 52, pp. 22–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.009>
- Grünthal, G., Bosse, C. (1996): Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland - Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8: Forschungsbericht, (Scientific Technical Report ; 96/10), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 24 p. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-96103>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018a): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. - *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 10, pp. 4339–4395. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018b): Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. - *Bautechnik*, 95, 5, pp. 371–384. DOI: <https://doi.org/10.1002/bate.201700098>
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Heidbach, O. (2013): Probabilistische seismische Gefährdungsabschätzungen. - *System Erde*, 3, 1, pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.03.01.8>
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - *Journal of Seismology*, 16, 3, pp. 535–570. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-012-9302-y>
- Stromeyer, D., Grünthal, G. (2015): Capturing the Uncertainty of Seismic Activity Rates in Probabilistic Seismic-Hazard Assessments. - *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, 2A, pp. 580-589. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120140185>