

ZUSAMMENFASSUNG

Erdbeben

Prof. Dr. Egon Lanz

(für alle Abbildungen und mehr Details, siehe Vortragspräsentation im Mitgliederbereich der Geologie-Zirkel-Homepage: <https://geologie-zirkel-biberach.de/mitgliederbereich/#2025>; die unten genannten Abbildungsnummern beziehen sich auf die Foliennummern in der Vortragspräsentation)

Erdbeben zählen zu den schlimmsten Naturkatastrophen. Ohne zuverlässige Vorzeichen können sie in Sekunden 100 000e von Menschenleben auslöschen, die Infrastruktur wie Gebäude, Straßen und Brücken zerstören, die Wirtschaft weiter Landstriche für längere Zeit lahmlegen und ganze Staatswesen ruinieren. Das Thema interessiert mich seit jeher als Anästhesist/Notfall- und Katastrophenmediziner sowie als Vater eines Sohnes, der in Kalifornien, einem hoch gefährdeten Erdbebengebiet, lebt. Erfreulicherweise erlebte ich während meines Lebens kein starkes Beben.

Was sind Erdbeben?

Es sind Erschütterungen, Schwingungen des Untergrunds (Press und Siever). Sie entstehen, wenn Gesteine, meist über längere Zeit deformiert wurden, plötzlich zerbrechen. Typischerweise werden sie ausgelöst, wenn sich zwei Gesteinsblöcke beidseits einer Störung ruckartig verschieben. Dies geschieht meist an Plattengrenzen im Bereich der Erdkruste oder seltener des Oberen Mantels, verursacht durch die Kräfte der Plattentektonik.

Besonders klar zeigt dies die Abb. 2 (cf. Vortragspräsentation). Die Krustenblöcke A und B würden durch tektonische Kräfte in entgegengesetzte Richtungen verschoben, wenn dies nicht Reibungskräfte überlagernder Gesteine verhindern würden (a). So werden die beiden Blöcke deformiert (b). Es baut sich eine Spannung auf bis die „Reibungsblockade“ überwunden wird und es zum Aufreißen an der Störungsfläche kommt (c). Der Herd des Bebens (= Hypozentrum) ist der Bereich der Initialbewegung, das Epizentrum ist der Punkt an der Erdoberfläche, der über dem Hypozentrum liegt. Die beiden Blöcke verschieben sich in einem Teilbereich der Störung um den sog. Versatzbetrag (d).

Ursachen von Erdbeben

Die Ursachen von Beben sind vielfältig. Meist handelt es sich um Plattenbewegungen, die neue Verwerfungen entstehen lassen (Abb. 3).

Seismische Wellen

Wenn sich große Steinblöcke plötzlich verschieben, breiten sich vom Bebenherd Bodenschwingungen aus. Es sind elastische Wellen, die sog. Erdbebenwellen oder seismischen Wellen. Sie breiten sich konzentrisch um die ganze Welt aus. Dabei wird die vorher allmählich aufgestaute Spannungsenergie freigesetzt.

Die Analyse seismischer Wellen ermöglicht es den Seismologen, den Erdbebenherd zu orten, die Stärke und Anzahl der Beben zu bestimmen und die Zusammenhänge mit Störungen zu deuten.

Das wichtigste Instrument zur Untersuchung der Erdbeben und auch tiefer liegender Bereiche im Erdinneren ist der Seismograph. Er lässt sich am besten an den ersten, noch einfach konstruierten

Geräten erklären (Abb. 4). Er kann horizontale und vertikale Bewegungen der Erdoberfläche aufzeichnen. Wegen der Aufhängung einer trägen Masse an einer Feder oder einem Scharnier ist die Masse von der Bewegung des Untergrunds weitgehend abgekoppelt. Die Schreibspitze zeichnet die Abstandsschwankungen zwischen Masse und Untergrund auf und registriert somit die durch seismische Wellen verursachten Erschütterungen. Moderne Seismographen enthalten viel Elektronik (Abb. 5).

Ein typisches Seismogramm zeigt die Abb. 6 mit drei verschiedenen Wellen, die nacheinander an einem Seismographen ankommen: Die schnellen Primärwellen = P-Wellen, die langsameren Sekundär = S-Wellen. Diese Raumwellen durchlaufen auch das Erdinnere. Die P-Wellen sind Kompressions- oder Longitudinalwellen, allerdings schneller als der Schall ($\sim 6-8 \text{ km/s}$ vs. $0,34 \text{ km/s}$ für Schallwellen in der Luft). Die S-Wellen sind Scher- oder Transversalwellen ($\sim 3-4 \text{ km/s}$) (Abb. 7).

Schließlich folgen die Oberflächenwellen, die sich ausschließlich entlang der Erdoberfläche ausbreiten (Abb. 8). Unter ihnen unterscheidet man die Rayleigh Wellen, wo sich die Bodenteilchen retrograd-elliptisch bewegen; bei den Love-Wellen bewegen sie sich horizontal.

Ortung des Erdbebenherdes

Das Prinzip, ein Epizentrum eines Bebens zu orten, ähnelt dem Vorgehen, mit dem man bei einem Gewitter aus dem Zeitunterschied zwischen dem Sehen des Blitzes und Hören des Donners die Entfernung des Gewitters bestimmt. Dabei entsprechen die Lichtwellen des Blitzes den P-Wellen eines Bebens und die Schallwellen des Donners den langsameren S-Wellen. Die Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der P- und S-Wellen (Laufzeiten) am Ort des Seismographen hängt von der jeweils zurückgelegten Entfernung vom Herd ab.

Bestimmung der Bebenstärke

1935 entwickelte der amerikanische Seismologe Charles Richter (Abb. 9) ein Verfahren, die Stärke eines Bebens zu bestimmen. Aus der maximalen Amplitude der Bodenbewegung leitete er die Magnitude für die logarithmische Richter-Skala ab (Abb. 10). Diese wurde im Laufe der Zeit mit Korrekturfaktoren modifiziert; z. B. wurde die Entfernung zwischen Epizentrum und Seismograph berücksichtigt. Die Skala umfasste Magnituden zwischen 0 und 10. Die höchste bisher erreichte Stärke betrug 9,5 Magnituden beim Chile-Erdbeben von 1960.

Richter konnte auch eine Beziehung zwischen Stärke des Bebens in Magnituden und Freisetzung von Energie in TNT-Äquivalenten herstellen (Abb. 11).

Eine weitere Methode, die Stärke eines Bebens zu beurteilen, ist die Beschreibung der Schäden an Bauten. Dies erfolgt mit der Mercalli-Skala mit Werten von I bis XII. Stufe I wird nicht wahrgenommen, XII beschreibt völlige Zerstörung (Abb. 12). Diese Skala wurde mehrfach modifiziert.

Jährlich gibt es rund 1,5 Millionen Erdbeben der Magnitude 2 und höher (Abb. 13). Die stärksten Beben mit Magnituden zwischen 9 und 9,5 sind extrem selten (Abb. 14).

Nach Erdbeben untersuchen Seismologen die Epizentren, um die tektonischen Bewegungsvorgänge am Herd aufzuklären. War das Beben das Ergebnis einer Ab-, Auf-, Über- oder Horizontalverschiebung (Abb. 15)? Was ist im Gelände sichtbar? Oft nichts. Dann können die Seismogramme Auskünfte über die Vorgänge an den Störungen liefern.

Plattentektonik

Erdbeben treten in bestimmten Erdbebengürteln auf, z. B. am circumpazifischen Erdbebengürtel, der auch wegen seiner Vulkane „Feuerring“ genannt wird (Abb. 16). Die mittelozeanischen Beben folgen dem Verlauf der mittelozeanischen Rücken. Diese bestehen aus Segmenten, die durch

Transformstörungen gegeneinander versetzt sind. Die Flachbeben finden an divergierenden Grenzen und an Transformstörungen statt (Abb. 17). Tiefbeben, in einer Tiefe von 100 bis 700 km, erfolgen meist an Kontinentalrücken oder Inselketten, oft in der Nachbarschaft von Tiefseerinnen und jungen Vulkanen (Abb. 18). So treten die meisten Beben an Plattengrenzen auf. Nur wenige Beben treten innerhalb von Platten auf, die sog. Intraplatten-Beben, z. B. mitten in den USA. Kräfte können wohl aus großer Entfernung von den Plattengrenzen aus tektonische Bewegungen auslösen.

Erdbebenzonen

Deutschland ist ein relativ erdbebensicheres Land. Es gibt nur einige Zonen, in denen immer wieder schwächere Beben auftreten, z. B. die Gegend um Albstadt, der Südschwarzwald, die niederrheinische Bucht und Thüringen/Sachsen (Abb. 19).

Biberach liegt in der zweitniedrigsten Erdbebenzone 1, südöstlich der aktiven Zone um Albstadt (Abb. 20).

Unsere Gegend ist gut mit Erdbebenstationen versorgt.

In den letzten 4 Wochen waren in Süddeutschland lediglich 2 Erdbeben der Intensität 2-3. Während der letzten 365 Tage traten 2 Beben mit Magnituden 3,4 auf. Hierzu ein eindrucksvoller Vergleich: In derselben Zeit rüttelten im Erdbeben-Staat Kalifornien 679 Beben, darunter eines der Magnitude 4 und zwei der Magnitude 3 (Abb. 21). Die meisten Beben hatten Magnituden unter 2, wurden also meist nicht wahrgenommen.

1356 war in unserer Nähe, in Basel, das schlimme Beben der Magnitude 6-7,1.

1935 war das Beben um den Federsee und Herbertingen mit Schäden in Kappel (Bad Buchau). Seine Magnitude war 5-6.

Während der letzten Woche war im Südwesten Deutschlands ein Beben in Kirchheim/Teck mit einer Magnitude von 0,8.

Die Erdbeben in Europa sind von den hiesigen Plattengrenzen abhängig (Abb. 22): Dehnung am mittelatlantischen Rücken, Plattengrenze eurasische/afrikanische Platte nahe Gibraltar, Subduktion in Afrika, Apennin und Dinariden, Subduktion im östlichen Mittelmeer sowie in den nord- und ostanatolischen Rücken. Dehnung und Absenkung in Oberrheingraben und niederrheinischer Bucht, Transformstörung in Südspanien. Subduktion in den Alpen und Karpaten.

Entsprechend sind die Erdbebengebiete Europas in Südspanien, ganz Italien, ehemaligem Jugoslawien, Griechenland und Türkei, Griechischen Inseln, Zypern, Alpen und Karpaten (Abb. 23).

Die Schweiz, Österreich und Rumänien sind Erdbebengebiete (Abb. 24).

Italien wird immer wieder von starken Beben heimgesucht, z. B. Messina 1908 mit Magnitude 7,0 und 100 000 Toten.

Die Türkei ist ein hochgefährdetes Erdbebenland (Abb. 25). Die arabische Platte schiebt auf die ostanatolische Platte. Hier war das letzte starke Beben 2023 mit einer Magnitude von 7,8 und 53000 Toten. Außerdem reibt die nordanatolische Platte in einer Transformstörung entlang der eurasischen Platte nach Westen. Hier drohen die nächsten Katastrophen nahe der Millionenstadt Istanbul.

Das Erdbeben von Tokio 1923 hatte eine Magnitude von 7,9 und 142 000 Tote zur Folge. Dort subduzieren die pazifische und philippinische Platte jeweils unter die eurasische Platte, auf der Japan liegt (Abb. 26).

In China liegen zahlreiche Herde auf der eurasischen Platte, sog. Intraplatten-Erdbeben. In Shaanxi/Zentralchina ereignete sich 1556 das verheerendste Beben der Geschichte mit einer Magnitude 9,2 und 830 000 Toten! Die Einwohner lebten damals in Lösshöhlen, die einbrachen (Abb. 27).

In besonderer Erinnerung haben wir das Sumatra-Andamanen-Erdbeben 2010 mit einer Magnitude von 9,2. Die Burma-Platte wurde von der indischen Platte nach unten gezogen und schnellte zurück, was einen schrecklichen Tsunami mit 230 000 Toten an den Stränden des indischen Ozeans auslöste (Abb. 28).

Ein weiteres folgenschweres Erdbeben war das von Haiti im Jahre 2010 mit einer Magnitude von 7,0 und 200 - 500 000 Toten. Das Land hat sich bis heute immer noch nicht politisch und wirtschaftlich erholt. Die karibische Platte liegt eingezwängt zwischen nordamerikanischer -, Cocos-, Nazca- und südamerikanischer Platte. Durch Haiti zieht eine Transformstörung, wo nordamerikanische und karibische Platte aneinander vorbeireiben (Abb. 29).

Die gesamte Westküste Südamerikas ist Erdbebengebiet. Die Nazca-Platte subduziert unter die Südamerikanische Platte mit den Anden (Abb. 30).

Während ich mich auf diesen Vortrag vorbereitete, ereigneten sich mehrere starke Beben:

Im März 2025 das Beben in Myanmar, nahe Mandalay (siehe Abb. 31)

Im Juli 2025 das Beben von Kamtschatka (siehe Abb. 32). Es war das sechst stärkste Beben seit Aufzeichnungen!

Kurz danach zitterte Afghanistan (Abb. 33).

Es folgten drei weitere starke Beben in Venezuela, Philippinen und Türkei.

Das Beben von San Francisco 1906

Es ist das bekannteste Beben der Geschichte (Abb. 34). Die Telegraphie und ein weltweit etabliertes Pressewesen ermöglichten eine moderne Berichterstattung der Geschehnisse in Wort und Bild. Das Ereignis wurde mehrfach geschildert, besonders ausführlich im Buch von Simon Winchester „Ein Riss durch die Welt“.

1906 waren auch schon vereinzelt Seismographen installiert. Ein Seismogramm vom Beben 1906 liegt vor, tadellos aufgezeichnet in Göttingen/Deutschland (Abb. 35).

Ganz im Vordergrund der Katastrophe stand die vier Tage lange Feuersbrunst, die durch Brand von Gasleitungen, Öfen, Kaminen sowie Brandstiftung entstand (Abb. 36). Selbst wichtige, gut gebaute Gebäude wurden zerstört (Abb. 37 und 38).

Das Beben hatte zahlreiche politische, soziale Langzeitfolgen für Kalifornien (Abb. 39).

Nicht zuletzt wirkte sich das Ereignis auf die Erforschung und das Verständnis der Erdbeben aus (Abb. 40). Die Seismologie machte sprunghafte Fortschritte.

Wie verändern Erdbeben die Landschaft?

Es entstehen eindrucksvolle Gräben, z. B. der San Andreas-Graben (Abb. 41). Flüsse und Bäche werden versetzt, z. B. am Wallace Creek in Kalifornien (Abb. 42). Langgestreckte Seen entstehen, heute als Wasserreservoirs genutzt, z. B. der San Andrea-Lake (Abb. 43). Meeresbuchten bilden sich, z. B. Tomales Bay (Abb. 44). Erdbeben sind häufig (Abb. 45), ebenso Straßenschäden (Abb. 46). Verflüssigung des nassen Bodens (Liquefaction) stellt sich ein.

Verheerende Folgen von Erdbeben

Sie betreffen Menschenleben, humanitäre Krisen, Störungen der Infrastruktur und Wirtschaft, Feuer und Tsunamis (Abb. 47).

Tsunamis

Wir alle werden den unsäglichen Tsunami 2004 mit 230 000 Toten, ausgelöst durch das o. g. Sumatra-Andamanen-Beben, nicht vergessen. Deshalb nur wenige grundsätzliche Informationen zu dieser Naturkatastrophe. Eine untermeerische Bruchscholle bewegt sich aufwärts und stößt eine

Wassersäule nach oben (Abb. 48). Die Folgen sind bis an weit entfernte Küsten vernichtend (Abb. 49).

Todesfälle abhängig von ...

Sie sind von verschiedenen Gegebenheiten abhängig. Den größten Einfluss hat wohl die Bauweise („Nicht Beben, Gebäude töten“) (Abb. 50).

Erschütterungen führen zu verschiedenen Schäden

Die o.g. seismischen Wellen leiten unterschiedliche Erschütterungen ein, die dann zu verschiedenen Schäden führen (Abb. 51 und 52): Plattenbauten kollabieren, Hausfassaden fallen herunter, Brücken kippen und brechen zusammen, Nachbarhäuser stoßen zusammen und kollabieren, Bausteinhäuser brechen auseinander und fallen zusammen, Steilküsten rutschen ab und reißen Gebäude mit.

Minderung des Erdbebenrisikos zum Schutz des Lebens

Karten mit gefährdeten Erdbebenzonen werden erstellt. Empfehlungen, Regeln, Vorschriften, Gebote und Bauvorschriften, bestimmte Gebiete mit Bauten zu meiden sind unabdingbar (Abb. 53).

San Francisco ist ein schlechtes Beispiel. Mitten durch die bebaute Stadt zieht der San Andreas Graben.

Das typische amerikanische Holzhaus ohne Keller mit leichtem Dach sitzt auf einer Beton-Mauer. Diese ist mit dem Holzrahmen des Hauses verbunden (siehe Verbindungen im Haus unseres Sohnes (Abb. 54 und 55). Es soll dadurch relativ erdbebensicher sein.

Hochhäuser werden durch Kabel, Bolzen, Verstreibungen, Gerüste, Rollen und Federn stabilisiert (Abb. 56). Tilgerpendel oben auf Hochhäusern dämpfen Schwankungen, ebenso Gleitschienen an Pipelines (Abb. 57). Auch das Laborgebäude unseres Sohns an der Stanford University ist durch massive Verstreibungen verstärkt (Abb. 58). Sämtliche Gebäude sind dort erdbebengesichert. In der Forschung werden Modellrechnungen in „Synthetischen Erdbeben“ angestellt. Zuletzt wurde mit PEGS (Prompt elasto-gravity signals) gearbeitet, Signalen, die schneller als P-Wellen sind. Ziel ist es, Frühwarnsysteme zu entwickeln, die Warnsignale über Funk, TV, Internet aussenden und bestimmte Schritte automatisch auslösen, z. B. einen Zug ohne Zutun des Menschen anhalten.

Frühwarnsysteme wurden gegen Tsunamis installiert und erfolgreich eingesetzt, besonders für die Anrainer des Pazifiks und zuletzt des Indischen Ozeans. Gegen Erdbeben sind sie weniger erfolgreich, da die Zeitintervalle zwischen Einsetzen des Erdbebens und Ankunft der seismischen Wellen in der Regel zu kurz für die Durchführung von Sicherheitsmaßnahmen sind.

Voraussagen

Voraussagen von Erdbeben sind leider unzuverlässig (Abb. 59). Langzeitvoraussagen aufgrund wiederholter Erdbeben in einer gefährdeten Zone sind sehr ungenau. Dies gilt auch für Kurzzeit-Prognosen. Ist ein schwaches Beben ein „normales Beben“ oder ein „Vorbeben“? Hierzu wurden Geschwindigkeit der P-Wellen, Bodenhebungen, Radon-Emissionen, auch spezifische elektrische Widerstände und die Anzahl seismischer Ereignisse untersucht (Abb. 60). Beobachtungen auffälliger Verhaltensweisen von Tieren wurden gemacht. Leider erlauben diese Parameter keine regelmäßig zuverlässigen Voraussagen.

Mit Erdbeben leben

Die Forschung mit dem Ziel, möglichst viele Menschenleben vor dem Tod durch Erdbeben-Verschüttungen zu bewahren, ist in vollem Gange (Abb. 61). So wurde in Japan ein gigantischer Erdbeben-Simulator entwickelt, wo in einer mehrstöckigen Halle auf einer riesigen Palette voll ausgestattete Häuser „gerüttelt“ werden, um Schäden durch Beben abzuschätzen und zu verhindern. Bis sich weitere Erfolge in der Voraussage von Beben einstellen, bleibt nur übrig, die Beben zu

verstehen und mit ihnen zu leben, d. h. sich seine Umgebung sicher einzurichten und sein Verhalten gegenüber den Beben gemeinsam mit anderen zu schulen.

Literatur und Abbildungen (Abb. 62)