11

98. Jahrgang November 2021, S. 826-837 ISSN 0932-8351

Sonderdruck

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



- DIN EN 1998-1/NA-2021 im Kontext der Normenentwicklung
- Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland
- Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021
- Erdbebennachweis von Mauerwerksbauten
- Out-of-plane-Verhalten von nichttragenden Mauerwerkswänden
- Nachweis gegen Bodenverflüssigung
- Einführung des Eurocodes 8 in der Schweiz
- CO2-Reduktion in der gebauten Umwelt
- Nachruf auf Jörg Schlaich



Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland: Bodenbewegungen und Schütterwirkungen

Der Beitrag stellt die rezente Erdbebentätigkeit auf dem Gebiet Deutschlands der letzten Jahre, beginnend mit 2002 bis einschließlich 2019 vor. Für ausgewählte Erdbeben (Alsdorf 2002, Waldkirch 2004, Goch 2011, Nassau 2011) werden Messungen der Bodenbewegung aufbereitet und für ausgewählte Zeitverläufe mit der Untergrundsituation der aktuellen und bisherigen Erdbebennorm DIN EN 1998-1/NA in Korrelation gebracht. Wie an Beispielen gezeigt werden kann, haben die gewonnenen Bodenbewegungen bis dato nicht die durch die Gefährdungskarten (mit der Wiederholungsperiode von 475 Jahren) vorgegebenen Kenngrößen erreicht. Für ausgewählte Zeitverläufe werden exemplarisch gemessene Bodenbewegungen und die beobachtete makroseismische Intensität in Bezug gebracht. Die Untersuchung der max. beobachteten Bodenbewegungsgrößen sowie der makroseismischen Wirkungen ist für Anwendungen im ingenieurseismologischen Bereich von hohem Interesse, v. a. für die realistische Abschätzung der Bodenbewegung in gering bis moderat seismisch aktiven Gebieten wie Deutschland. Für die gewählten Ereignisse werden Schütterkarten (ShakeMaps) ermittelt, die die potenziellen Schütterwirkungen (makroseismische Intensität) abbilden.

Stichworte Erdbeben; Deutschland; seismische Messungen; Bodenbewegung; Erdbebengefährdung

1 Vorbemerkung

Die Erdbebenbaunormung ist in ihrer anfänglichen Entwicklung untrennbar verbunden mit dem Auftreten schwerer Erdbeben und dem Ziel, Schäden an Bauwerken künftig zu verhindern oder zumindest so begrenzen, dass Gefahren für Menschenleben ausgeschlossen werden. Nach dem schweren Erdbeben (Magnitude $M_{\rm L}$ 5,7) vom 3. September 1978 in Albstadt wurde letztlich die Richtlinie für das Land Baden-Württemberg nahezu wortgleich in die DIN 4149:1981 [1] überführt. Beim Erdbeben 1978 an der Station Jungingen gewonnene Registrierungen erwiesen sich als nicht ausreichend vertrauenswürdig; sie lagen zudem nicht von allen Komponenten der Bodenbewegung vor. Sie wurden aber bei den Vorarbeiten zur Neufestlegung der Spektren für DIN 4149:2002 [2] neben den Starkbebenregistrierungen aus Italien [3] als Eingangsgrößen für die Modellrechnungen an Untergrundprofilen mit berücksichtigt. Abschätzungen der max. Bodenbewegungskenngrößen und Extrapolationen auf größere Magnituden wurden von [4] vorgenommen. Diese blieben aber aufgrund der relativ hohen Beschleunigungswerte (im Bereich von 2,0-3,0 m/s²) als akademische Überlegung – ohne Datengrundlage – ausgeblendet;

Recent earthquake activity in Germany: registered ground motions and shaking effects

The article presents the recent earthquake activity on the territory of Germany of the last years, starting with 2002 up to and including 2019. Ground motion measurements are processed and for selected time histories correlated with the subsurface situation of the current and previous earthquake standard DIN EN 1998-1/NA for selected earthquakes (Alsdorf 2002, Waldkirch 2004, Goch 2011, Nassau 2011). For the selected earthquakes, samples of measured ground motions and the observed macroseismic intensity are correlated. The investigation of the maximum observed ground motion magnitudes as well as the macroseismic effects is of high interest for applications in the field of engineering seismology, especially for the realistic estimation of ground motion in low to moderate seismic regions like Germany. Shake maps are determined for the selected events, which show the potential shaking effects.

Keywords earthquake; Germany; seismic measurements; ground motion; earthquake hazard

zumal sich die Normung bereits damals mit Fragen der (vermeintlich zu hohen) Einwirkungsgrößen konfrontiert sah und es üblich war, die Bauwerksauslegung auf die nach der Bauwerksklasse und Gefährdung (Zone) zulässige Abminderung auszurichten. Diese Abminderung war auch noch für die ersten Entwürfe zum EC 8 inhaltlich bestimmend und führte zur Aufnahme des Konzepts der Effektivbeschleunigungen [5].

Die Historie der Erdbebenbaunormung ist bez. der Einwirkungen auch dadurch gekennzeichnet, dass gemessene Bodenbewegungen oft im Widerspruch zu den Normvorgaben standen und insbesondere die untergrundspezifischen Verstärkungseffekte und die damit erklärbaren Versagensfälle die Überarbeitung der Normen in diesem Teilaspekt erforderten.

Solche Erfahrungswerte liegen für die deutschen Erdbebengebiete insgesamt aufgrund des Nichteintretens von Starkbebenereignissen nicht vor. Insofern standen die konstruktiven Bauwerksanforderungen noch nicht auf dem Prüfstand, und es wäre vermessen zu behaupten, dass sich die Normenfestlegungen der letzten Jahrzehnte als belastbar bewährt hätten. Vielmehr tragen die dichter werdenden Messnetze zu einem besseren Verständnis der seismischen Bodenbewegung bei, die in Form von Bodenbewegungsmodellen (Ground Motion Prediction Equations, GMPE) verallgemeinert werden.

Für die Normungsarbeit eher sekundär, dennoch unverzichtbar ist es, die rezente Erdbebentätigkeit zu verfolgen und zu prüfen, ob die durch die Norm bereitgestellten Gefährdungskarten tatsächlich die relevanten Gebiete abdecken und/oder ob die bei schwächeren Erdbeben beobachteten Effekte (Schütterwirkungen) durch in der Norm verankerte Grundsätze der konstruktiven Durchbildung und die Nachweiskriterien abgedeckt werden. Eine solche Diskussion fand aus Ingenieurperspektive letztmals im Nachgang zum Erdbeben vom 17. Mai 2014 in Nieder-Beerbach statt [6].

Als eine Standardaufgabe der in den Ländern zuständigen Behörden darf gefordert werden, die bei schwächeren Ereignissen gewonnenen Erdbebenregistrierungen in den Normenkontext zu stellen. Ein erster Schritt in diese Richtung wird für das Roermond-Erdbeben 1992 durch [7, 8] und bez. der Messdaten und mit Bezug zur Normklassifikation ausgewählten Stationsstandorten im Beitrag von [9] zum Messnetz in NRW geleistet.

Der Beitrag widmet sich beiden Aspekten: der rezenten Erdbebentätigkeit und der Verfügbarkeit von Messdaten. Mit der Auswertung ausgewählter Messdaten und ihrer Einordung in die intensitätsbezogenen Schüttergebietskarten soll angedeutet werden, wie das Aufgabenspektrum zwischen Erdbebenmonitoring und Normung durch Elemente der Plausibilitätskontrolle bereichert und qualifiziert werden kann.

2 Rezente Erdbebentätigkeit 2002–2019 in Deutschland

2.1 Stationen und Datenverfügbarkeit

Bild 1 stellt die rezente Erdbebentätigkeit (tektonische Ereignisse; Lokalbebenmagnitude $M_L \ge 2,0$) auf dem Gebiet Deutschlands der letzten Jahre, beginnend mit 2002 bis einschließlich 2019, dar. Diese werden in Bezug zur DIN EN 1998-1/NA (2021) [10] und dem Eingangsparameter der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich $S_{ap,R}$ für felsigen Untergrund (A-R) gesetzt. Bild 1 bestätigt die Seismizität in den Haupterdbebenzonen der Schwäbischen Alb, dem Grenzgebiet zur Schweiz und zu Österreich, dem Rheingraben folgend in nördlicher Richtung bis zur Niederrheinischen Bucht sowie weiter östlich im Vogtland. Seismische Aktivität ist auch außerhalb dieser Gebiete zu verzeichnen.

In den vergangenen 20 Jahren ist eine eher geringe bis moderate Erdbebentätigkeit zu beobachten. Wie Bild 2 zu entnehmen ist, erreichen nur zwei Ereignisse eine Magnitude M_L von 5,0 bzw. 5,5 sowie weitere 26 Ereignisse $M_L \ge 4,0$. Am Maßstab der vormaligen Zone 3 als normenrelevant einzuschätzende Ereignisse sind nach dem



 Bild 1 Rezente Erdbebentätigkeit von 2002 bis 2019 (tekt. Ereignisse, Lokalbebebenmagnitude M_L) nach [14, 15] sowie S_{ap,R} nach DIN EN 1998-1/NA (2021) [10] Recent earthquake activity from 2002 to 2019 (tect. events, local magnitude M_L) acc. to [14, 15] and S_{ap,R} acc. to DIN EN 1998-1/NA (2021) [10]

Albstadt-Erdbeben 1978 nicht mehr aufgetreten. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Vollständigkeit für Magnituden < 3,0–3,5 für Erdbebenkataloge mit u. a. präinstrumentellen Einträgen und zu Beginn der instrumentellen Detektion von seismischen Ereignissen nicht gegeben ist. Für den betrachteten Zeitraum ab 2002 kann von einer Vollständigkeit ab Magnitude M_L 2,0 ausgegangen werden.

Für ausgewählte, in Bild 3 gekennzeichnete Erdbeben (2002 Alsdorf, 2004 Waldkirch, 2011 Nassau, 2011 Goch) wird die Verfügbarkeit von Starkbebenmessdaten überprüft. Dabei wird auf die Bulletins [11, 12] und Angaben von [13] Bezug genommen. Die Stationen, für welche Daten online bzw. bei Betreibern vorhanden sind, werden in Bild 3 blau gekennzeichnet. Das aus den Angaben von [11, 12] abgeleitete Stationsnetzwerk wird durch ungefüllte Dreiecke dargestellt.

2.2 Stärkste Ereignisse und ausgewählte Erdbeben

Aufgrund der geringen Anzahl moderater Erdbeben und des Fehlens von Starkbebenereignissen steht nur eine sehr begrenzte Anzahl an Starkbebenmessungen zur Verfügung, welche zum Überprüfen der Normspektren, von S. Beinersdorf, C. Kaufmann, J. Schwarz, B. Knapmeyer-Endrun: Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland: Bodenbewegungen und Schütterwirkungen



Bild 2 Histogramm der rezenten Erdbebentätigkeit von 2002 bis 2019 (*M*_L) nach [14, 15] Histogram of the recent earthquake activity from 2002 to 2019 (*M*_L) acc. to [14, 15]

Bodenbewegungsmodellen bzw. Entwicklung dieser für künftige Prognosen herangezogen werden können.

In Tab. 1 werden die wichtigsten Kenngrößen der nachfolgend überprüften Ereignisse zusammengestellt. Das Erdbeben Nieder-Beerbach 2014 mit einer Intensität von VI-VII bis VII wird nicht betrachtet, da seismische Registrierungen in Herdnähe nicht zur Verfügung stehen.

In [6] wird eine umfängliche Auswertung der Schäden und Einwirkungsbedingungen vorgelegt. Dies gilt auch für das Waldkirch-Erdbeben; die Ingenieuranalyse in [21] konzentriert sich auf die beobachteten Effekte und prüft auf Grundlage der Magnitudenangaben des LGRB [22] die Leistungsfähigkeit von intensitätsbasierten Schadensund Verlustprognosemodellen.

In Bild 4 werden die vier ausgewählten Ereignisse und die Lage seismischer Stationen [11] in den Kontext der aktuellen Normung eingeordnet. Dargestellt werden Konturlinien, die mit dem Wert der Zoneneinteilung der vorhergehenden Norm korrespondieren, sowie die geologi-





schen Untergrundklassen [10, Anhang NA.G]. Verfügbare Aufzeichnungen seismischer Stationen werden mit einem grauen Dreiecksymbol gekennzeichnet; die im Beitrag ausgewerteten Datensätze (2002 Alsdorf, 2004 Waldkirch, 2011 Nassau, 2011 Goch) sind rot hervorgehoben. Stationen, deren Starkbebenmessungen detaillierter aus-

 Tab. 1
 Ausgewählte moderat seismische Erdbeben im Zeitraum 2002–2019 nach [14, 15] (Bild 4)

 Selected moderate seismic earthquakes in the period 2002–2019 acc. to [14, 15] (Fig. 4)

Erdbeben [14, 15]	M _L	M _w	I ₀	<i>h</i> ₀	Seismische Registrierungen Anzahl der verwendeten Datensätze [verantwortlicher Betreiber]	Makroseismische Beobachtungen [verwendete makroseismische Skale]	
22.07.2002 Alsdorf	4.9	4.6	VI	14	15 [BNS] [13], s. a. [16]	automatisiert, anhand von "felt reports" [13] [MMI – unbereinigter Datensatz]	
05.12.2004 Waldkirch	5.4	4.6	VI	9	13 [LED] [17]	"traditionelle" makroseismische Beobach- tungen nach [18] [Europäische Makro- seismische Skale EMS-98]	
14.02.2011 Nassau	4.4	4.1#	VI-VII*	12	28 [BNS] [13], s. a. [19]	automatisiert, anhand von "felt reports" [13] [MMI – unbereinigter Datensatz]	
08.09.2011 Goch	4.4	4.1#	VI [20]	4	33 [BNS] [13], s. a. [19]	automatisiert, anhand von "felt reports" [13] [MMI – unbereinigter Datensatz, [20]]	

* vorläufig, basierend auf Internetfragebögen (automatisiert ausgewertet) [Skale MMI] 🛛 # auf Basis Regression bestimmt [14]



Bild 4Verwendete Messungen der Erdbeben nach Tab. 1 sowie Unter-
grundbedingungen (Anhang NA.G) und S_{aPR} nach [10]
Used measurements of earthquakes acc. to Table 1 as well as
subsoil conditions (Annex NA.G) and S_{aPR} acc. to [10]

gewertet werden (Abschn. 3.3 ff.), sind mit dem jeweiligen Stationscode beschriftet.

3 Registrierte Bodenbewegungen

3.1 Zur Einordnung von registrierten Bodenbewegungen in die Baunormung

Eine direkte Einordnung der bei Erdbeben gemessenen Bodenbewegungen in die Baunormung war und ist im Hinblick auf mögliche Interpretation nur mit Vorbehalt und sorgfältiger Festlegung der zum Vergleich geeigneten (zulässigen) Kenngrößen möglich. In allen Fassungen der DIN 4149 (1982–2005) werden den Gefährdungszonen Effektivwerte oder Bemessungsbeschleunigungen zugewiesen, die kleiner sind als die gemessenen Spitzenbodenbeschleunigungen. Die Größenordnung der Abminderung wird u. a. durch [23, 24] dargestellt. Da sich die Zonen auf Intensitäten beziehen, war es erforderlich, hier geeignete Korrelations- und Umrechnungsbeziehungen zur Anwendung zu bringen.

Die rein physikalisch eindeutige Vergleichbarkeit ist auch mit den aktuellen Gefährdungskarten nicht ohne Weiteres möglich. Die maßgebliche Gefährdungskenngröße wird durch die Spektralbeschleunigung im Plateau beschrieben, die ihrerseits (und im Ergebnis der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse) aus den Mittelwerten an dem für das Plateau maßgeblichen Perioden (T = 0,1 s, 0,15 s, 0,2 s) bestimmt wird. Insofern wäre aus Spektren der Registrierungen ein solcher Mittelwert zu bilden. Da die Gefährdungskarte sich auf Fels (mit $v_{s,30} = 800 \text{ m/s}$) bezieht, wären die Werte zudem auf die Untergrundbedingungen an den Aufzeichnungsstationen zu skalieren.

Grundsätzlich ist aber herauszustellen, dass eine singuläre Aufzeichnung allein die Normvorgaben nicht infrage stellen kann. Mit dem Entscheid der maßgeblichen Fraktile von Gefährdungs- und/oder Einwirkungskenngrößen ist die zu erwartende und zu akzeptierende Streubreite (als Risikoentscheidung) prädeterminiert bzw. festgelegt. Insofern sind nachfolgende Vergleiche vornehmlich als Einstieg in die Problematik zu verstehen.

3.2 Max. Bodenbeschleunigungen und Spektralbewegungsgrößen

Seismische Stationen, deren Registrierungen nachfolgend betrachtet werden, werden in Bild 5 in den geologischen Kontext eingeordnet. Die (vorläufige) Karte der geologischen Untergrundklassen wird in [10, Anhang NA.G] bereitgestellt, wobei der grobe Maßstab (1:4000000) zu beachten ist. Kleinmaßstäbliche Kartierungen bzw. verfügbare 3-D-Kartierungen der Geologie und Bodenprofile im Umfeld der Stationen können hier ein detaillierteres Bild liefern. Im Fall von 2004 Waldkirch wird die geologische Karte von Baden-Württemberg (1:350000) herangezogen.

Bild 6 veranschaulicht, wie sich die gemessenen Spitzenbodenbeschleunigungen unter Vorgaben der Magnitude M_w in die hier verwendeten Abnahmebeziehungen von [25, 26] einordnen. Verallgemeinerungsfähige Aussagen bez. der Qualität der Modelle und signifikante Untergrundeffekte sind nur im Hinblick auf die Unsicherheiten ableitbar und würden weitere Messdaten (in Herdnähe) voraussetzen. Stationen in der Niederrheinischen Bucht sind zur Kennzeichnung der Untergrundkombination C-S (Sedimente mit großen Mächtigkeiten) von Relevanz.

3.3 Starkbebendauer

Für die Bauwerksbeanspruchung ist die Dauer der starken Bodenbewegung ein Indikator des zyklischen Einwirkungseintrags. Bild 7 zeigt für die ausgewählten Stationen in einer Hypozentralentfernung R 19–25 km, wie sich die Bereiche der Starkbebendauer festlegen lassen, wenn das Energiekriterium zwischen 5 und 75, 90 bzw. 95% der umgesetzten Beschleunigungsenergie definiert wird. Die ausgewählten seismischen Registrierungen zeigen Starkbebendauern von ca. 3–10 s je nach Ansatz des zugrunde gelegten Energiekriteriums.



Bild 5 Ausgewählte Messungen der Bodenbewegungen der Erdbeben nach Tab. 1 sowie die Untergrundklasse und Bodenklasse nach [27, 28] und beobachtete Schütterwirkungen der Erdbeben a) 2002 Alsdorf [13] und b) 2004 Waldkirch [29] gegenübergestellt der S_{aPR} nach [10] Selected measurements of the ground motions of the earthquakes according to Table 1 as well as the subsoil class and soil class according to [27, 28] and observed shaking effects of the earthquakes a) 2002 Alsdorf [13] and b) 2004 Waldkirch [29] compared with S_{aPR} acc. to [10]

3.4 Einfluss des Untergrunds

Die aktuellen Untersuchungen [30] bestätigen, dass die Baugrundfaktoren insbesondere für die mächtigen Sedimente bis dato zu optimistisch abgemindert wurden und ein erhebliches (für größere Wiederkehrperioden durchaus charakteristisches) Beschleunigungsniveau voraussetzen, damit in dieser Form Bodenfaktoren $S \leq 1,0$ plausibilisiert werden können. Dies steht damit in Verbindung, dass Registrierungen mit mächtigen Sedimenten ausstehen und somit eine Datengrundlage fehlt, um diese Effekte nachzuweisen. Insofern sind die Modellrechnungen momentan der einzige Weg, um zu einem Ergebnis zu kommen. Die aus dem DIBt-Vorhaben folgenden Ergebnisse und Empfehlungen werden im NA [10] übernommen. Unter Verwendung der in [30] vorgelegten Tabellen werden erstmals beschleunigungsabhängige Bodenfaktoren eingeführt.

Das Konzept der Geologie und untergrundabhängigen Spektren wurde mit einer zweigeteilten Vorgehensweise verfolgt, einerseits eine Karte der geologischen Untergrundklasse zur Verfügung zu stellen, andererseits die Zuordnung der Baugrundklassen in Verbindung mit den Untergrundklassen von standortspezifischen Erhebungen abhängig zu machen und für diese Situationen entsprechende Spektren bereitzustellen. Unsicherheiten der Einteilung bestehen darin, in welchen Bereichen die Mächtigkeit abzugrenzen ist. In dem vorliegenden NA sind aber gerade die Grenzwerte angegeben, die durch die Karte der geologischen Untergrundklasse ausgewiesen werden. Die aufbereiteten Starkbebenmessungen der Erdbeben werden für ausgewählte Stationen an den Bodenbewegungsmodellen [25, 26] gespiegelt. Die geologischen Untergrundbedingungen wurden für die Studie abgeschätzt (Abschn. 3.2).

In Bild 7 werden die Starkbebenmessungen für Stationen (Tab. 2) als Zeitverläufe dargestellt. Bild 8 zeigt die zugehörigen normierten Spektren dieser Messungen (E-W-Komponente: schwarz, N-S-Komponente: grau) sowie Bodenbewegungsbeziehungen für die jeweils angenommenen Scherwellengeschwindigkeiten $v_{s,30}$ (Kurven grün – Fels, grün gepunktet – angenommener Untergrund) gespiegelt am elastischen Beschleunigungs-Antwortspektrum für 5% Dämpfung des NA [10].

Die Bodenbewegungsmodelle liefern für die hier anzusetzende Momentenmagnitude M_w 4,6 mit den Spektren der aufgezeichneten Komponenten vergleichbare Ergebnisse (Bild 8). Aufgrund der wenigen verfügbaren Starkbebenaufzeichnungen ist die Vertrauenswürdigkeit der Modelle weiter zu überprüfen, insbesondere für Beschleunigungen, die schadensrelevante Intensitäten (> VII) (Bild 9) erwarten lassen. Tab. 2 enthält zusätzlich zur PGA die abgeleiteten mittleren und max. Spektralbeschleunigungen S_a der gemessenen Bodenbewegung. Diese wurden anhand der vorliegenden Daten für die Werte den Periodenbereich zwischen $T \ge 0,1$ s bis einschließlich 0,2 s bestimmt (Fels). Bei Anpassung dieser Periodenbereiche auf Basis der angenommenen Untergrundbedingungen im Vergleich zu Felsbedingungen ist bei maxS_{aP,UG} keine Änderung der max. Bodenbewegung, bei Bestimmung der



Bild 6 Ausgewählte Messungen der Bodenbewegungen [13, 17] der Erdbeben nach Tab. 1 sowie die gemessene a), b) Spitzenbodenbeschleunigung (peak ground acceleration, PGA) und c), d) spektrale Antwortbeschleunigungen (T = 0, 1-0, 2 s) für $S_{aP,R}$ im Vergleich zu den GMPEs nach [25, 26] Selected measurements of the ground motions [13, 17] of the earthquakes according to Table 1 as well as the measured a) peak ground acceleration PGA und b) spectral response acceleration (T = 0.1-0.2 s) for $S_{aP,R}$ compared to the GMPEs acc. to [25, 26]

Mittelwerte mean $S_{aP,UG}$ ist eine Abnahme dieser zu verzeichnen.

4 Schütterwirkungen und Bauwerksschäden

4.1 Makroseismische Beobachtungen

Bei den vermeintlich aufgetretenen Schütterwirkungen ist zwischen instrumenteller und makroseismischer Bestimmung der Intensität zu unterscheiden. Sofern umfangreiche instrumentelle Messungen der Bodenbewegungsparameter zur Verfügung stehen, können diese mit der makroseismischen Intensität korreliert werden. Die qualitative Beschreibung (der Erdbebenstärke) wird durch die gemessene Größe ersetzt. Die Herausforderung besteht darin, die Kompatibilität von instrumentellen Bodenbewegungsgrößen mittels Konversionsbeziehungen abzubilden. In den stark seismischen Regionen ist eine Zuordnung von makroseismischen Intensitäten auf instrumenteller Basis aufgrund der Datenmenge möglich. Beziehungen sind in Europa u.a. für Italien [31] verfügbar. In Deutschland fehlt die Datengrundlage aufgrund der geringen Anzahl an Schadensereignissen (s. Bild 2) und des nicht vergleichbar dicht ausgebauten seismischen Netzes.

Die makroseismischen Beobachtungen in der Nähe der Stationen werden verwendet (s. Bild 4), um den Erdbebenaufzeichnungen eine (wahrscheinliche) Intensität zuzuweisen. Es werden hierzu Bereiche mit einem Radius von 3 km und 4 km eingesetzt. Für 2002 Alsdorf können nur zwei Stationen unter Verwendung der verfügbaren Internetfragebögen [13] entsprechende Intensitäten zugewiesen werden. Bei einer Erweiterung um die Dokumentation der Erdbebenstation Bensberg ist eine Vergrößerung des Datensatzes zu erwarten. Die max. Bodenbewegungen werden in Bild 9 für die Ost-West- (E-W) und Nord-Süd-Komponenten (N-S) aufbereitet.

In Bild 9 wird die PGA mit der Intensität *I* verglichen. Für Mitteleuropa werden Messungen der PGA für die Erdbeben 1978 Albstadt, 1992 Roermond, 2002 Alsdorf und 2004 Waldkirch verwendet. Zum Vergleich werden Daten aus Italien nach [31] herangezogen. Die Einfär-



Bild 7 Ausgewählte Zeitverläufe der Erdbeben 2004 Waldkirch [29] und 2002 Alsdorf [13] Selected time histories of the earthquakes 2004 Waldkirch [29] and 2002 Alsdorf [13]

bung der Punkte zeigt die jeweilige makroseismische Skala an. Aus der Grafik ist die große Streuung der Beschleunigung für die jeweiligen Intensitätsstufen zu erkennen, unabhängig von der makroseismischen Skala. Für die Intensitäten mit Schadenspotenzial (VI–VIII) ist ein deutlicher Rückgang in den verfügbaren Datensätzen zu erkennen.





In Bild 9 werden Bodenbewegungs-Intensitäts-Konversionsbeziehungen (GMICE), die für einzelne Gebiete in Europa Anwendung finden, mit den Beobachtungen verglichen. Entsprechende Gleichungen wurden den genannten Quellen entnommen. Die Beziehung von [31] bietet für die ausgewerteten Erdbeben eine vertrauenswürdige Abschätzung der PGA (Bild 9). Die Streuungen können mit der EMS-98 erfahrungsgemäß reduziert werden [32].



Bild 8 Vergleich der Spektralbeschleunigung S_a der gemessenen Bodenbewegung der Erdbeben 2004 Waldkirch [29] und 2002 Alsdorf [13] mit dem Bodenbewegungsmodell [25, 26] für Fels und den angenommenen Untergrund [27, 28] und dem elastischen Beschleunigungs-Antwortspektrum für 5 % Dämpfung nach [10]

Comparison of the spectral acceleration S_a of the measured ground motion of the 2004 Waldkirch [29] and 2002 Alsdorf [13] earthquakes with the GMPE [25, 26] for rock and the assumed subsurface [27, 28] and the elastic response spectrum for 5% damping of acc. to [10]

Tab. 2 Untersuchte Starkbebenmessungen, zugehörige Parameter und die zugeordnete makroseismische Intensität (Bild 7) Investigated strong-motion measurements, associated parameters, and the assigned macroseismic intensity (Fig. 7)

Erdbeben (Magnitude)	Station	Hypozentral- entfernung <i>R</i> [km]	Unter- grund [27], [28]	PGA _{max} [cm/s ²]	maxS _{aP,R} [cm/s ²]	meanS _{aP,R} [cm/s ²]	maxS _{aP,UG} [cm/s ²]	meanS _{aP,UG} [cm/s ²]	Makro- seismische Intensität
2004 Waldkirch (M _w 4,6)	FBB	19	B-T	27	39	32	39	27	V-VI
	KIZ	19	B-T	50	105	93	105	89	V-VI
	FELD	25	A-R	21	51	48	-	-	IV-V
2002 Alsdorf (M _w 4,6)	WEIA	21	C-S	26	85	46	85	42	V



Bild 9 Vergleich von Messungen und zugeordneter makroseismischer Intensität der Erdbeben 1978 Albstadt [4], 1992 Roermond [33], 2002 Alsdorf [13], 2004 Waldkirch [29], mit den Beziehungen nach [31, 34, 35]

Comparison of measurements and assigned macroseismic intensity of the earthquakes 1978 Albstadt [4], 1992 Roermond [33], 2004 Waldkirch [29], with the relationships acc. to [31, 34, [35]



Bild 10 Anwendung der GMPE [25, 26]: R_{hyp}, v_{s,30} zur Prognose der Erdbebenwirkungen für die Erdbeben a) 2002 Alsdorf und b) 2004 Waldkirch Application of the GMPE [25, 26]: R_{hyp}, v_{s,30} to predict earthquake effects for the a) 2002 Alsdorf and b) 2004 Waldkirch earthquakes

4.2 Prognose der Schütterwirkungen für ausgewählte Erdbeben

Inwieweit diese Beziehungen für stärkere Erdbeben mit makroseismischen Intensitäten > VII anwendbar sind, werden erst die dann gemessenen Registrierungen zeigen, sofern sie diese makroseismischen Intensitäten erzeugen können. In Bild 9 werden die schattierten Flächen der MSK-64-Intensitätsskala mit denen der MMI- Skala [36], die den USGS-ShakeMaps zugrunde liegen, miteinander verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die MMI-Skala die Intensitäten in Europa um eine Intensitätsstufe unterschätzt, insbesondere für den Bereich der Intensitäten von V bis VI. Aus diesem Grund ist die Anwendung von ShakeMaps unter Verwendung der EMS-98 [37] anzustreben. Die intensitätsbasierte Schadensprognose führt nicht zuletzt durch das Konzept der Verletzbarkeitsklassen zu plausiblen Reinterpretation der beobachteten Schadensgrade bzw. berichteten Verluste [38, 39].

Die in Bild 10 dargestellten Schütterkarten, die auf Basis der Vorgehensweise von USGS unter Verwendung der GMPE [25, 26] erstellt wurden, spiegeln nachträglich Prognosen der makroseismischen Intensität für die Erdbeben 2002 Alsdorf und 2004 Waldkirch. Hierzu werden in einem ersten Schritt nur die Momentenmagnitude M_w und die Herdtiefe h_0 verwendet. Diese Schütterkarten können für Einsatzkräfte und Verantwortliche kritischer Infrastrukturen, aber auch der Bevölkerung wertvolle Informationen in Form des Rapid Response Estimate bereitstellen [40].

5 Zusammenfassung

Die Auswertung der rezenten Erdbebentätigkeit darf als immanenter Bestandteil der Normungsarbeit gesehen

Literatur

- DIN 4149-1 (1981) Bauten in deutschen Erdbebengebieten

 Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Deutsche Normen. Berlin: Beuth.
- [2] DIN 4149 (2005) Bauten in deutschen Erdbebengebieten Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Deutsche Normen (NABau). Berlin: Beuth. Weißdruck 2002, Gelbdruck 2005.
- [3] IfBt (1986) Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke – Abschlußbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik, Berlin, IRB-Forschungsbericht. T 1829. Stuttgart.
- [4] Wieck, J.; Schneider, G. (1980) Herdnahe Messungen während der Erdbebenserie im Herbst 1978 auf der westlichen Schwäbischen Alb. Mitt. Inst. für Baut. 11, H. 1, S. 1–3.
- [5] Schwarz, J. (1998) Festlegung effektiver Beschleunigungen für probabilistische Gefährdungszo-nenkarten im Zusammenhang mit der nationalen Anwendung des EC 8. DGEB-Publikation 9, S. 45–58.
- [6] Schwarz, J.; Maiwald, H.; Leipold, M.; Langhammer, T.; Kracht, M.; Müller, B. (2015) Das Erdbeben vom 17. Mai 2014 in Südhessen – Ingenieuranalyse der Erdbebenschäden. Bautechnik 92, H. 9, S. 647–659. https://doi.org/ 10.1002/bate.201500035
- [7] Schwarz, J.; Ahorner, L. (1995) Actual strong motion records in Central Europe – Conclusions for engineering design practice in: Elnashai; SECED [eds.] Europ. seis. des. pract. Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 303–310.
- [8] Schwarz, J.; Ahorner, L. (1994) Conclusions from actual strong motion records in Central Europe for Engineering design practice. Strong Motion '94. Bern, pp. 40–44.
- [9] Hinzen, K.-G. (2005) Strong-motion-Stationen der Abt. Erdbebengeologie der Universität zu Köln in den nördlichen Rheinlanden. Bautechnik 82, H. 8, S. 518–519. https://doi. org/10.1002/bate.200590169
- [10] DIN EN 1998-1/NA (2021) Nationaler Anhang National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 2021.
- [11] ISC (2021) Intern. Registry of Seismograph Stations (IR).

werden. Im Falle von normrelevanten Ereignissen ist eine detailliertere Auswertung aus ingenieurseismologischer Perspektive zu gewährleisten. Für die Erstellung von Bodenbewegungsmodellen fehlen in Deutschland insbesondere die Messungen von schadensverursachenden und damit normrelevanten Ereignissen. Die Kommunikation der Datenverfügbarkeit und -auswertung wird weiterhin als Herausforderung zwischen den verschiedenen Verantwortungs- und Entscheidungsebenen zu gestalten sein.

Dank

Die Autoren danken Herrn Peshawa Luqman Hassan (EDAC) für die Erstellung von Bild 10.

- [12] FDSN (2021) Intern. Federation of Digital Seismograph Networks.
- [13] BNS Erdbebenstation Bensberg (2021) Seismische Registrierungen und "felt reports" der Erdbeben 2002 Alsdorf, 2011 Nassau, 2011 Goch. Felt reports gesammelt durch ROB.
- [14] Schwarz, J.; Beinersdorf, S.; Meidow, H. (2019) Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete – EKDAG. Weimar: Bauhaus-Universitätsverlag als Imprint von arts + science weimar GmbH.
- [15] SZGRF (2020) Bull. des SZGRF 1998-2019.
- [16] Hinzen, K.-G. (2005) Ground motion parameters of the July 22, 2002 ML 4.9 Alsdorf (Germany) earthquake. Boll. di Geof. Teorica ed Appl. 46, No. 4, pp. 303–318.
- [17] LED; LGRB Baden-Württemberg [Hrsg.] (2005) Seismische Registrierungen des Waldkirch-Erdbebens vom 5.12.2004.
- [18] Benn, N.; Stange, S.; Brüstle, W.; Henk, A.; Stribrny, B. (2006) *Das Beben von Waldkirch am* 5.12.2004. Dt. geophys. Ges., 66. J.-Tag. Bremen, S. 400–401.
- [19] Hinzen, K.-G. (2019) Engineering Seismological Parameters of Two ML 4.3 Intraplate Earthquakes in the Northern Rhine Area, Germany. SRL 90, No. 3, pp. 1258–1267.
- [20] van Noten, K.; Lecocq, T.; Sira, C.; Hinzen, K.-G.; Camelbeeck, T. (2017) Path and site effects deduced from merged transfrontier internet macroseismic data of two recent M4 earthquakes in northwest Europe using a grid cell approach. Solid Earth 8, No. 2, pp. 453–477.
- [21] Schwarz, J.; Abrahamczyk, L.; Amstein, S.; Kaufmann, C.; Langhammer, T. (2006) Das Waldkirch-Erdbeben (Baden-Württemberg) vom 5. Dezember 2004. Bautechnik 83, H. 3, S. 202–208. https://doi.org/10.1002/bate.200610020
- [22] LGRB Baden-Württemberg; LED [Hrsg.] (2004) RP Freiburg – Geowissenschaftliche Karten Baden-Württemberg – ERD: Makroseismik des Waldkirch-Bebens vom 5. Dez. 2004.
- [23] Fehling, E.; Schwarz, J. (2021) DIN EN 1998-1/NA-2021 im Kontext der deutschen und europäischen Normenentwicklung. Bautechnik 98, H. 11, S. 815–825.

- [24] Schwarz, J. (1998) Festlegung effektiver Beschleunigungen für seismische Gefährdungszonen im Zusammenhang mit der probeweisen nationalen Anwendung des EC 8, Bauforschungsprojekte – Bauforschung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [25] 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 3.0 s using the RESORCE dataset. Bull. Earthq. Eng. 12, No. 1, pp. 391–430.
- [26] Bindi, D.; Massa, M.; Luzi, L.; Ameri, G.; Pacor, F.; Puglia, R.; Augliera, P. (2014) Erratum to: Pan-European groundmotion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. Bull. Earthq. Eng. 12, No. 1, pp. 431-448.
- [27] LGRB Baden-Württemberg (1998) Geowissenschaftliche Übersichtskarten Baden-Württemberg 1:350.000 [CD-Rom]. Freiburg.
- [28] Beinersdorf, S. (2016) Intensitätsbasierte Bewertung der Verletzbarkeit allgemeiner Hochbauten in deutschen Erdbebengebieten, Schriftenreihe des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 029 [Dissertation]. Bauhaus-Universität, Weimar: Univ.-Verl.
- [29] LED Baden-Württemberg (2004) Aktuelle Erdbeben in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und benachbarten Regionen [online]. http://www.lgrb.uni-freiburg.de/led_pool/ led_2_1.htm
- [30] Schwarz, J.; Kaufmann, C.; Maiwald, H. (2018) Seismische Einwirkungen für die neue Generation von Erdbebenbaunormen: Gefährdungskonsistente und untergrundspezifische Spektren für die aktualisierte Erdbebenzonenkarte. Überarbeiteter Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 246 40175 im Auftrag des Deutschen Inst. für Baut.
- [31] Faenza, L.; Michelini, A. (2010) Regression analysis of MCS intensity and ground motion parameters in Italy and its

Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Silke Beinersdorf (Korrespondenzautorin) silke.beinersdorf@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) Marienstraße 13b 99423 Weimar

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann christian.kaufmann@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) Marienstraße 13b 99423 Weimar

Dr.-Ing. Jochen Schwarz schwarz@uni-weimar.de Bauhaus-Universität Weimar Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) Marienstraße 13b 99423 Weimar application in ShakeMap. Geoph. Jour. Int. 180, No. 3, pp. 1138–1152.

- [32] Beinersdorf, S.; Schwarz, J. (2011) Reinterpretation der Schütterwirkungen des "Mitteleuropäischen Erdbebens" vom 16. November 1911 in: Könke, C. [Hrsg.] 12. D-A-CH Tagung. Hannover, 15.–16. Sept. 2011. S. 1–12.
- [33] Ahorner, L. (1993) Gemessene Bodenbeschleunigungen beim Roermonder Erdbeben am 13. April 1992. Bauingenieur 68, H. 5, S. 201–205.
- [34] Medvedev, S. V.; Sponheuer, W. (1969) Scale of seismic intensity. WCEE Santiago, Chile, A-2, pp. 143–153.
- [35] Caprio, M.; Tarigan, B.; Worden, C. B.; Wiemer, S.; Wald, D. (2015) Ground Motion to Intensity Conversion Equations (GMICEs): A Global Relationship and Evaluation of Regional Dependency. BSSA 105, No. 3, pp. 1476–1490.
- [36] Wald, D.; Wald, L.; Dewey, J.; Quitoriano, V.; Adams, E. (2001) Did You Feel It?: Community-made Earthquake Shaking Maps. USGS.
- [37] Grünthal, G.; Musson, R. M. W.; Schwarz, J.; Stucci, M.; Grünthal, G. [eds.] (1998) *European Macroseismic Scale* 1998, ECGS. 15. Luxembourg.
- [38] Schwarz, J.; Langhammer, T.; Kaufmann, C. (2006) Quantifizierung der Schadenspotentiale infolge Erdbeben – Teil 2: Modellstudie Baden-Württemberg. Bautechnik 83, H. 12, S. 827–841. https://doi.org/10.1002/bate.200610072
- [39] Schwarz, J.; Beinersdorf, S.; Kaufmann, C.; Langhammer, T. (2008) Damage scenarios for Central Europe Reinterpretation of historical earthquakes in: Camelbeeck, T. et. al [eds.] Seismic Risk 2008 Earthquakes in North-Western Europe. G07. Les Editions de l'Université de Liège, pp. 311–320.
- Schwarz, J.; Beinersdorf, S.; Kaufmann, C.; Langhammer, T. (2016) SHAKEMaps effiziente Tools für die Reinterpretation und Prognose von Erdbebenschäden. Bautechnik 93, H. 4, S. 230–242. https://doi.org/10.1002/bate.201600017

Dr. Brigitte Knapmeyer-Endrun brigitte.knapmeyer-endrun@uni-koeln.de Universität zu Köln Erdbebenstation Bensberg Vinzenz-Pallotti-Str. 26 51429 Bergisch Gladbach

Zitieren Sie diesen Beitrag

Beinersdorf, S.; Kaufmann, C.; Schwarz, J.; Knapmeyer-Endrun, B. (2021) *Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland: Bodenbewegungen und Schütterwirkungen*. Bautechnik 98, H. 11, S. 826–837. https://doi.org/10.1002/bate.202100073

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 14. August 2021; angenommen: 8. Oktober 2021.