

Geogene Gefahren

Wolfgang Dachroth

- 2.1 Erdbeben und Erschütterungen – 146**
 - 2.1.1 Ursache von Erdbeben – 146
 - 2.1.2 Ausbreiten von Erdbebenwellen – 147
 - 2.1.3 Stärke von Erdbeben – 147
 - 2.1.4 Erdbebenhäufigkeit, Erdbebengefährdung und Erdbebenrisiko – 148
 - 2.1.5 Erdbebensicheres Bauen – 151
 - 2.1.6 Vorhersage von Erdbeben – 152
 - 2.1.7 Messtechnisches Überwachen erdbebengefährdeter Gebiete – Monitoring – 152
 - 2.1.8 Erschütterungen und Schwingungsübertragung auf Bauwerke – 153
- 2.2 Vulkanismus – 153**
 - 2.2.1 Vulkanische Produkte – 155
 - 2.2.2 Vulkanische Landschaftsformen – 155
 - 2.2.3 Arten und Gefahrenpotential der Vulkaneruptionen – 156
 - 2.2.4 Von Vulkanen ausgehende Gefahren – 157
 - 2.2.5 Vulkan-Observation (Monitoring) – 157
 - 2.2.6 Katastrophenvorhersage und Schutzmaßnahmen – 158
- 2.3 Verwitterung – 158**
 - 2.3.1 Physikalische Verwitterung – 159
 - 2.3.2 Chemische Verwitterung – 161
 - 2.3.3 Lösungsverwitterung – 161
 - 2.3.4 Hydrolytische Verwitterung der gesteinsbildenden Minerale – 164
 - 2.3.5 Oxidationsverwitterung – 165
 - 2.3.6 Klimazonale Unterschiede der Verwitterung – 165
 - 2.3.7 Bausteinverwitterung und Verwitterung an freistehenden Felsen – 167
 - 2.3.8 Lage und Exposition von Bauwerksteilen und Felswänden – 167
 - 2.3.9 Verwitterungsbedingungen für Bausteine – 168
 - 2.3.10 Verwitterungsarten an Felsen und Bausteinen – 168
 - 2.3.11 Schutz vor Bausteinverwitterung – 170
 - 2.3.12 Gruppieren der Bausteine nach den Verwitterungsformen – 170
 - 2.3.13 Prüfen und Bewerten verwitterungsgefährdeter Bausteine und Bauwerke – 172
- 2.4 Krusten und Verkrustungen – 172**
 - 2.4.1 Kalkkrusten – 172
 - 2.4.2 Gips- und Salzkrusten, Versalzung – 173
 - 2.4.3 Eisen- und Mangankrusten – 174
 - 2.4.4 Kieselkrusten (Silcretes, Duricretes) – 175

2.5	Natürlicher Erdabtrag – Erosion, Denudation – 175
2.5.1	Erosion – 176
2.5.2	Winderosion, Deflation, Windabrasion – 179
2.5.3	Erdabtrag durch Betreten, Bearbeiten und Befahren – 179
2.5.4	Überwachen und Beurteilen erosionsgefährdeter Bereiche – 180
2.6	Rutschungen – unmittelbare Massenschwerebewegungen – 180
2.6.1	Rutschungstyp „Kippen“ – 181
2.6.2	Rutschungstyp „Fallen“ – 181
2.6.3	Rutschungstyp Fließen – Lawinen – Muren – Kriechvorgänge – 183
2.6.4	Rutschungstyp „Driften“ – 188
2.6.5	Rutschungstyp „Gleiten“ – 188
2.6.6	Rutschungsmerkmale – 191
2.6.7	Rutschungsdimensionen – 192
2.6.8	Zustand der Rutschungsaktivitäten – 193
2.6.9	Verteilung der Rutschungsaktivitäten – 193
2.6.10	Art der Rutschungsaktivitäten – 194
2.6.11	Beobachten und Messtechnisches Überwachen von Rutschgebieten (Monitoring) – 194
2.6.12	Gefahrenbeurteilung – 196
2.7	Erdfälle und Bodensenkungen – 196
2.7.1	Geländeformen und Merkmale von geogen verursachten Erdfällen und Bodensenkungen – 196
2.7.2	Art und Gefahr technisch verursachter Bodensenkungen – 197
2.7.3	Klassifikation gesteinstypischer Subrosionsformen – 198
2.7.4	Auslaugung sehr leicht löslicher Gesteine – 198
2.7.5	Auslaugung in leichtlöslichen Gesteinen – Salzkarakst, Chloridkarst – 199
2.7.6	Auslaugung in löslichen Gesteinen – Anhydritkarst, Gipskarst – 199
2.7.7	Auslaugung in schwerlöslichen Gesteinen – Carbonatkarst – 200
2.7.8	Auslaugung in sehr schwer löslichen Gesteinen – Silikatkarst – 201
2.7.9	Dimensionen von Erdfällen und Senkungen – 201
2.7.10	Abschätzen des Schadenrisikos in Erdfallgebieten – 201
2.7.11	Messtechnisches Überwachen erdfallgefährdeter Gebiete (Monitoring) – 202
2.7.12	Technische Maßnahmen zum Vermeiden und Beheben von Bergschäden – 202
2.8	Wasser und Wind – Erosion, Denudation, Transport und Anlanden von Boden – 202
2.8.1	Bewegungsformen des fließenden Wassers – Abflusstypen – 203
2.8.2	Art der vom fließenden Wasser transportierten und abgelagerten Feststoffe – 204
2.8.3	Schichtfluten und Flächenspülungen – Art der Ablagerungen – 205
2.8.4	Flusslandschaften und Flusstypen – Art der Ablagerungen – 205
2.8.5	Fließwege und Strömungen im Küstenbereich – Art der Ablagerungen – 211

- 2.8.6 Art der von unterirdischem Wasser transportierten und abgelagerten Feststoffe – 212
- 2.8.7 Art der von Wind transportierten und abgelagerten Feststoffe – 212
- 2.9 Ansteigen und Absinken von Wasserständen – 213**
 - 2.9.1 Schwankungen des Meeresspiegels – 214
 - 2.9.2 Schwankungen bei Seewasserständen – 216
 - 2.9.3 Schwankungen bei Flusswasserständen – 217
 - 2.9.4 Schwankungen bei Grundwasserständen – 219
- 2.10 Frost im Baugrund – 221**
 - 2.10.1 Eigenschaften des gefrorenen Bodens – 221
 - 2.10.2 Frostsprengung und Frostbeständigkeit – 222

2.1 Erdbeben und Erschütterungen

Erdbeben sind Erschütterungen des Bodens bzw. Baugrundes, die durch natürliche oder durch künstlich induzierte Vorgänge ausgelöst werden. Natürliche Vorgänge sind tektonische Beben, vulkanische Beben, Einsturzbeben und Impaktbeben. Künstlich können Beben durch Bergbau, Talsperrenbau, Einsturz von Bauwerken, Absturz von Flugkörpern (künstlicher Impakt) und durch Sprengungen induziert werden. Die bei Erdbeben im Erdreich übertragene Schwingungsenergie schwankt in sehr weiten Grenzen zwischen für Menschen nicht spürbar und einer bis etwa 30 s lang anhaltenden Starkbebenphase. Letztere kann mit katastrophalen Zerstörungen an Bauwerken und tiefgreifender Umgestaltung der Erdoberfläche verbunden sein. Die Erdbebenherde sind auf der Erde nicht willkürlich verteilt, sondern vielfach in Zonen konzentriert. Weltweit konzentriert sich die stärkste seismische Aktivität entlang der Pazifikküste und auf einem Band von Südostasien bis zum Nordrand des Mittelmeeres. In Mitteleuropa sind Erdbeben auf Oberrheingraben, Bodensee und Schwäbische Alb mit den Schwerpunkten Hohenzollern und Basel sowie auf den Raum Köln-Aachen und die südwestlichen Landesteile von Sachsen konzentriert.

Erdbebenhäufigkeit, Erdbebengefahr und Erdbebenrisiko haben Bedeutung für Baumentscheidung, Betriebssicherheit, Standortsicherheit und Versicherungsschutz von Bauvorhaben. Seismik ist die Wissenschaft, die sich mit Erdbeben und Erschütterungen befasst.

2.1.1 Ursache von Erdbeben

■ Tektonische Beben

Die Mehrheit der Erdbeben entsteht, wenn spröde Gesteinsmassen entlang einer Scherfläche (Verwerfung) plötzlich gegeneinander verschoben werden. Nach der Theorie des „elastischen Rückstoßes“ baut sich Spannung über Hunderte oder Tausende von Jahren langsam auf. Im schwächsten Bereich der beanspruchten Gesteinsmasse, meist an bereits bestehenden Trennflächen einer Verwerfung, verursachen plötzliche Entspannungen einen Versatz mit Beträgen bis zu mehreren Metern. Der Versatz breitet sich entlang der Verwerfungslinie mit einer Geschwindigkeit aus, die geringer ist als die Geschwindigkeit der seismischen Welle im umgebenden Gestein. Die aufgestaute elastische Spannungsenergie wird freigesetzt, indem die beiden Flanken der Verwerfung in einen mehr oder weniger ungespannten Zustand zurückfallen. Je länger und breiter der Bereich des Versatzes ist, desto mehr Energie wird mit der Bebenwelle freigesetzt. Bei großen Erdbeben können sich an der Oberfläche mehrere Meter hohe, steile Bruchstufen bilden, die sich entlang der Verwerfungslinie über 10, manchmal bis über 100 km erstrecken.

Nach der Tiefenlage des Erschütterungsherd (Hypozentrum) wird zwischen Tiefbeben und Flachbeben unterschieden. Tiefbeben haben Herdtiefen zwischen 70 und maximal 700 km (Bolt 1995). Im allgemeinen sind Tiefbeben an der Oberfläche schwächer als Flachbeben.

Der Mechanismus tiefer Bebenherde lässt sich nicht mit den Bruch- oder Scherkriterien spröder Gesteine erklären.

■ Vulkanische Beben

Als Begleiterscheinung von Vulkanismus können unterschiedlich verursachte Erschütterungen auftreten. In der Umgebung eines aktiven Vulkans werden durch Eindringen und Platznahme von Magma in dem vom Vulkanismus tangierten anstehenden Festgestein Spannungen aufgebaut. Dies kann zu Bruchtektonik und Erschütterungen führen. Weitere Quellen für Erdbebenwellen können schnelle Bewegung des aufsteigenden Magmas in Förderrohren unterhalb des Vulkans sein. Durch explosives Entladen von Gasen und Wasserdampf in meist anhaltender Folge werden Beben (Tremor) erzeugt, die durch relativ konstante Wellenlängen gekennzeichnet sind. Vulkanische Beben können in gleicher Stärke wie tektonische Beben auftreten.

■ Einsturzbeben

Durch Bergstürze, Lawinen und den Zusammenbruch großer Hohlräume entstehen Bebenwellen. Dabei wird die Gravitationsenergie der fallenden Masse in seismische Wellen umgewandelt. Bei großer Massenbeteiligung können Einsturzbeben über lange Messzeiten als „Tremor“ aufgezeichnet und wahrgenommen werden. Von den nacheinander aufschlagenden Sturzmassen gehen zahlreiche Einzelwellen mit geringer Energie aus. Die Schädigung ist gering.

■ Impaktbeben

Impaktbeben entstehen durch den Einschlag von Himmelskörpern (große Meteoriten). Große Ereignisse sind sehr selten. Als bekanntestes Ereignis ist der Tunguska-Meteorit aus dem Jahre 1908 zu nennen.

■ Künstlich induzierte Beben an Stauseen und bei Injektionen

Durch den Aufstau großer Wassermassen mit teilweise über 100 m Stauhöhe kam es an einigen Stauseen zu künstlich induzierten Erdbeben (Kissin 1992). So wurden Erdbeben mit Epizentrum am Kariba-Damm in Sambia, am Hoover-Damm (Lake Mead am Colorado River in den USA) und am Assuan-Staudamm in Ägypten als künstlich induziert gedeutet. Vermutet werden Spannungsänderungen durch Wasserauflast im Grundwasserkörper mit Porenwasserüberdruck im Kluftgefüge und Spannungsänderungen durch Auftrieb in den unter Wasser gesetzten Gesteinsmassen.

Auch bei Injektionen von Wasser und beim Versenken von Abwasser über tiefe Bohrlöcher wurden Erdbeben ausgelöst.

■ Durch Explosion induzierte Beben

Durch Sprengen werden künstliche Bebenwellen in den Untergrund eingetragen, die bei der Refraktions- und Reflexionsseismik (► Abschn. 1.9.1) zum angewandten Erkunden des Untergrundes genutzt werden. Zur Erkundung des Aufbaus der Erdkruste wurden früher künstliche Beben genutzt, die bei der heute nicht mehr üblichen Kammersprengung im Bergbau sowie bei anderen Großsprengungen freigesetzt wurden. Weiterhin förderten unterirdische Kernwaffentests und die gegenseitige Überwachung des Atomteststoppabkommens von 1963 die Kenntnis über die Ausbreitung der Explosionswellen und deren Unterscheidung von natürlichen Erdbebenwellen.

■ Durch Bergbau induzierte Beben

Es existiert eine Vielzahl von Beobachtungen, Messergebnissen und Fotodokumentationen von Schäden, die auf bergbauinduzierte Erdbeben zurückzuführen sind. Ursächlich sind Deformationen des Gebirges und der Auskleidung im Umkreis des Hohlraums. Bekannt sind Bergschläge (Bräuner 1992), worunter das plötzliche wuchtartige Eindringen von Gestein oder Kohle in einen Grubenbau verstanden wird. Entsprechend ihrer Häufigkeit können folgende Gebirgsschläge unterschieden werden:

- Bruch der Ortsbrust wegen erhöhter Spannungskonzentration;
- Bruch an einer geologischen Störungszone;
- Scherbruch des Liegenden entlang von Bergfesten, Pfeilern, Stempeln;
- Scherbruch des Liegenden entlang der Abbaukante.

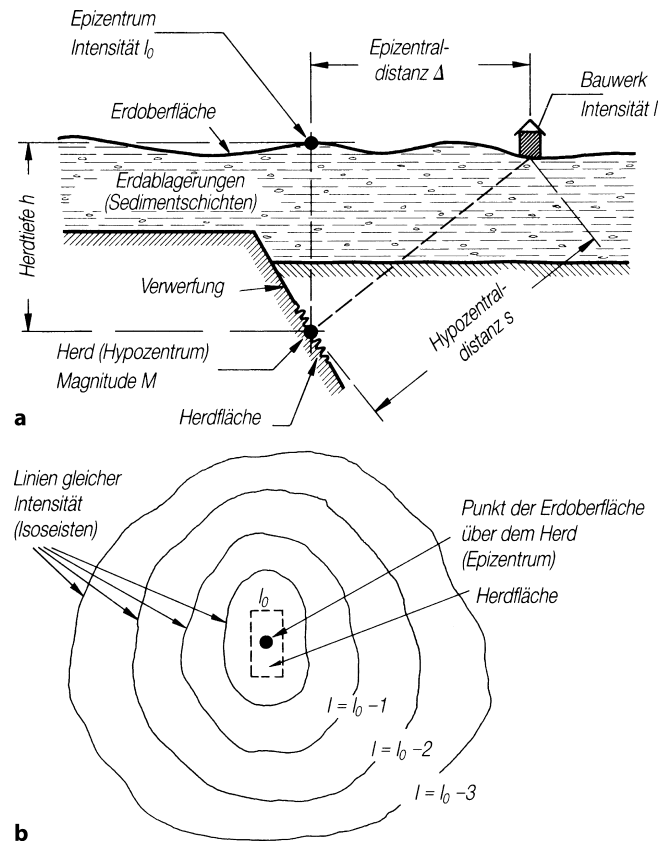
Berg- oder Gebirgsschläge führen zu seismischen Ereignissen mit Magnituden zwischen $M = 2,4$ bei Versagen der Ortsbrust, $M = 3,8$ beim Versagen der Bergfeste und $M = 4,5$ beim Versagen an geologischen Störflächen (Lenhardt 1998). Stärkste, vom Bergbau in jüngerer Zeit ausgelöste Beben ereigneten sich 1989 im Kalibergwerk Merkers mit $M = 5,6$, 1996 in der Kali-grube Teutschenthal mit $M = 5,5$ und 2008 im Bergwerk Saar bei Saarwellingen mit $M = 4$ bis $4,5$ (Wikipedia: Gebirgsschlag und Erdbebenhäufigkeit). Induzierte Seismizität im Bergbau kann ein beträchtliches Risiko für Belegschaft und Produktion sowie gegebenenfalls für benachbarte Baulichkeiten darstellen. Das Abschätzen des Risikos ist von großer Bedeutung. Dieses Abschätzen muss für jedes Abbaugelände gesondert erfolgen und ist nicht auf andere Bergbaugelände übertragbar.

■ Durch Abpumpen oder Verpressen von Wasser aus/in tiefen Bohrlöchern ausgelöste Seismizität

Durch das Gewinnen von Thermalwasser, Erdöl und Erdgas aus großen Tiefen, aber auch durch das Verpressen von Wasser in große Tiefen, wie z. B. bei der Tiefengeothermie und beim hydraulischen Aufbrechen von Gesteinsschichten (*hydraulic fracturing*), kann Seismizität induziert werden. Die Stärke solcher induzierten Beben ist gering und für den Menschen kaum wahrnehmbar. Bei stärkeren Beben kann es sich um ausgelöste Seismizität (*triggered seismicity*) handeln. Dabei wird eine sich im Untergrund aufbauende Spannung vorzeitig entladen, das Auftreten eines stärkeren Bebens möglicherweise vermieden.

■ Erschütterungen durch Maschinen und Verkehr

Von Maschinen und vom Verkehr gehen Schwingungen aus, die bei ungünstigen Bodenverhältnissen in den Untergrund eingeleitet und auf Bauwerke übertragen werden können. Erschütterungen können als kurzzeitige Erschütterungen durch Fallimpulse oder Sprengung, als an- und abschwellende Verkehrserschütterung und als Dauererschütterung von beweglichen oder festinstallierten Maschinen wie Rammgeräten, Flächenrüttlern, Hammerwerken und Brecheranlagen auftreten.



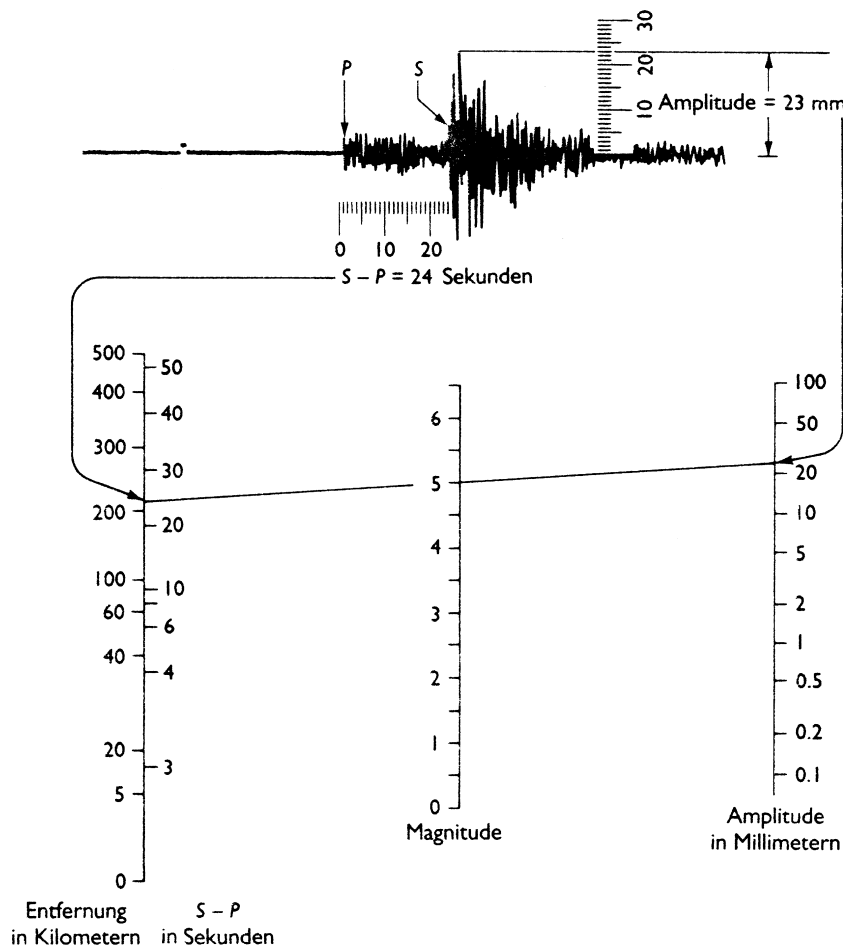
■ **Abb. 2.1** Begriffe zum Beschreiben der Ausbreitung und Wirkung von Erdbebenwellen. **a** Schnitt durch das Herdgebiet, **b** Isoseistenkarte. (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 1995)

2.1.2 Ausbreiten von Erdbebenwellen

Die im Bebenherd (Hypozentrum) erzeugten Erschütterungen breiten sich im elastischen Medium nach allen Richtungen in Form longitudinaler und transversaler Raumwellen aus. Die schnelleren Longitudinalwellen (Schallwellen, Verdichtungs-wellen) werden als P-Wellen bezeichnet. Die Transversalwellen (Scherungswellen) werden als S-Wellen bezeichnet. Die Wellen wandern mit einer vom Gestein abhängigen Fortpflanzungs-geschwindigkeit in die Fortpflanzungsrichtung (in Granit: P-Wellen 5500 m s^{-1} , S-Wellen 3000 m s^{-1}). Das Ausbreiten folgt den Gesetzen der geometrischen Optik. Von Seismographen werden die von den P-Wellen und den S-Wellen hervorgerufenen Erschütterungen nacheinander aufgezeichnet. Die gemessene Zeitdifferenz zwischen P- und S-Wellen ist ein Maß für die Entfernung vom Bebenherd. Aus den Aufzeichnungen eines Bebens an zwei oder mehr Stellen lassen sich Lage und Entfernung des Epizentrums und Tiefenlage des Hypozentrums bestimmen (■ Abb. 2.1).

2.1.3 Stärke von Erdbeben

Um die Stärke von Erdbeben und deren Schadenswirkung auf Bauwerke vergleichen zu können, wurden Erdbebenskalen entwickelt. Am häufigsten verwendet werden die Magnitudenskala (Richterskala) und die Intensitätsskala (MSK).



■ **Abb. 2.2** Nomogramm zum Ermitteln der Richter-Magnitude M_L eines Erdbebens. Gemessen wird der Zeitintervall zwischen P- und S-Wellen in s und die Höhe der Amplitude in mm. (Bolt 1984)

■ **Bebenstärke und Magnitudenskala**

Das 1935 von Richter eingeführte System klassifiziert Erdbeben nach der Amplitude (maximaler Geräteauschlag in mm) der vom Seismographen aufgezeichneten seismischen Welle. Die Stärke eines Erdbebens wird durch seine Magnitude M auf der nach oben und unten offenen Richterskala (Magnitudenskala) charakterisiert.

Die Magnitude wird aus den Maximalwerten der während eines Erdbebens gemessenen Bodenschwingungen und der Entfernung vom Bebenherd (Zeitdifferenz zwischen P- und S-Wellen) abgeleitet. Sie gibt einen Hinweis für die Größenordnung der im Bebenherd freigesetzten Energie (■ Abb. 2.2).

Die Magnitude M eines Erdbebens kann, abhängig vom Messinstrument, von der Art der ausgewerteten Welle und vom Erdbebenmoment abweichend berechnet und gekennzeichnet (M_s, m_b, M_w) werden.

Mit hochempfindlichen Seismographen können schwächste Beben mit der Magnitude $M = -2$ registriert werden. Die Magnituden gerade noch spürbarer Erdbeben liegen bei $M = 1$ bis $M = 2$. Die stärksten bislang weltweit gemessenen Erdbeben liegen bei $M = 8,7$. Die stärksten in Deutschland seit 1800 verzeichneten Erdbeben liegen bei $M = 5$ bis $M = 6$.

■ **Bebenwirkung und Intensitätsskala**

Die Intensität eines Erdbebens wird als Maß seiner Wahrnehmbarkeit durch den Menschen und seiner örtlichen Schadens-

wirkung auf Bauwerke und Landschaft verwendet. Die Intensität wird durch Bewerten und Vergleich verursachter Schäden sowie durch Einschätzen der Wahrnehmbarkeit ermittelt und einem Intensitätsgrad in der zwölfteiligen MSK-Skala zugeordnet (■ Tab. 2.1). Das Eingruppieren von Beben in die Intensitätsskala basiert nicht auf Messwerten. Die Intensität eines Bebens nimmt mit der Entfernung vom Epizentrum ab. Baugrundbeschaffenheit und Bauweise haben erheblichen Einfluss auf die lokale Schadenswirkung. Verbindungslinien zwischen Punkten gleich starker Bebenwirkung werden Isoseisten genannt (■ Abb. 2.1b).

2.1.4 Erdbebenhäufigkeit, Erdbebengefährdung und Erdbebenrisiko

Jährlich werden weltweit Hunderttausende von Erdbeben registriert, von denen die meisten unterhalb der menschlichen Wahrnehmung liegen. Etwa 800 Erdbeben weisen im Jahresdurchschnitt Magnituden über 5 auf der Richterskala auf (■ Abb. 2.2).

■ **Mittlere Wiederholungsperiode**

Die Wiederholungsperiode T_m von Erdbeben ergibt sich aus der Zahl N_k der beobachteten Beben und der Länge der Beobachtungszeit T . Für die Beziehung zwischen der Standzeit von Bau-

■ Tab. 2.1 Intensitätsskala (MSK-Skala) nach Medwedjew et al. (1964, zitiert in: Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 1995)

Grad	Stärke	Wirkungen auf		
		Personen	Gebäude	Natur
1	Unmerklich	Nicht verspürt		
2	Sehr leicht	Vereinzelt verspürt		
3	Leicht	Vor allem von ruhenden Personen deutlich verspürt		
4	Mäßig stark	In Häusern allgemein verspürt	Fenster klirren	
5	Ziemlich stark	Im Freien allgemein verspürt, aufweckend	Hängende Gegenstände pendeln, Verschieben von Bildern	
6	Stark	Erschreckend	Leichte Schäden an Gebäuden, feine Risse im Verputz	Vereinzelt Risse im Feuchten Boden
7	Sehr stark	Viele flüchten ins Freie	Mäßige Schäden an Gebäuden, Risse im Verputz, in Wänden und Schornsteinen	Vereinzelt Erdbeben an steilen Abhängen
8	Zerstörend	Allgemeiner Schrecken	Zerstörungen an Gebäuden, große Risse im Mauerwerk, Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein	Veränderungen in Quellen, Erdbeben an Straßendämmen
9	Verwüstend	Panik	Allgemeiner Gebäudeschaden, an einigen Bauten stürzen Wände und Dächer ein	Bodenrisse, Bergstürze, viele Erdbeben
10	Vernichtend	Allgemeine Panik	Allgemeine Gebäudezerstörungen, Einstürze vieler Bauten	Verbiegen von Eisenbahnschienen, Abgleiten von Lockerboden an Hängen, Aufstau neuer Seen
11	Katastrophe		Schwere Zerstörungen, selbst an bestkonstruierten Bauten	Umfangreiche Veränderungen des Erdbodens, Flutwelle
12	Große Katastrophe		Hoch- und Tiefbauten werden total zerstört	Tiefgreifende Umgestaltung der Erdoberfläche, Flutwellen

werken T_n , der Eintrittswahrscheinlichkeit E eines Bebens und der mittleren Wiederholungszeit T_m gilt:

$$T_m = \frac{T_n}{\ln(1 - E)}$$

Erdbeben, die sich durchschnittlich alle 100 Jahre ereignen ($T_m = 100$ Jahre), treten daher in 100 Jahren ($T_n = 100$ Jahre) mit 63 % Wahrscheinlichkeit ($E = 0,63$) auf. Wenn ein Gebäude über einen Zeitraum von 50 Jahren bestehen soll und eine Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bebens von 10 % nicht überschritten werden darf, folgt aus dieser Gleichung eine mittlere Wiederholungsperiode T_m von 475 Jahren. Mehr als die Hälfte aller Staaten, die eine Erdbebennorm publiziert haben, verwendet heute diese mittlere Wiederkehrzeit als Bemessungsgrundlage (Lenhardt 1996). Für Talsperren gelten besondere Auflagen (Riemer 1995; Huber und Linsbauer 1996; Kolymbas 2011).

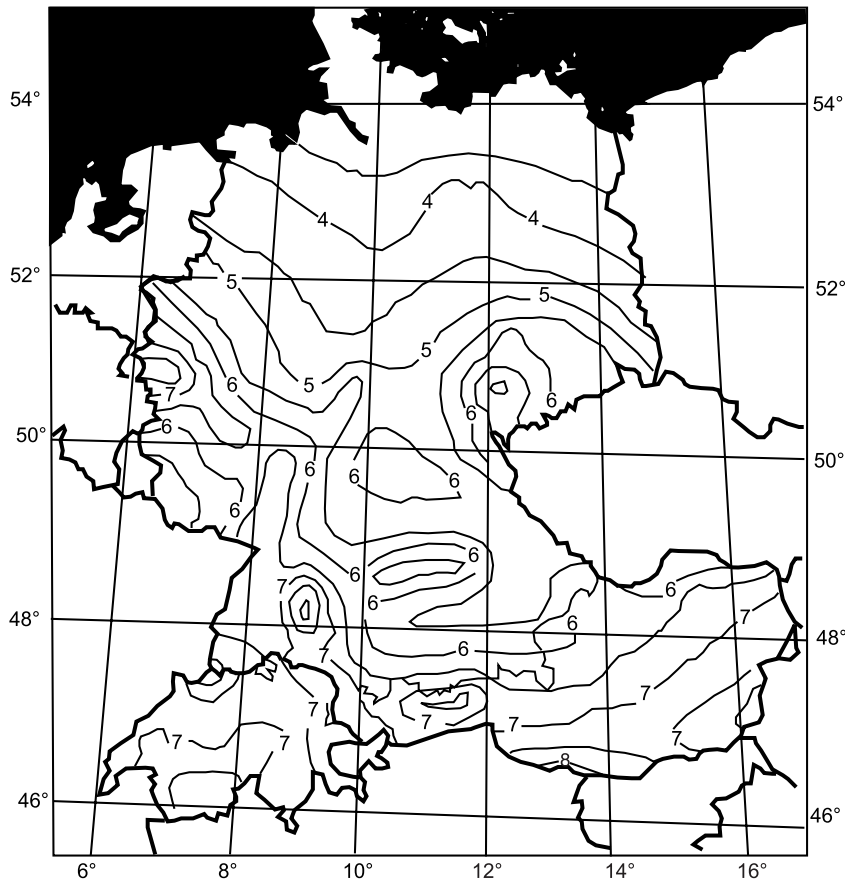
■ Erdbebengefährdung

Unter Erdbebengefährdung versteht man die Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Bodenbewegung an einem definierten Standort auftritt. Für das Planen und Errichten von Bauwerken sind Erdbebengefährdungsbewertungen von Bedeutung (■ Abb. 2.3).

Man unterscheidet zwischen probabilistischen Gefährdungsaussagen, die auf statistischen Berechnungen beruhen, und deterministischen Aussagen, für die ein Beben mit bestimmter Magnitude festgelegt wird. Für das Bewerten seismotektonischer Strukturen sind aktive Verwerfungen zu lokalisieren und deren nachweisliche Verschiebung während der letzten 100.000 Jahre zu bestimmen. Hieraus ergibt sich eine jährliche Verschiebungsrates in mm a^{-1} . Nach einem Vorschlag von Cluff und Cluff (1984, zitiert in Riemer 1995; ■ Tab. 2.2) kann hiermit eine Klassifikation von aktiven Verwerfungen durchgeführt werden. Die Festlegung erfolgt aufgrund geologischer und seismotektonischer Gesichtspunkte. Die mögliche Auswirkung am Standort wird berechnet. Derartige Gefährdungsabschätzungen sind wichtig für besondere Bauwerke wie Talsperren und Atomkraftwerke, für die zusätzliche Nachweise der Betriebssicherheit erbracht werden müssen, welche weit über die für übliche Hochbauten geltenden Anforderungen hinausgehen.

■ Schwingungsverstärkung durch Böden und Bodenverflüssigung

Auf lockeren Böden über Fels treten meist größere Beschleunigungen auf als auf Fels. Häufig sind die Werte um den Faktor 2–3 größer. Besonders gefährlich sind Situationen, bei denen



■ **Abb. 2.3** Erdbebengefährdung (Intensitäten in 50 Jahren mit 10 % Eintrittswahrscheinlichkeit) in Deutschland, Österreich und der Schweiz (Lenhardt 1996). Der Intensitätsgrad 7 wird in mehreren Regionen Österreichs, der Schweiz und Baden-Württembergs sowie in Nordrhein-Westfalen und Sachsen erreicht. Der Intensitätsgrad 8 wird in Baden-Württemberg (Hohenzollerngraben), im Raum Basel und in Österreich an der Grenze zu Italien nahe der Bebenzone von Friaul erreicht

■ **Tab. 2.2** Klassifikation aktiver Verwerfungen nach Cluff und Cluff (1984). Die Erdbebengefährdung nimmt von Klasse 1 (*hoch*) bis Klasse 6 (*niedrig*) ab. (Aus Riemer 1995)

<i>Klasse 1</i>		<i>Klasse 1A</i>	<i>Klasse 1B</i>
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	≥ 10	≥ 5	
Einzelereignis [m]	≥ 1		< 1
Bruchlänge [km]	≥ 100		
Magnitude, Ms	≥ 7,5		< 7,0
Rekurrenzintervall [Jahre]	≤ 100	≤ 1000	≤ 100
<i>Klasse 2</i>		<i>Klasse 2A</i>	<i>Klasse 2B</i>
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	1–10		
Einzelereignis [m]	≥ 1	< 1	≥ 5
Bruchlänge [km]	50–200		≥ 100
Magnitude, Ms	≥ 7,0	< 7,0	
Rekurrenzintervall [Jahre]	100–1000	< 100	≥ 1000
<i>Klasse 3</i>			
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	0,5–5		
Einzelereignis [m]	0,1–3		
Bruchlänge [km]	10–100		
Magnitude, Ms	≥ 6,5		
Rekurrenzintervall [Jahre]	500 – 5000		

■ Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Klasse 4		Klasse 4A	
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	0,1 – 1		
Einzelereignis [m]	0,01–1	≥ 0,5	
Bruchlänge [km]	1–50	≥ 10	
Magnitude, Ms	≥ 5,5	≥ 6,5	
Rekurrenzintervall [Jahre]	1000–10.000		
Klasse 5			
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	< 1		
Rekurrenzintervall [Jahre]	≥ 10.000		
Klasse 6			
Verschiebungsrate [mm a ⁻¹]	< 0,1		
Rekurrenzintervall [Jahre]	> 100.000		

der Boden zur Bodenverflüssigung neigt. Betroffen sind sandige und schluffige Böden sowie Aufschüttungen mit unzureichender Verdichtung über Fels. Die lokale Mächtigkeit der Lockersedimente übt einen großen Einfluss auf die Lokalintensitäten aus. Langwellige Frequenzen unter 2,5 Hz werden im lockeren Boden verstärkt, alle anderen Frequenzen werden gedämpft. Von dem breitbandigen Frequenzspektrum im Epizentrum eines Erdbebens werden mit zunehmender Entfernung nur noch die niedrigen Frequenzen wahrgenommen. Wenn die Eigenfrequenz von Bauwerken mit jener des Untergrundes und der einfallenden Erdbebenwelle koinzidiert, kann es auch an vom Epizentrum weiter entfernten Orten zu Schäden kommen. Die Erschütterungen bewirken im Boden Verdichtung, Porenwasserüberdruck und Abbau der Scherfestigkeit bis zur Verflüssigung. Für Bauwerke auf Flächengründungen bestehen Gefahren in Form von Grundbruch, Geländebruch und Setzungen. Lenhardt (1996) und Kolekova et al. (1996) empfehlen, Bauwerke in derart gefährdeten Gebieten über Pfähle zu gründen.

■ Erdbebenrisiko

Das Erdbebenrisiko beschreibt die Wahrscheinlichkeit möglicher Schadenskosten durch Erdbeben und ist vorrangig für Versicherungsfragen von Interesse. Während die Zahl der pro Zeiteinheit (Jahrzehnt) beobachteten starken Erdbeben (hohe Magnitude auf der Richterskala) weltweit in etwa konstant oder sogar rückläufig ist, steigt als Folge des Bevölkerungswachstums und der baulichen Verdichtung in Ballungsräumen das Erdbebenrisiko. Die Erdbebenstatistik weist für den Zeitraum von 10 Jahren (1985 bis 1995) 40 schwere Beben aus, denen 90.000 Menschen zum Opfer fielen. Der Sachschaden liegt bei über 200 Mrd. Dollar. Japan und Kalifornien dominieren in dieser Statistik. Als Industrieländer auf tektonisch sehr aktivem Untergrund sind sie hinsichtlich der Erdbebenhäufigkeit und Erdbebenstärke besonders stark gefährdet. Das Erdbebenrisiko ist in diesen Ländern sehr hoch. Ein Erdbeben in der Wirtschaftsregion Tokio von gleicher Stärke wie im Jahre 1923 würde heute die Weltwirtschaft weit härter treffen. Aufgrund der internationalen Verflechtung des Kapitals besteht für Versicherer die große Gefahr („worst case“),

dass das angelegte Deckungskapital einerseits zur Deckung der direkten Erdbebenschäden benötigt wird, sich andererseits jedoch der Wert dieser Anlagen an den internationalen Finanzmärkten vermindert.

In Europa gibt es etwa alle 200 Jahre ein verheerendes Erdbeben (Basel 1356, Wien 1590, Lissabon 1755, Messina 1908, Friaul 1976, Mittelitalien 2016). Aus Gebäudeschäden und der Weite des Schüttergebietes wird für das Erdbeben von Basel auf eine Magnitude $M = 7$ geschlossen. Auf der Intensitätsskala wird es auf 9–10 eingestuft, womit es das stärkste Beben in historischer Zeit nördlich der Alpen war. Beben mit Lokalmagnitude 5,8, wie das für Erdbebenschäden in Deutschland typische Albstadt-Beben vom 03.09.1978, haben in Deutschland eine Eintrittswahrscheinlichkeit von etwa 30 Jahren (DGEB 2000).

Das Risiko der Wiederholung eines solchen Bebens muss kalkuliert werden. Im Großraum Basel existiert eine der weltweit dichtesten Konzentrationen der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Bei einem Beben können aus Tanklagern, Transportbehältern und Leitungen z. T. hochtoxische Gase, Flüssigkeiten und Feststoffe austreten. Zusätzlich zu den Bauwerkschäden können vor Ort Atemluft und Gewässer sofort gefährdet werden. Eine Ausbreitung von Schadstoffen über Wind und Wasser könnte sich europaweit auswirken.

Die Vorsorge gegen solche Erdbebenfolgen und die Anwendung erdbebensicherer Bauweisen für Bauwerke und technische Anlagen ist eine wichtige Zukunftsaufgabe.

2.1.5 Erdbebensicheres Bauen

■ Technische Regelwerke

In Erdbebengebieten sind im Vergleich zu Gebieten ohne Erdbeben erhöhte Risiken zu erwarten. Betroffen sind Standsicherheit und Verkehrssicherheit baulicher Anlagen. Zu beachten sind die technischen Regelwerke DIN 1311, Teil 1–4 („Schwingungslehre“), DIN 4149 („Bauten in deutschen Erdbebengebieten“) und Eurocode 8, DIN EN 1998 T1–6 („Auslegen von Bauwerken gegen Erdbeben“).

■ Berechnen bodendynamischer Einwirkungen

Über die Beanspruchung infolge dynamischer Erregungen und über Berechnungsverfahren für die Dämpfung und Erdbebensicherung von Bauwerken berichten Klein (1990), Bachmann (1995), Klein (2001), Vrettos (2008).

■ Konstruktionsmerkmale

Erdbebensicheres Bauen beinhaltet erdbebengerechtes Planen bei Grundrissgestaltung, Massenverteilung im Bauwerk, Bauwerksform, Bauwerksaussteifung und Zähigkeit des Bauwerks (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 1995). Günstig sind kompakt gegliederte, durch Fugen unterteilte Formen mit gleichmäßig verteilten Bauwerksmassen und tiefliegendem Massenschwerpunkt. Es ist ein steifes Gesamtbauwerk anzustreben. Durch die Decken ist eine Scheibenwirkung herzustellen. Bei gemauerten Wänden ist auf sorgfältige Verbindung zwischen tragenden und quer aussteifenden Wänden zu achten. Sie sind gleichzeitig hochzuführen.

Im Leitungsbau sind Sicherheitsventile und Schalter vorzusehen, die im Bebenfall den Fluss gefährlicher Stoffe (Gas, Öl, Strom) unterbrechen.

■ Zähigkeit

Ein Erdbeben führt einem Bauwerk über das Fundament Energie zu. Das Bauwerk speichert diese Energie über Schwingungen in Form kinetischer und potentieller Energie und zerstreut sie über Dämpfung. Die Konstruktion muss die zugeführte Energie verteilen und in andere Energieformen umwandeln oder dissipieren. Energiedissipation erfolgt durch Dämpfen und plastisches Verformen, wobei für den Fall stärkster Beanspruchung große plastische Verformungen im Bauwerk möglich sein sollen, ohne dass der Versagenszustand eintritt. Hohe Zähigkeit besitzen Stahlbauten. In Bauwerken aus Stahlbeton haben die einzelnen Bauteile eine begrenzte Zähigkeit. Durch konstruktive Maßnahmen kann die Bauwerkszähigkeit erhöht werden (DIN 4149, DIN EN 1998). Keine Zähigkeit besitzt Mauerwerk. Mauerwerksbauten werden in Erdbebengebieten auf wenige Geschosse begrenzt. Holzbauten besitzen über die Verformbarkeit der Verbindungen zwischen den einzelnen Balken eine begrenzte Zähigkeit.

■ Gründungen

Im Gründungsbereich lässt sich der Zusammenhalt eines Bauwerks am besten durch Stahlbeton-Plattengründungen sichern, die zusammen mit den Wänden und der Decke des Untergeschosses Steifigkeit erhalten. Bei Streifenfundamenten sind die Längsstreifen durch Querstreifen zu verbinden. Zwischen Einzelfundamenten sind zug- und druckfeste Zerrbalken vorzusehen. Bei Pfahlgründungen sind die Pfahlköpfe über Gurte zug- und druckfest zu verbinden. Die Verbindung der Einzelfundamente kann auch über eine Bodenplatte hergestellt werden. Für Gründungen sind gleichartige Gründungselemente vorzusehen und diese auf gleichartigem Baugrund zu führen. Teilunterkellerungen sind zu vermeiden.

2.1.6 Vorhersage von Erdbeben

Die Vorhersage von Stärke, Ort und Zeitpunkt künftiger Erdbeben ist ein Ziel, mit dem die Anordnung umfassender Maßnahmen zur Rettung von Menschen, Tieren und Sachwerten möglich wäre. Vage Prophezeiungen lassen nur halbherzige Warnungen und begrenzte Sicherheitsvorkehrungen zu. Auch die Annahme, dass an bestimmten geologischen Strukturen in regelmäßigen Zeitabständen die Erde bebt, sowie deren plattentektonische Begründung sind kein Beitrag für zuverlässige Erdbebenvorhersage.

In der Vergangenheit hat es mehrfach zutreffende Erdbebenvorhersagen gegeben, bei denen der Schaden durch entsprechende Warnung gering gehalten wurde (z. B. in China: Hai-cheng-Beben 1975, Yünnan-Beben 1976). Diesen Vorhersagen stehen starke Erdbeben, die ohne Vorhersage eingetreten sind, sowie Fälle von Fehlalarm gegenüber.

Bekannte Vorstellungen von Erdbebenvorhersagen beruhen auf dem Verhalten von Tieren, welche Erdbeben bereits vor deren Eintreten spüren sollen. Ob und wie seismische Aktivität durch anomales Tierverhalten vorhergesagt werden kann, lässt sich allerdings nicht zuverlässig nachprüfen.

Andere Vorstellungen gehen von Beziehungen zwischen bestimmten Planetenkonstellationen und der Erdbebenhäufigkeit aus. Diese Beziehungen haben sich nicht bestätigt.

Es gibt bislang keine wissenschaftlich anerkannte Methode, mit der zuverlässige Vorhersagen möglich sind.

2.1.7 Messtechnisches Überwachen erdbebengefährdeter Gebiete – Monitoring

Die Bemühungen zur Erdbebenvorhersage konzentrieren sich seit Beginn der neunziger Jahre auf das Messen bestimmter physikalischer und chemischer Eigenschaften, deren Änderung Erdbeben vorausgehen soll. Erdbeben geht eine Spannungsänderung im Untergrund voraus. Mit dem Aufbau tektonischer Spannungen stellen sich im Boden und im Grundwasser Veränderungen ein, die mit physikalischen und chemischen Methoden gemessen werden können. Solche Änderungen werden von Kissin und Jasko (1992) als hydrogeodynamische bzw. als hydrogeochemische und hydrogeothermische Erdbebenvorzeichen beschrieben. Zur ständigen Kontrolle der Spannungszustände im Untergrund können in erdbebengefährdeten Gebieten an nach tektonischen und hydro-geologischen Kriterien ausgewählten Stellen Grundwasserbeobachtungspiegel eingerichtet und hierin spannungsabhängige Veränderungen gemessen werden. Es ist das Ziel, solche Änderungen an möglichst vielen Punkten zu messen, um aus dem Vergleich der gemessenen Änderungen Rückschlüsse auf Spannungszustände und erdbebenauslösende Faktoren ziehen zu können. Sollte sich diese Methode bewähren, wären die erdbebengefährdeten Gebiete mit einem Netz von Messstationen zu überziehen. Die Messstationen können via Satellit in ständiger Funkverbindung mit einer Zentrale stehen, wo der permanente Datenvergleich und die Bewertung von Gefahrensituationen erfolgt. Der Stand der Satelliten- und Computertechnik bietet hierfür eine ausreichende Basis. Diese komplexe Methode geo-



<http://www.springer.com/978-3-662-46885-2>

Handbuch der Baugologie und Geotechnik

Dachroth, W.

2017, XXI, 749 S. 470 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-662-46885-2