

Zitierung wie folgt / cite as:

Grünthal, G. (2014) Gefährdung durch Erdbeben. In: Becker, P. & Hüttl, R. (eds.):
Forschungsfeld Naturgefahren, DWD/GFZ-Publikation, Potsdam & Offenbach, 67-75.



*Erdbebenschäden in L'Aquila, Italien
(Foto: GFZ)*

Gefährdung durch Erdbeben

Prof. Dr. Gottfried Grünthal

Die Gefährdung durch Erdbeben ist in Deutschland zwar relativ gering, aber keinesfalls vernachlässigbar. Beben mit signifikanten Schäden traten bisher etwa einmal in jeder Generation auf und verlieren sich daher nur zu schnell aus dem Bewusstsein. Trotzdem gehören Erdbeben auch in unserer Region zu den Naturereignissen, die extrem hohe Kosten infolge von Schäden an Bauten und Infrastrukturen verursachen können. Eine Studie zu den Auswirkungen von Naturkatastrophen des Schweizerischen Bundesamtes für Zivilschutz ergab, dass Erdbeben

mit 35 % Anteil am möglichen Gesamtscha-den aller Naturgefährdungen in der Schweiz das dominierende Element darstellen (KATANOS, 1995) Auch in den Hauptbebengebieten Deutschlands gehören Erdbeben für kleine Eintreffenswahrscheinlichkeiten neben Überschwemmungen und Stürmen zu den größten Verursachern von Elementarschäden (Allmann et al., 1998).

Prof. Dr. Gottfried Grünthal
Helmholtz-Zentrum
Potsdam - Deutsches
GeoForschungsZentrum GFZ, Sektion 2.6
„Erdbebenge-fährdung
und Spannungsfeld“

Tab. 1a: Intensität: Eine Klassifizierung der Stärke der Bodenerschütterungen auf der Grundlage beobachteter Effekte in einem begrenzten Gebiet wie einer Ortschaft. Klassifiziert werden Effekte auf Menschen, Objekten in Häusern sowie das Ausmaß an Gebäudeschäden. Intensitäten sind ein robustes Maß zur Stärkeklassifizierung, unterteilt in 12 Intensitätsgrade:

Intensität	Merkmal
I	nicht gefühlt
II	vereinzelt gefühlt
III	schwach
IV	größtenteils beobachtet
V	stark
VI	leichte Schäden
VII	schadenbringend
VIII	stärker schädigend
IX	zerstörend
X	sehr zerstörend
XI	verwüstend
XII	vollständig verwüstend

Seismizität

Nördlich des Alpidischen Raums, d. h. nördlich der Alpen und des Karpatenbogen, weist Deutschland die größte Beben-tätigkeit Europas auf. Abb. 1 zeigt die Seismizität Deutschlands samt Randgebieten. Eine Auswahl der stärksten Beben Deutschlands seit 1750 gibt die Tab. 1b, wobei in historischer Zeit die Intensität VIII bisher nicht überschritten wurde. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ereigneten sich innerhalb Deutschlands jeweils fünf Erdbeben mit einer maximal beobachteten Intensität $I_0 = \text{VIIVIII}$ bzw. $I_0 = \text{VIII}$ sowie mit Lokalbebenmagnituden $ML \geq 5,7$. Die Schäden bei einer Intensität VIII sind gemäß Europäischer Makroseismischer Skala EMS-98 (Grünthal, 1998) stark vereinfacht wie folgt zu beschreiben: „An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf; d. h. Giebelteile und Dachsimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.“

Die Epizentrenkarte der beobachteten Beben-tätigkeit Deutschlands (Abb. 1) verdeutlicht, dass die Bebenherde flächenmäßig nicht gleich verteilt sind, sondern sich in Zonen erhöhter Bebenaktivität konzentrieren. Die höchste Bebenaktivität weist das Rheingebiet als Schwächezone in der Erdkruste auf, welche sich im Norden bis in das niederlän-

im Raum	Jahr	max. Intensität	Magnituden		Tote, beschädigte Gebäude und Schadenshöhe
			M _L	M _w	
Düren (östl. Aachen)	1756	VIII	6,1	5,8	Tote
Tollhausen (westl. Köln)	1878	VIII	5,9	5,6	Tote
Albstadt (südl. Tübingen)	1911	VIII	6,1	5,7	6250 beschädigte Gebäude; 0,75 Mio. RM
Bad Saulgau (nordöstl. Konstanz)	1935	VII-VIII	5,8	5,4	
Albstadt	1943	VIII	5,6	5,3	
Euskirchen (westl. Bonn)	1951	VII-VIII	5,7	5,1	
Albstadt	1978	VII-VIII	5,7	5,2	6850 beschädigte Gebäude; 140 Mio. Euro
Liège (östliches Belgien)	1983	VII	5,0	4,6	2 Tote, 26 Verletzte; Hunderte beschädigte Häuser; 50 Mio. Euro
Heinsberg/ Roermond (Niederlande)	1992	VII	5,9	5,3	1 Toter, 25 Verletzte; 7200 beschädigte Gebäude; 145 Mio. Euro
Rambervillers (Frankreich, Vogesen)	2003	VI-VII	5,9	4,8	10,5 Mio. Euro
Waldkirch/ Kandelwald (Schwarzwald)	2004	VI	5,4	4,6	ca. 3 Mio. Euro

Tab. 1: Ausgewählte Schadenbeben in Deutschland samt Randgebieten seit 1750 (Daten aus Grünthal & Wahlström, 2012)

dische Limburg und nach Belgien fortsetzt. Einen Seismizitätsschwerpunkt im Nieder- rheingebiet stellt der Raum Aachen-Düren dar. Im Mittelrheingebiet zeigt das Gebiet um Koblenz die höchste Bebenaktivität. Das nördliche Oberrheingebiet zeigt im Gebiet Rheinstetten-Rastatt erhöhte Seismizität - der südliche Teil des Oberrheingrabens im Raum Strasbourg sowie in seinem südlichen Teil. Die Bebenzone der Schwäbischen Alb mit dem Schwerpunkt Albstadt wurde mit einem der größten Beben Deutschlands im Jahre 1911 aktiviert. Mit den weiteren Schadenbeben in den Jahren 1943 und 1978 setzte diese lokale eng begrenzte Seismizitätszone den weitaus größten Teil der Bebenenergie des 20. Jahrhunderts in Deutschland frei. Mit zusätzlichen Herdgebieten bei Bad Saulgau,

südwestlich von Donaueschingen und im Schwarzwald ist Baden-Württemberg das bebenaktivste Bundesland. Ein anderes Bebengebiet erstreckt sich über Ostthüringen und den westlichen Teilen Sachsens vom Schwarmbebengebiet des Vogtlandes über den Raum Gera bis nach Leipzig. Das in historischer Zeit stärkste Beben dieses Raumes ereignete sich 1872 östlich Gera mit einer Intensität von VII. Im Vogtländischen Schwarmbebengebiet werden zu Zeiten hoher Bebenaktivität Tausende sehr schwacher Beben registriert, wobei die jeweils stärksten Ereignisse eines Schwarmes gerade so stark sind, dass schwächste Schäden auftreten (als stärkstes instrumentell beobachtetes Beben 1985 mit $M_w = 4,3$, $I_0 = VI$). Als Beben- gebiet von untergeordneter Bedeutung wäre

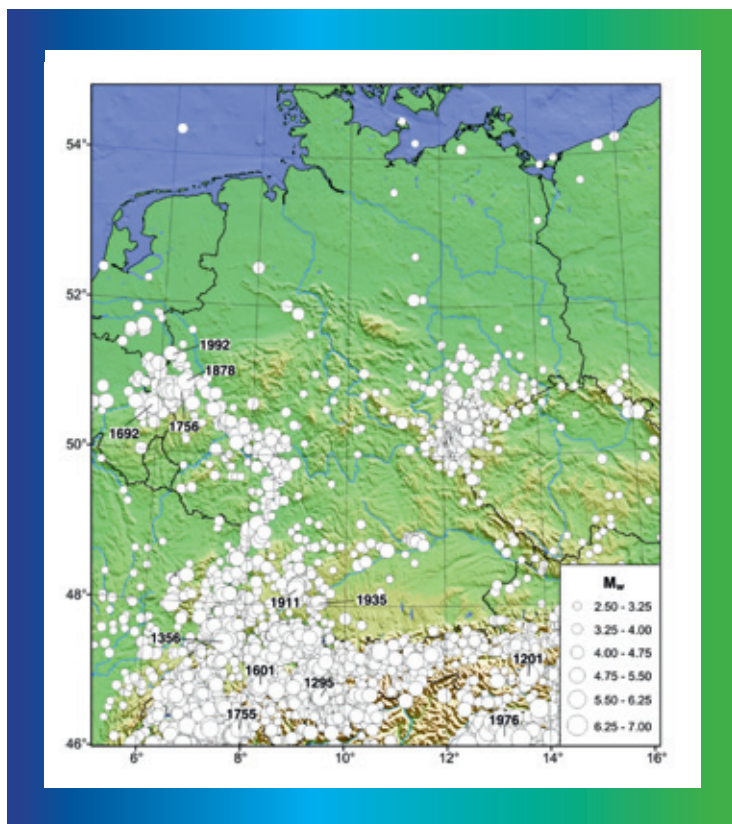
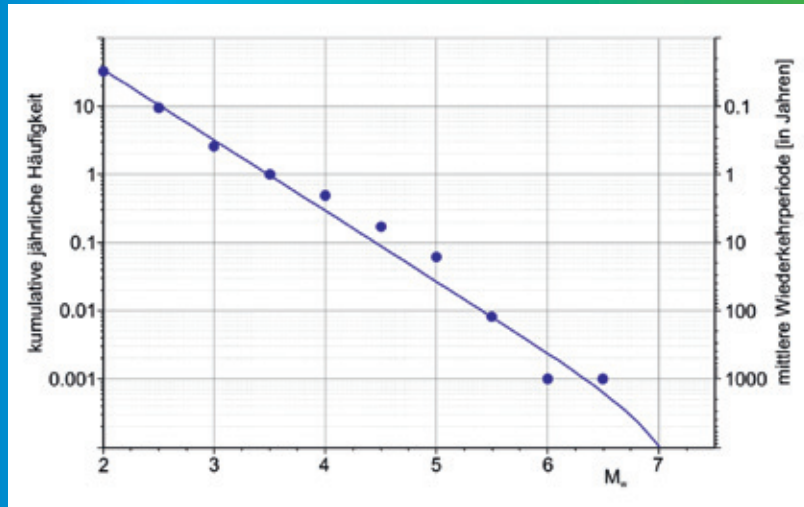


Abb. 1: Natürliche tektonische Erdbeben von 1000 AD bis 2010. Die Daten entstammen der Datenbank zum Europäischen-Mediterranen Erdbebenkatalog EMEC (Grünthal & Wahlström, 2012) mit Jahresangaben für ausgewähltere stärkere Beben.

Abb. 2: Jährliche kumulative Häufigkeit von Erdbeben in Deutschland samt eines Randsaumes von ca. 10 km. Die rechte Achse zeigt als Reziprokwert die zugehörige mittlere Wiederkehrperiode.



schließlich die Seismizitätszone des Raumes Nördlingen-Donauwörth zu erwähnen mit Beben bis zur Intensität VII. Die übrigen Gebiete Deutschlands sind allerdings nicht bebenfrei, weisen aber nur eine sehr geringe Beben-tätigkeit auf, wie z. B. das leichte Schäden verursachende Bielefelder Beben von 1612 oder ein schadloses aber heftig wahrgenommenes Beben im Jahre 2001 südöstlich von Rostock.

Die Erdbeben ereignen sich in Deutschland hauptsächlich im Tiefenbereich von 5 bis 20 km mit dem Schwerpunkt der seismischen Energiefreisetzung in ca. 10 km. Zur Erfassung der Beben-tätigkeit ist derzeit ein ca. 100 Registrierorte umfassendes Seismometernetz in Betrieb. Die ersten Seismographen wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Aus vorinstrumenteller Zeit existieren z. T. außerordentlich detaillierte Berichte über Bebenwahrnehmungen oder beobachteter Schäden in zumeist städtischen Chroniken. Diese Quellen erlauben die Erweiterung des Bebenkatalogs bis zu den Anfängen historischer Aufzeichnungen zu Zeiten der Karolinger zur Mitte des 8. Jahrhunderts. Anhand paläoseismologischer Untersuchun-

gen im Niederrheingebiet wurde eine Anzahl relativ starker Beben bis zu Magnituden von $M_w = 6,8$ nachgewiesen, die sich dort in der jüngsten geologischen Vergangenheit und vor dem 10. Jahrhundert ereigneten und sich als Versatzbeträge in jüngsten sedimentären Ablagerungen manifestieren.

Katalogeinträge werden umso unvollständiger, je weiter man in die Historie zurückblickt. So sind in Deutschland Beben ab $M_w = 2$ ab ca. 1974 hinreichend vollständig erfasst, $M_w = 4$ ab ca. 1865 und $M_w = 6$ ab ca. 1250 (Grünthal et al., 2013). Hieraus folgt die Darstellung der jährlichen Häufigkeit von Bebenmagnituden M_w in Deutschland inklusive eines Randsaumes von ca. 10 km (Abb. 2). Danach ist im langjährigen statistischen Mittel eine Magnitude $M_w \geq 3,5$ etwa einmal im Jahr zu erwarten, $M_w \geq 4,5$ ca. aller 11 Jahre und $M_w \geq 5,5$ ca. aller 125 Jahre.

Neben natürlichen, tektonischen Erdbeben werden induzierte, d.h. durch menschliche Aktivitäten bedingte seismische Ereignisse beobachtet. Hierzu gehören in Deutschland und unmittelbar benachbartem Ausland induzierte

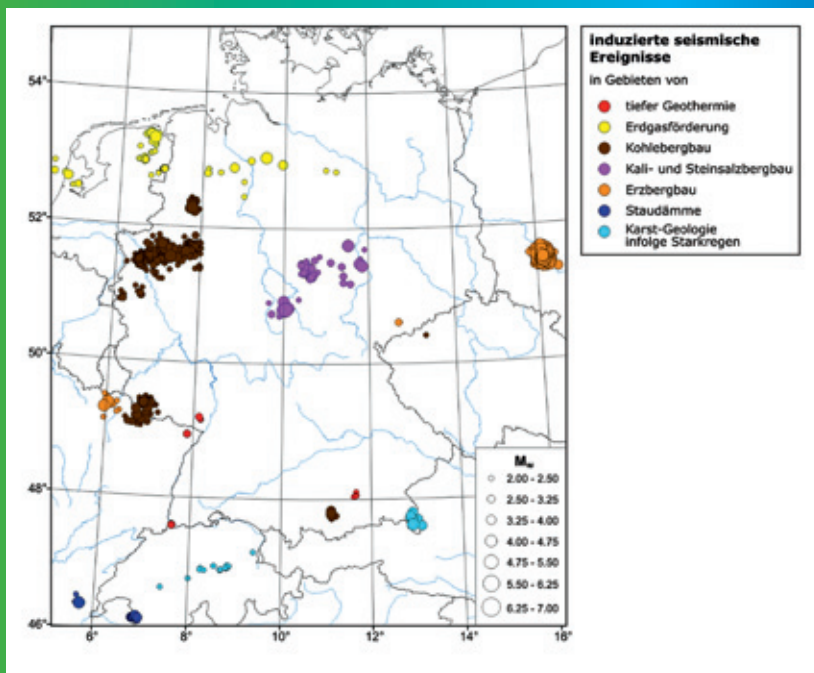


Abb. 3: Die Epizentren der induzierten seismischen Ereignisse unterteilt in sieben Typen entsprechend Legende (nach Grünthal, 2013).

seismische Ereignisse im Zusammenhang mit Stein- und Kalisalzabbau (bis zu $M_w = 5,4$ beobachtet), Kohlebergbau (bis $M_w = 4,1$), Erdgasförderung (bis $M_w = 4,3$), geothermischer Energiegewinnung (bis $M_w = 3,2$) infolge Erzbergbau (bis $M_w = 4,5$) sowie in Verbindung mit Dämmen größerer Stauhöhen (bis $M_w = 4,5$). Weiterhin treten in einigen Karstgebieten induzierte Erdbeben infolge Starkregen auf. Die Epizentren sämtlicher Typen induzierter seismischer Ereignisse zeigt Abb.3. Bezüglich Details sei auf den Übersichtsartikel von Grünthal (2013) verwiesen.

Erdbebengefährdung und Baunormen

Ein adäquater nachhaltiger Schutz vor Auswirkungen von Erdbeben wird durch die Einführung geeigneter ingenieurtechnischer Maßnahmen erreicht. Aus ökonomischen

Gründen werden derartige Sicherheitsvorkehrungen nur in dem Maße eingeführt, wie diese für vorgegebene Eintreffenswahrscheinlichkeiten von Baunormen gefordert sind. Bodenbewegungsamplituden für quasi beliebige Eintreffenswahrscheinlichkeiten werden im Rahmen von wahrscheinlichkeitstheoretischen Abschätzungen der Erdbebengefährdung ermittelt. Diese beruhen auf einer Reihe unterschiedlicher Eingangsparameter sowie statistischer Modelle zum Auftreten von Beben und stellen eine anspruchsvolle geowissenschaftliche Aufgabe dar. Insbesondere bedeutet die Berücksichtigung sämtlicher Unsicherheiten in allen Ausgangsdaten und Modellen eine Herausforderung in der Gefährdungsberechnung.

Die seismologische Grundlage für die erdbebengerechte Norm für normale Hochbauten DIN 4149:2005-04 bildet die Einschätzung der

Erdbebengefährdung Deutschlands gemäß Abb. 4, aus der die seismische Zonierungskarte der Norm direkt abgeleitet wurde (Grünthal et al., 1998; Grünthal, 2005). Die Internet-Plattform zur Abfrage der Zugehörigkeit aller Orte in Deutschland samt der anzuwendenden Lastannahmen gemäß o.g. Norm findet sich unter http://www.gfz-potsdam.de/DIN4149_Erdbebenzonenabfrage. Für die Versicherungswirtschaft ist die Karte auf der entsprechenden Internet-Plattform des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft eingestellt unter www.zuers-public.de.

Für die sogenannte „Wasserbaunorm“ DIN 19700-10:2004-07 für Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken gelten in Abhängigkeit vom Schutzziel und der Sicherheitsklasse der Anlagen mittlere Wiederholungsperioden von 100, 500, 1000 und 2500 Jahre, für die entsprechende Nachweise vorzunehmen sind (Grünthal, 2008; Grünthal et al., 2009). Eine der in diese Norm eingehenden seismischen Gefährdungskarte zeigt die Abb. 5. Unter dem Link www.gfz-potsdam.de/DIN19700 können entsprechende Antwortspektren für den Sicherheitsnachweis für jeden Koordinatenpunkt in Deutschland für die vier Gefährdungsniveaus der Norm interaktiv abgefragt werden.

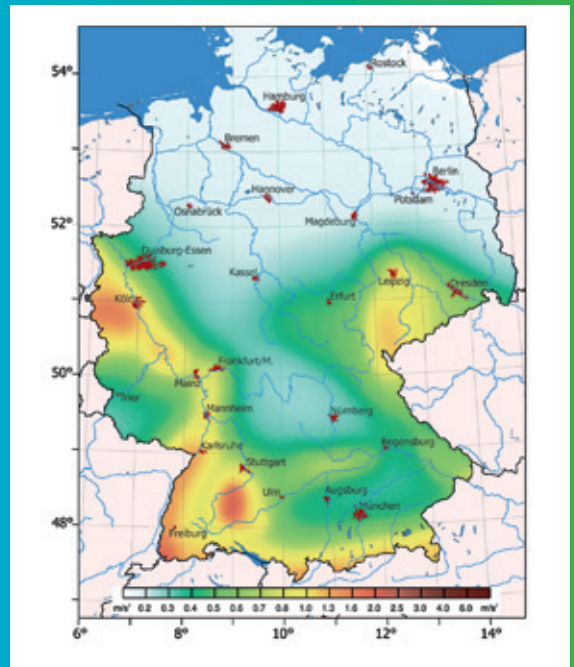
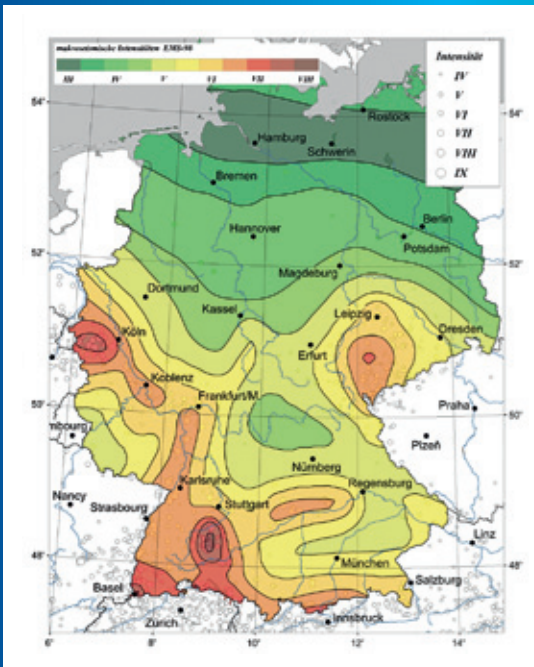


Abb. 4.: Probabilistische Erdbebengefährdungskarte für die Bundesrepublik Deutschland in Form berechneter Intensitäten für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90 % in 50 Jahren Standzeit nach Grünthal et al. (1998), welche direkt in die Erdbebenzonenkarte der DIN 4149:2005-04 bzw. der Euronorm DIN EN 1998-1/NA:2011-01 überführt wurde.

Abb. 5.: Probabilistische Erdbebengefährdungskarte für die Bundesrepublik Deutschland in Form der Antwortbeschleunigung bei 2,5 Hz für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 96 % in 100 Jahren Standzeit (Felsuntergrund, 50% Fraktile) als Bestandteil der DIN 19700-10:2004-07 (aus Grünthal et al., 2009)

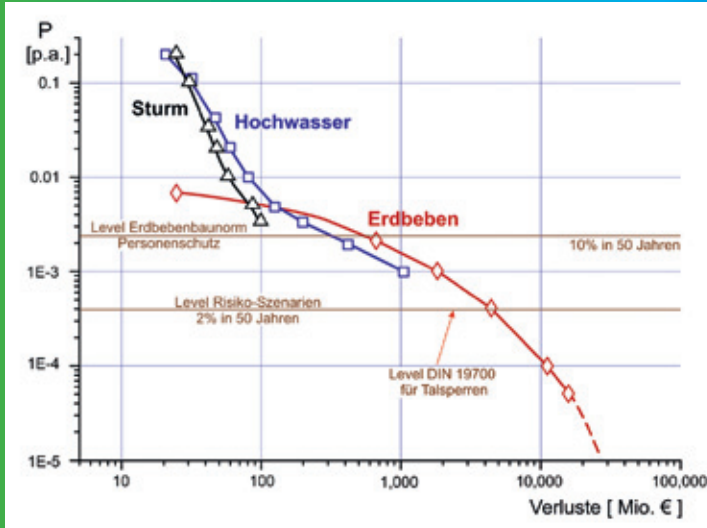


Abb. 6: Risikokurven für Hochwasser, Erdbeben und Sturm für Köln unter Berücksichtigung der Schäden an Gebäuden und in den Bereichen Privathaushalte, Handel und Industrie (nach Grünthal et al., 2006)

Erdbebenrisiko

Abschätzungen des Erdbebenrisikos im Form monetärer Verluste durch Erdbebenschäden gestatten direkte Vergleiche mit Risiken durch weitere Naturgefährdungen, die auf einen Ort einwirken. Werden derartige Abschätzungen für verschiedene Gefährdungsniveaus vorgenommen, lassen sich Risikokurven für einen breiten Bereich von jährlichen Eintreffenswahrscheinlichkeiten betrachteter Naturgefährdungen miteinander vergleichen. Eine der ersten derartigen Risiko-Synopsen ist für die Stadt Köln vorgenommen worden (Abb. 6), wobei die monetären Auswirkungen infolge Hochwasser, Stürmen und Erdbeben verglichen wurden (Grünthal et al., 2006).

In der Risikobewertung für relativ häufige Ereignisse bis zu Eintreffenswahrscheinlichkeiten von etwa $5 \cdot 10^{-3}$ p.a. dominiert aufgrund der exponierten Lage Kölns am regelmäßig Hochwasser führenden Rhein das Hochwasserrisiko, gefolgt vom Risiko durch Stürme. Schadenbeben spielen für Köln bis

zum Wahrscheinlichkeitsniveau von $5 \cdot 10^{-3}$ p.a., dem eine mittlere Wiederholungsperiode T von 200 Jahren entspricht, keine Rolle. Dagegen dominieren für mittlere Wiederholungsperioden $T \geq 200$ Jahren die Erdbeben das Risikopotential durch Naturgefahren. Zumindest scheint das Risiko infolge Erdbeben und Hochwasser für derartige Werte von T etwa ähnlich groß ausgebildet zu sein.

Unsicherheiten und Forschungsbedarf

Einschätzungen zur Gefährdung und zum Risiko infolge Erdbeben sind mit erheblichen Fehlern verbunden, die u.a. dadurch bedingt sind, dass die Wiederholungsrate stärkerer Beben in ihren Herdgebieten größer ist als der Zeitraum gesicherter Beobachtungsreihen. Daher sind nicht nur die seismologischen Registriernetze mit mindestens den derzeitigen Standards fortzuführen, sondern wäre auch die historische Seismizität insbesondere vor 1800 einer systematischen quellenkritischen Analyse analog zu Arbeiten in den südlichen und westlichen Nachbarländern zu unterzie-

hen. Das Netz der Starkbodenbewegungsaufzeichnungen ist auszubauen und die Daten wissenschaftlichen Zwecken zugänglich zu machen, um entsprechende Abminderungsmodelle anhand hauptsächlich südosteuropäischer und italienischer Daten besser auf mitteleuropäische Verhältnisse anzupassen. Völlig fehlen systematische bundesweite neotektonische Untersuchungen zu den Ursachen der Beben in Verbindung mit hochpräzisen geodätischen Langzeitbeobachtungen zur Erfassung zuverlässiger Straindaten. Schließlich sind methodische Untersuchungen voranzutreiben, um Unsicherheiten in allen Ausgangsdaten und Berechnungen in korrekter Weise quantifizieren zu können sowie Unsicherheiten weiter einzuengen.

Literatur

- Allmann, A., Rauch, E., Smolka, A. (1998) *New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe: Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. Proceedings of the 11th Conference on Earthquake Engineering*, Rotterdam, Balkema, 7 S.
- DIN 19700-10:2004-07 (2004) *Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin*
- DIN 4149:2005-04 (2005) *Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Beuth Verlag GmbH, Berlin*
- 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, Beuth Verlag GmbH, Berlin*
- 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 STR 09/07, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, 81 S.
- Grünthal, G. (2005) *Die Erdbebenzonenkarte als Bestandteil der neuen DIN 4149. In: Tagungsband der DGEB/DIN-Gemeinschaftstagung ‘Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - die neue DIN 4149’, Beuth Verlag, Berlin, Leinfelden-Echterdingen/Germany, S. 3-24*
- Grünthal, G. (2008) *Erdbebengefährdungskarten für die Bemessung von Stauanlagen nach DIN 19700. In: Erfahrungsaustausch Betrieb von Hochwasserrückhaltebecken in Baden-Württemberg. Berichtsband 14. Jahrestagung ‘Sicherheitsrelevante Einwirkungen auf Hochwasserrückhaltebecken - Extreme Betriebszustände’, Stuttgart, 20. November 2007, WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, Karlsruhe, S. 25-29*
- Grünthal, G. (2013) *Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. Geothermics Special Issue (submitted)*
- Grünthal, G. (ed) (1998) *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 S.*
- Grünthal, G., Hakimhashemi, A., Bosse, C. (2013) *Magnitude dependent temporal completeness of catalogued earthquakes in the European-Mediterranean area. Journal of Seismology (in preparation)*

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., Thieken, A., Schwarz, J., Radtke, K., Smolka, A., Merz, B. (2006) *Comparative Risk Assessments for the City of Cologne – Storms, Floods, Earthquakes. Natural Hazards* 38(1-2): 21-44

Grünthal, G., Wahlström, R. (2012) *The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. Journal of Seismology* 16(3): 535-570

KATANOS (1995) *Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht. Bundesamt für Zivilschutz*, 77 S.

Glossar

Antwortbeschleunigung

Darstellung wie im Antwortspektrum, jedoch für nur eine Schwingungsfrequenz.

Antwortspektrum

Darstellung der maximalen Amplituden einer Serie von Einmassenschwingern unterschiedlicher Eigenfrequenz und konstanter Dämpfung als Antwort auf Bodenbeschleunigungsanregungen an deren Fußpunkt.

Epizentralintensität I_0

maximale Intensität über oder nahe dem Erdbebenherd.

Erdbebengefährdung

Wahrscheinlichkeit des Auftretens potenziell zerstörender seismischer Bodenbewegungen an einem bestimmten Ort und in einem bestimmten Zeitintervall.

Erdbebenrisiko

Erwarteter summarischer Verlust infolge Erdbeben; errechnet sich aus der Erdbebengefährdung, der Verletzbarkeit (Vulnerabilität) von z.B. Bauten infolge Erdbeben und den monetären Werten, die der Gefahr ausgesetzt sind.

Lokalbebenmagnitude M_L

Eine auf der Magnitudendefinition von Richter basierende Magnitudenbestimmung anhand maximaler Amplituden bis in ca. 600-1000 km Entfernung.

Magnitude M

Instrumentelles Maß zur Stärkebestimmung von Beben, eingeführt von Charles Richter 1935. Wird aus dem Logarithmus des maximalen Ausschlages von Seismographen unter Berücksichtigung der Entfernung zum Erdbebenherd bestimmt.

Momentmagnitude M_w

Ein physikalisch begründetes und mit übrigen Magnitudenarten abgestimmtes Stärkemaß auf der Grundlage eines mechanischen Modells einer aktivierten Störungsfläche als Reaktion auf eine Spannungsbeanspruchung.