

utb.

Pfiffner | Engi
Schlunegger | Mezger | Diamond

Erdwissenschaften

2. Auflage

basics

A photograph of a volcanic landscape. The foreground and middle ground are dominated by vibrant red and yellow hills, likely composed of volcanic ash and minerals. A grey, rocky mountain peak rises in the background under a clear blue sky. A thin white curved line separates the text from the image.

utb 3632



Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Böhlau Verlag · Wien · Köln · Weimar

Verlag Barbara Budrich · Opladen · Toronto

facultas · Wien

Wilhelm Fink · Paderborn

A. Francke Verlag · Tübingen

Haupt Verlag · Bern

Verlag Julius Klinkhardt · Bad Heilbrunn

Mohr Siebeck · Tübingen

Nomos Verlagsgesellschaft · Baden-Baden

Ernst Reinhardt Verlag · München · Basel

Ferdinand Schöningh · Paderborn

Eugen Ulmer Verlag · Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft · Konstanz, mit UVK/Lucius · München

Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen · Bristol

Waxmann · Münster · New York



0. Adrian Pfiffner | Martin Engi Fritz Schlunegger | Klaus Mezger Larryn Diamond

Erdwissenschaften

2., korrigierte und aktualisierte Auflage

Haupt Verlag

Hinweis: Die Abbildungen dieses Buches gibt es auch als Powerpoint-Folien. Sie eignen sich ausgezeichnet für den Unterricht und die Projektion mit dem Beamer. Der Foliensatz ist erhältlich im UTB Online-Shop: www.utb-shop.de/

2. Auflage 2016

1. Auflage 2012

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

2016 © by Haupt, Bern

Das Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jeder Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlag, Gestaltung und Satz: Atelier Reichert, D-Stuttgart

Abbildungen: Digikarto, Andreas Baumeler, CH-Zürich

www.haupt.ch

UTB Band-Nr.: 3632

ISBN: 978-3-8463-4381-4

eBook-Herstellung und Auslieferung:

Brockhaus Commission, Kornwestheim

www.brocom.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1 Unser Planet Erde

- 1.1 Außenansicht unseres Planeten
- 1.2 Das Innere der Erde
- 1.3 Von den driftenden Kontinenten zur Plattentektonik

2 Mineralogie

- 2.1 Grundbegriffe
- 2.2 Der innere Aufbau von Mineralen
- 2.3 Beziehungen von Struktur und Zusammensetzung
- 2.4 Polymerisierung
- 2.5 Wichtige gesteinsbildende Silikate
- 2.6 Wichtige Nichtsilikate

3 Magmatismus

- 3.1 Grundbegriffe
- 3.2 Woraus bestehen magmatische Gesteine?
- 3.3 Kristallisation aus Schmelzen
- 3.4 Wo und wie entstehen Magmen in der Erde?
- 3.5 Magmatische Gefüge: Zeugen der Kristallisation
- 3.6 Systematik magmatischer Gesteine
- 3.7 Magmenentwicklung
- 3.8 Magmatische Differentiation und Konvektion

- 3.9 Charakter intrusiver Magmenkörper
- 3.10 Effusiver Vulkanismus und seine Produkte
- 3.11 Explosiver Vulkanismus und seine Produkte
- 3.12 Magmatische Komplexe

4 Exogene Prozesse und ihre Produkte

- 4.1 Die exogenen Prozesse
- 4.2 Gesteine als Produkte exogener Prozesse
- 4.3 Die Bildung klastischer Sedimente
- 4.4 Die Karbonatfabrik
- 4.5 Evaporitgesteine und Ablagerungsbereiche
- 4.6 Diagenese – die Entwicklung vom Lockergestein zum Festgestein

5 Deformation der Gesteine und Plattentektonik

- 5.1 Deformation der Erdkruste
- 5.2 Plattentektonik
- 5.3 Gebirge und Gebirgsbildung

6 Metamorphose

- 6.1 Grundbegriffe
- 6.2 Wie erkennt man metamorphe Gesteine?
- 6.3 Tektonik, Wärmefluss und Metamorphosetypen
- 6.4 Metamorphe Mineralreaktionen
- 6.5 Metamorphe Gefüge und Gesteinsklassifikation
- 6.6 Metamorphosegrad und metamorphe Fazies
- 6.7 Beispiele metamorpher Komplexe

7 Geochemie des Sonnensystems

- 7.1 Entstehung der Elemente

- 7.2 Verteilung der Elemente
- 7.3 Bildung von Planeten
- 7.4 Bildung der Erde und des Mondes
- 7.5 Isotopengeochemie

8 Rohstoffe

- 8.1 Grundwasser
- 8.2 Fluide und Erze
- 8.3 Erdöl und Erdgas

9 Erdgeschichte

- 9.1 Die ersten vier Milliarden Jahre Erdgeschichte
- 9.2 Von der kambrischen Explosion bis zur Jetztzeit
- 9.3 Massenaussterben und mögliche Gründe dafür

Glossar

Register

Zu den Autoren

Vorwort

Die Erdwissenschaften beschäftigen sich mit der Entstehung und Veränderung von Mineralen und Gesteinen unserer Erde und mit den Prozessen, die tief im Innern und an der Oberfläche des Planeten ablaufen. Dazu gehören Phänomene wie Erdbeben, Vulkanismus, die Entstehung der Gebirge und deren Oberflächengestaltung. Diese Prozesse stehen in Zusammenhang mit den Bewegungen der tektonischen Platten, welche imstande sind, ganze Kontinente zu verschieben und Ozeanbecken zu öffnen und zu schließen. Auf den Landmassen erfolgt Abtrag durch die Aktion der Schwerkraft, in Zusammenarbeit mit Wasser, Eis und Wind. Naturereignisse wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Bergstürze und Überflutungen beeinflussen unseren Lebensraum direkt und nachhaltig. Die Versorgung unserer Gesellschaft mit Rohstoffen und Energie sind ebenfalls wichtige Aufgaben, für welche die Erdwissenschaften Lösungen suchen müssen. Man denke nur an das Auffinden von Erzen, Erdöl und Erdgas, Kohle oder Trinkwasser, ohne die eine moderne Wirtschaft undenkbar ist und ohne die der derzeitige Lebensstandard nicht möglich wäre. Die Erdwissenschaften enthalten aber auch eine historische Komponente: Wie ist unser Planet entstanden? Wie verschoben sich Kontinente im Verlaufe der geologischen Zeiten? Wie ist die Entwicklung der Tier- und Pflanzenwelt in diesem Zusammenhang zu sehen? Für die Beantwortung dieser und anderer Fragen gibt das Verständnis der Entstehung von Mineralen und Gesteinen wertvolle Hinweise.

Dieses Buch will den Einführungskurs zum Bachelor-Studium «Grundzüge der Erdwissenschaften» unterstützen. Als wir in Bern die Lehrveranstaltungen Geologie und Mineralogie-Petrologie des ersten Jahres im Diplomstudium zusammenlegten, führten wir

lange Diskussionen um die Inhalte, die in einer gemeinsamen Lehrveranstaltung für Studierende der Erdwissenschaften und der Geographie sinnvoll sind. Obschon die Ozeanographie und die Atmosphäre sehr wichtig sind, namentlich hinsichtlich Fragen des Klimas und der Umwelt, konzentrierten wir uns bewusst auf die «feste Erde». Den Stoff auf die gesamten Geowissenschaften auszuweiten, hätte beim gegebenen Umfang unweigerlich zu einer nachteiligen Verdünnung der Erdwissenschaften geführt.

Erdwissenschaftliche Phänomene entstehen durch das komplexe Zusammenspiel vieler und verschiedenartiger Prozesse. Um aber das Zusammenspiel zu verstehen, müssen als Grundlage zuerst die beteiligten Prozesse erkannt und verstanden sein. In jedem der Kapitel sind deshalb verwandte Prozesse für sich diskutiert, sodass jedes Kapitel in sich abgeschlossen ist. Beim Inhalt setzten wir den Schwerpunkt auf die Prozesse und vermieden eine ausführliche Besprechung mit Fallbeispielen und Klassifikationsschemata. Die exemplarisch ausgewählten Beispiele sollen die implizierten Prozesse verständlich machen. Wo wünschbar, werden die Dozierenden zusätzliches Material einbauen und dies sicherlich mit Fallbeispielen aus dem eigenen Forschungsfeld ergänzen können.

Die Reihenfolge der Kapitel war nicht einfach festzulegen. Dass eine Einführung über das Antlitz unseres Planeten und die Struktur des Erdinneren an den Anfang gesetzt wird, scheint naheliegend – auch wenn hier schon gewisse Begriffe verwendet werden, welche erst anschließend besprochen werden. Bei der Reihenfolge der restlichen Kapitel war es lediglich wichtig, die Minerale vor den Gesteinen zu behandeln und die Metamorphose der Besprechung der Sedimentgesteine und der magmatischen Gesteine hintenzustellen. Da der Einführungskurs auch mit einem Praktikum verbunden ist, ergeben sich zwangsläufig gewisse Umstellungen in der Reihenfolge, um die Abstimmung zu verbessern. Der Gesamtumfang der einzelnen Kapitel reflektiert in etwa den zeitlichen Aufwand dieser Teile in unserer Lehrveranstaltung.

Dieses Buch hat wesentlich gewonnen durch die graphische Gestaltung von Andreas Baumeler. Er verstand es, den engen

Spielraum, den ein Zweifarbendruck mit sich bringt, kreativ zu nutzen. Seine Rückfragen zu inhaltlichen Aussagen der Abbildungen zwangen die Autoren oft, ihre Vorstellungen nochmals zu überdenken, Dinge klarzustellen und zu vereinfachen. Viele der über 200 Abbildungen pendelten mehrmals zwischen Autor und Graphiker hin und her, bis alle Anliegen zufriedengestellt waren. Christian Schlüchter gebührt herzlichen Dank für die wertvollen Hinweise und Skizzen zu glazigenen Formen und zum Paläoklima. Ein großer Dank geht auch an Thomas Armbruster für die Gestaltung der diversen Silikatstrukturen. Danken möchten wir aber auch unseren Studierenden, die mit ihren Fragen und Kommentaren zur Verbesserung unserer gemeinsamen Lehrveranstaltung und somit auch dieses Buches beitrugen.

Wir hoffen, mit diesem Buch die Lehre der Erdwissenschaften im Einstiegskurs des universitären Bachelor-Studiums zu unterstützen sowie die Freude an dieser höchst interessanten und für die Gesellschaft immer wichtigeren Wissenschaft zu wecken und zu fördern.

1.1 Außenansicht unseres Planeten

1.2 Das Innere der Erde

1.3 Von den driftenden Kontinenten zur Plattentektonik

Die Erdwissenschaften befassen sich mit dem Bau unseres Planeten und mit den Prozessen, die heute auf der Oberfläche und im Innern der Erde ablaufen. Das Verständnis dieser Prozesse soll auch dazu dienen, die Entstehungsgeschichte unseres Planeten zu eruieren. Das erste Kapitel dieses Lehrbuches soll deshalb eine großmaßstäbliche Gesamtschau des Planeten sein. Im ersten Unterkapitel (1.1) geht es um das Antlitz der Erde, die Verteilung von Meerestiefen und die Morphologie der Landmassen. Das Innere der Erde wird im zweiten Unterkapitel (1.2) behandelt. Wichtige Methoden der Geophysik werden dabei kurz vorgestellt und ihr Beitrag zur Erforschung des Erdinnern vermittelt. Zur Sprache kommen Erdbeben, die Erdwärme, das Magnetfeld und das Schwerefeld der Erde. Alle diese Komponenten geben Auskunft über den Schalenbau der Erde, den inneren Motor vieler Prozesse, die Rekonstruktion von Plattenbewegungen und die Hebung von Gebirgen und Absenkung von Meeresbecken. Das dritte Unterkapitel (1.3) wirft einen ersten Blick auf die Plattentektonik, das Auseinanderdriften und Zusammenprallen von

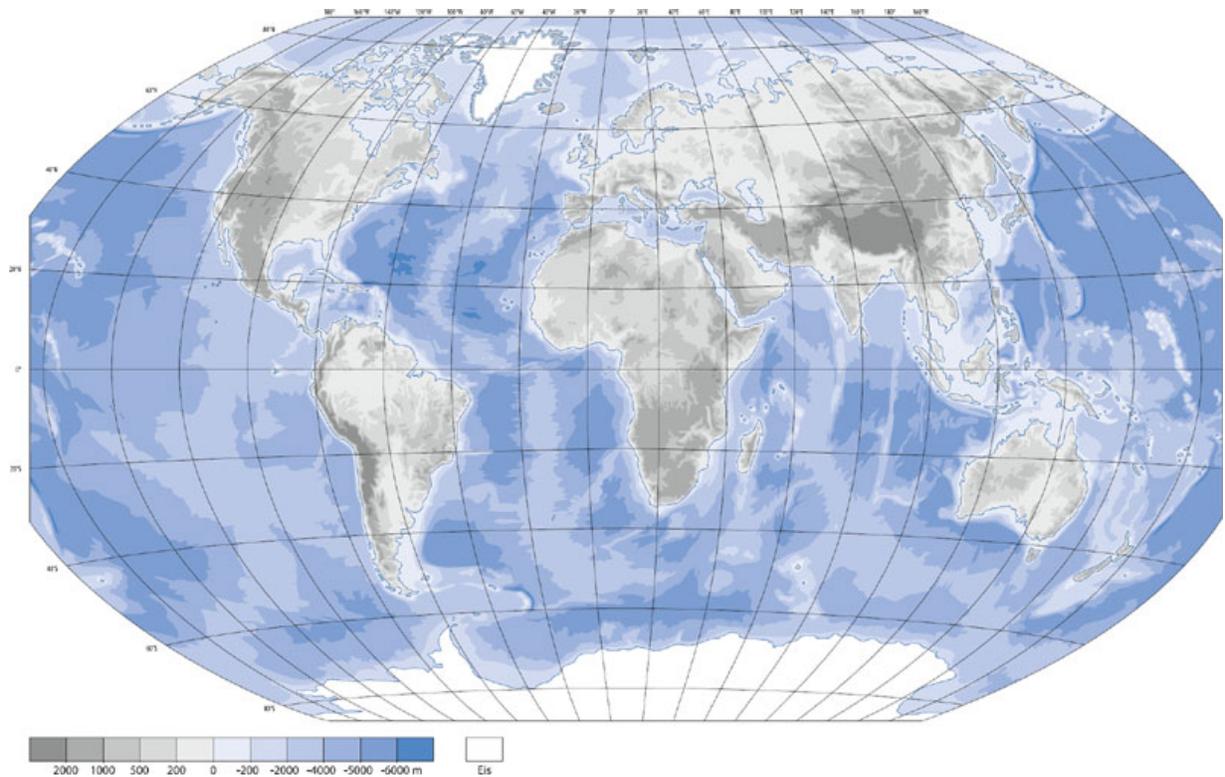
Kontinenten sowie die Entstehung und das Verschwinden von Ozeanen.

1.1 | Außenansicht unseres Planeten

Die Ansicht unseres Planeten von außen ist primär durch die Verteilung von Land und Wasser geprägt. Rund 70 % Wasseroberfläche stehen lediglich 30 % Landfläche gegenüber. Bei den Landmassen stehen die größeren zusammenhängenden Kontinente im Kontrast zu den vielen Inseln und Inselgruppen. Die Größen und Anordnungen dieser Landmassen sind ein Abbild der Prozesse im Erdinnern, die unseren Planeten vor vielen Millionen Jahren prägten und heute noch aktiv sind. → [Abb. 1-1](#) zeigt die Verteilung von Land und Wasser, verdeutlicht aber auch die globale Morphologie, das heißt die Höhenverteilung auf den Landmassen und die Wassertiefe in den Meeresbecken.

Abb. 1-1 | (S. 10–11)

Weltkarte mit Wassertiefen und Landhöhen. In den Ozeanen trennen lange Rücken mit relativ geringer Wassertiefe die eigentlichen Tiefseebereiche.



Seamounts: submarine Vulkane

Der **Meeresboden** der Weltmeere erscheint stark gegliedert. Sehr lange und flache Rücken erstrecken sich inmitten der Ozeane, wie beispielsweise der **Mittelatlantische Rücken**. Auf diesen Rücken beträgt die Wassertiefe lediglich etwa 2000 bis 3000 m, während die angrenzenden Tiefseebecken Wassertiefen von 5000 m und mehr aufweisen. Die Mittelozeanischen Rücken sind von zahlreichen **Furchen** durchsetzt. Aus den Tiefseebecken erheben sich einzelne kegelförmige Berge (sogenannte **seamounts**) und ragen zum Teil sogar aus dem Wasser hinaus. Bei diesen kegelförmigen Bergen handelt es sich um aktive oder erloschene Vulkane. In → [Abb. 1-1](#) sind nur eine kleine Auswahl von solchen Vulkanen zu erkennen. **Tiefseeegräben** mit Wassertiefen von über 7000 m verlaufen längs gewisser Kontinentalränder und längs Inselgruppen. Beispiele sind an der Westküste von Südamerika oder westlich der Inselgruppen von Indonesien zu finden. Bei anderen Kontinentalrändern, wie etwa der Ostküste von Nord- und Südamerika, weisen die Küstenmeere

geringe Wassertiefen von weniger als 200 m auf. Derartige Kontinentalränder werden unter dem Begriff **«Schelf»** zusammengefasst. Die Meerestiefe dieser Schelfmeere nimmt an einer Kante, welche mehrere hundert Kilometer von der Küste entfernt sein kann, abrupt zu.

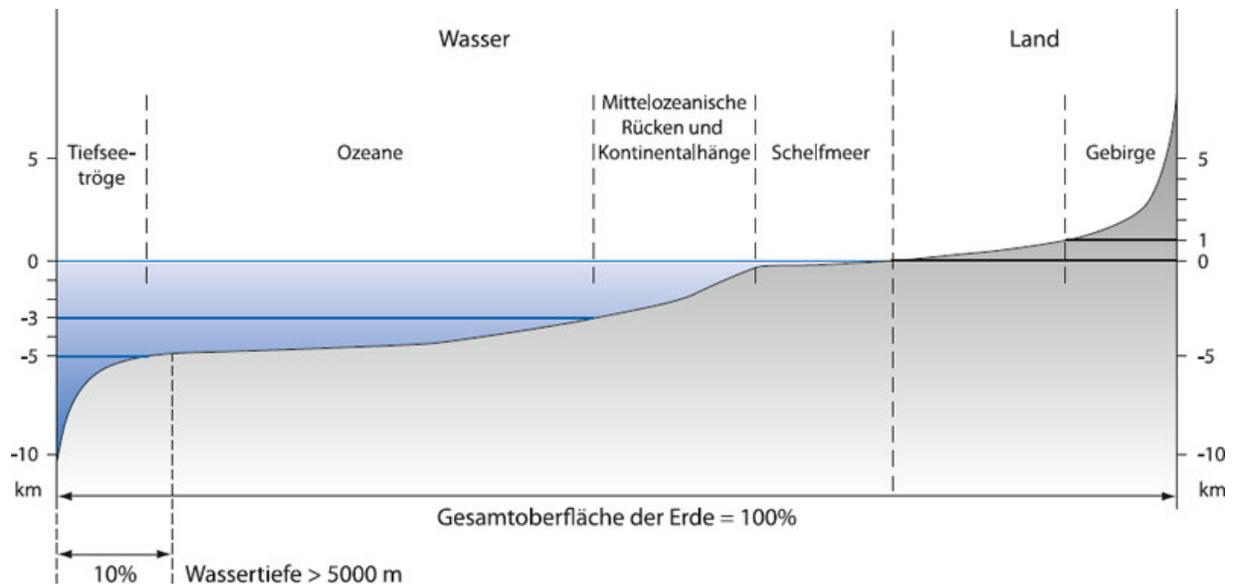
Kratone: uralte Kerne der Kontinente

Auch im Falle der **Kontinente** ist die Höhenverteilung recht heterogen. Wie in → [Abb. 1-1](#) ersichtlich, verlaufen **Gebirge** als gewundene lange Stränge längs der Kontinentalränder oder durchqueren die Kontinente. Beispiele sind die nordamerikanische Kordillere und die Anden in Südamerika, beziehungsweise der Himalaya in Asien. Neben diesen Gebirgssträngen sind auf den Kontinenten relativ tief liegende Ebenen mit geringen Höhenunterschieden zu erkennen. Im Kern der Kontinente sind zerfurchte schildförmige großräumige Erhebungen auszumachen. Diese werden als **Schilde** bezeichnet und bestehen typischerweise aus über 2 Milliarden alten Gesteinen. Diese Schilde, bzw. **Kratone** stellen die ältesten Kerne der Kontinente dar. Die sie umrahmenden Gebirgsstränge sind viel jünger. Das kaledonische Gebirge in Skandinavien beispielsweise ist vor rund 450 Millionen Jahre entstanden, die Anden hingegen vor weniger als 20 Millionen Jahren. Eine spezielle Struktur erkennt man etwa längs des Roten Meeres und des Golfs von Aden. Die unmittelbar angrenzenden Gebiete in Afrika und Arabien liegen relativ hoch, aber das Hochland macht beidseits allmählich einer Tiefebene Platz.

Die Verteilung von Land und Wasser bzw. von Kontinenten und Ozeanen ist auf einer Karte wesentlich von der Projektionsmethode abhängig. Eine Projektion der Küstenlinie, wie sie auf der «Erdkugel» vorhanden ist, auf eine Ebene, verursacht gezwungenermaßen Verzerrungen. Auf vielen Karten erscheinen deshalb die Landmassen im hohen Norden und Süden übertrieben groß. Um die Verteilung von Land und Wasser sowie Meerestiefen und Landhöhen statistisch genauer darzustellen, bedient man sich des hypsographischen Diagrammes. In dieser Darstellung wird die kumulative prozentuale

Häufigkeit von Flächen über einer bestimmten Höhe aufgetragen (→ [Abb. 1-2](#)). Im **hypsographischen Diagramm** wird auf der horizontalen Achse der prozentuale Anteil, und in der vertikalen Achse die Höhe unter beziehungsweise über Meer aufgetragen. In → [Abb. 1-2](#) sieht man sofort, dass rund 30 % Landfläche etwa 70 % Wasserfläche gegenüberstehen. Charakteristisch ist weiter, dass nur knapp 10 % der Erdoberfläche höher als 1000 m über Meer liegen. Die Gebirge machen also einen kleinen Teil der Landfläche aus. Weiter erkennt man, dass etwa 40 % der Erdoberfläche von Ozeanbecken bedeckt sind, die Wassertiefen von über 4000 m aufweisen. Umgekehrt formuliert, besitzen 60 % der Erdoberfläche oder 30 % der Meeresfläche Wassertiefen von weniger als 4000 m. 10 % der Erdoberfläche werden von Ozeanbecken mit Wassertiefen von mehr als 5000–6000 m gebildet. Es sind dies die bereits erwähnten lang gestreckten Tiefseegräben (auch «Tiefseetröge» genannt). Zählt man die Schelfbereiche, wo die Wassertiefe weniger als 200 m beträgt, ebenfalls zu den Kontinenten, so erhöht sich das Verhältnis zwischen Kontinent und Ozean auf 40 % zu 60 %. Ein Blick auf die Karte in → [Abb. 1-1](#) zeigt dabei, dass die Schelfkanten beidseits des Atlantiks einen auffallend ähnlichen Verlauf haben und gut zusammenpassen.

Abb. 1-2 | Hypsographische Kurve der Wassertiefe und Landhöhe.

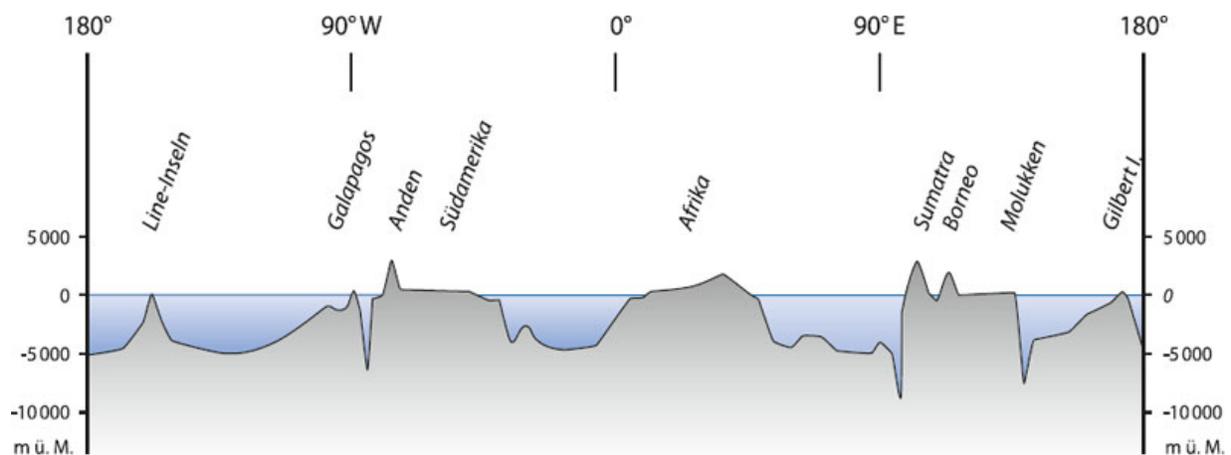


Das ungleiche Paar: Gebirge und Tiefseegräben

Die Variation der Meerestiefe und der Landhöhe auf den Kontinenten sei an einem Profilschnitt näher diskutiert (→ Abb. 1-3). Der **Profilschnitt** ist etwas willkürlich längs des Äquators gewählt. Um die Unterschiede in Wassertiefe und Landhöhe im 40 000 km langen Profilschnitt sichtbar zu machen, ist der Profilschnitt stark überhöht gezeichnet. Vergleicht man die Kontinente von Südamerika und Afrika, so fällt sofort auf, dass im Falle von Afrika der Kontinent im Osten und im Westen von einem seichten Schelfmeer flankiert ist. Demgegenüber beobachtet man in Südamerika eine ausgesprochene Asymmetrie mit einem seichten Schelfmeer im Osten und einem Tiefseetrog mit Wassertiefen von über 6000 Metern im Westen. Des Weiteren zeichnet sich Südamerika durch das Vorhandensein eines Gebirges an der Westküste aus. Dieses Gebirge, die Anden, verläuft unmittelbar neben dem Tiefseetrog parallel zur Küste. In einem Profilschnitt südlich oder nördlich des Äquators wäre der Gebirgsstrang breiter und bis über 5000 Meter hoch. In Afrika besteht im Osten eine Hochzone. Hier ragen einzelne Berge (Vulkane) bis über 5000 m ü. M. auf. Mittelozeanische Rücken mit geringen Wassertiefen existieren beidseits von Südamerika und Afrika im Pazifik, im Atlantik und im

Indischen Ozean. Ein Tiefseetrog ist im Westen von Sumatra zu verzeichnen. In Sumatra selbst existiert ein sehr schmales Gebirge an der Westküste, unmittelbar neben dem Tiefseetrog. Dieses Gebirge besteht im Wesentlichen aus Vulkanen. Westlich der Inselgruppen von Indonesien, Borneo und den Molukken existiert wiederum ein Tiefseetrog. Im Pazifik ragen einzelne Rücken als Inselgruppen aus dem Meer (die Gilbert-, Line- und Galapagos-Inseln). Alle diese Inseln sind vulkanischer Natur.

Abb. 1-3 | Profilschnitt längs des Äquators.



Die Verteilung von Land und Wasser veränderte sich im Laufe geologischer Zeiten. Diese Entwicklung, sowie der heutige Zustand, ist eng mit den im Erdinnern ablaufenden Prozessen verknüpft. Die Tiefseetröge beispielsweise markieren jene Stellen, wo ozeanische Platten nach unten ins Erdinnere absinken. In → [Kap. 1-3](#) werden diese Aspekte eingehender diskutiert.

1.2 | Das Innere der Erde

Die Erkundung des Erdinnern ist mittels verschiedener geophysikalischer Methoden möglich. Hierzu zählen die Auswertung von Erdbebenwellen, die das Erdinnere durchqueren,

die Messung des Wärmeflusses, der aus der Tiefe an die Erdoberfläche steigt, die Beobachtung des Erdmagnetfeldes und der Magnetisierung von Gesteinen sowie die Analyse der Anziehungskraft der Erde.

1.2.1 | Seismologie: Erdbeben und der Schalenbau der Erde

Die Seismologie befasst sich mit dem Studium von Erdbeben und der Erforschung des Erdinnerns anhand künstlich ausgelöster Erschütterungen.

[Erdbebenherd: Epizentrum und Hypozentrum](#)

Erdbeben

Erdbeben sind natürliche Erschütterungen der festen Erde, die sich als elastische Wellen im Untergrund fortpflanzen. Bei Verschiebungen von Platten werden die Gesteine zusammengestaucht, verbogen oder auseinandergezerrt. Die Erdkruste reagiert auf die angelegten Verspannungen zuerst durch elastische Deformation. Beim Überschreiten der Gesteinsfestigkeit kommt es aber zum Bruch. Dabei werden die elastischen Deformationen ruckartig rückgängig gemacht, die Spannungen fallen sofort ab. Die ruckartige Entlastung nach dem Bruch ist der eigentliche Auslöser der Erdbebenwellen.

Erdbeben werden an einem sogenannten Erdbebenherd ausgelöst. Das **Hypozentrum** ist der eigentliche Herd, das heißt der Ort, wo das Zerbrechen der Gesteine stattfindet. Dies kann beispielsweise auf einem tektonischen Bruch sein, welcher durch die Spannungen in der Erdkruste gelegentlich aktiviert wird. Das **Epizentrum** eines Erdbebens liegt **vertikal** über dem Hypozentrum an der Erdoberfläche. Nach der Tiefenlage des Hypozentrums unterscheidet man zwischen **Flachbeben** (Herdtiefe 0 bis 100 km) und Tiefbeben (Herdtiefe 100 bis 700 km). Die Mehrheit der Erdbeben sind Flachbeben.

Box 1.1

Intensität und Magnitude von Erdbeben

Die «Größe» eines Erdbebens wird durch die Intensität oder die Magnitude angegeben. Die **Intensität** umschreibt den Grad der Zerstörung und der subjektiven Wahrnehmungen durch den Menschen. Hierzu wird die **Mercalli-Skala** verwendet, in welcher in den Abstufungen zwischen I und XII die wesentlichen Merkmale festgehalten sind (→ **Abb. 1-4**). Die Messung der **Magnitude** erfolgt durch die **Richter-Skala**, diese misst die durch das Erdbeben freigesetzte Energie. Da die freigesetzte Energie keine Obergrenze kennt, ist die Richter-Skala nach oben offen. In → **Abb. 1-4** sind die Mercalli- und die Richter-Skala zum Vergleich nebeneinander angegeben.

Erdbeben:

Grad der Zerstörung und freigesetzte Energie

Die freigesetzte Energie eines Erdbebens wird aus der Amplitude der Erdbebenwellen (dem maximalen Ausschlag) in einem bestimmten Abstand vom Erdbebenherd berechnet. Dieser Zusammenhang kann aus folgender Analoqsituation abgeleitet werden: Wirft man einen Stein in einen See mit glatter Oberfläche, so breiten sich Wasserwellen als konzentrische Ringe vom Einschlagspunkt des Steins weg fort. Je größer die Entfernung, desto kleiner werden die Wellen (die Energie des Steins muss sich auf eine immer größere Fläche verteilen). Wirft man einen größeren Stein, so sind die Wellen höher, nehmen aber nach außen auch ab. Kennt man nun die Entfernung zum Einschlag des Steins so kann man aus der am Beobachtungsort gemessenen Wellenhöhe bestimmen, wie hoch die Wellen unmittelbar neben dem Einschlag waren. Für Erdbeben wird die Magnitude M nach folgender Formel berechnet:

$$M = \log (A / T) + 1.66 \log \Delta + 3.3$$

Hierin entspricht A der maximalen gemessenen Amplitude in Mikrometern (μm), T der Periode (dem Inversen der Frequenz der Erdbebenwellen) in Sekunden, und Δ ist der Abstand vom Erdbebenherd, gemessen in Grad (1° entspricht etwa 111 km). Die Periode T beträgt zumeist 18–22 Sekunden. In der Nähe des Epizentrums können Erdbeben gehört werden, und zwar die höheren Frequenzen bzw. die Wellen mit Perioden, die kürzer als 20 Sekunden sind. Nahe dem Epizentrum ist aber die Distanz kleiner als 1° und somit der

logarithmische Term negativ. Auch die maximalen Ausschläge können nur Bruchteile eines Mikrometers betragen, womit auch der erste Term negativ wird. Insgesamt kommen also auch Magnituden kleiner als 3.3 vor.

Eine Magnitude von $M = 3$ auf der Richter-Skala entspricht ungefähr einem Wert von III auf der Mercalli-Skala. Für die eigentliche Berechnung der Magnitude stützt man sich je nach Situation auf unterschiedliche Wellentypen (Körperwellen oder Oberflächenwellen, wie sie weiter unten besprochen werden). Die Magnituden müssen daher noch mit zusätzlichen Indizes versehen werden.

Abb. 1-4 | Die Definition der Mercalli-Skala (vereinfacht) und zum Vergleich die Richter-Skala.

Intensität		Wirkungen auf			Magnitude M
Grad	Stärke	Personen	Gebäude	Natur	
I	unmerklich	nicht verspürt			2
II	sehr leicht	vereinzelt verspürt			
III	leicht	vor allem von ruhenden Personen deutlich verspürt			3
IV	mäßig stark	in Häusern allgemein verspürt, aufweckend	Fenster klirren		
V	ziemlich stark	im Freien allgemein verspürt	Verputz an Häusern bröckelt ab, hängende Gegenstände pendeln, Verschieben von Bildern		4
VI	stark	erschreckend	Kamine und Verputz beschädigt	vereinzelt Risse im feuchten Boden	
VII	sehr stark	viele flüchten ins Freie	mäßige Schäden, vor allem an schlechten Gebäuden, Kamine fallen herunter	vereinzelt Erdbeben an steilen Abhängen	5
VIII	zerstörend	allgemeiner Schrecken	viele alte Häuser erleiden Schäden, Rohrleitungsbrüche	Veränderungen in Quellen, Erdbeben an Straßendämmen	
IX	verwüstend	Panik	starke Schäden an schwachen Gebäuden, Schäden auch an gut gebauten Häusern, Zerschlagen von unterirdischen Rohrleitungen	Bodenrisse, Bergstürze, viele Erdbeben	6
X	vernichtend	allgemeine Panik	Backsteinbauten werden zerstört	Verbiegen von Eisenbahnschienen, Abgleiten von Lockerböden an Hängen, Aufstau neuer Seen	
XI	Katastrophe		nur wenige Gebäude halten stand, Rohrleitungen brechen	umfangreiche Veränderungen des Erdbodens, Flutwellen	7
XII	große Katastrophe		Hoch- und Tiefbauten werden total zerstört	tiefgreifende Umgestaltung der Erdoberfläche, Flutwellen	
					8
					9

Seismische Intensität: modifizierte Mercalli-Skala (MKS 1964) bei Herdtiefen von 20 km; mit Vergleichswerten von Magnituden (M)

Erdbebengefährdung: bessere Statistik durch historische Aufzeichnungen

Die größten Erdbeben erreichen Magnituden von über 8. Im Jahre 1985 erschütterte ein gewaltiges Erdbeben mit der Magnitude $M = 8$ die Stadt Mexico und richtete große Schäden an. Zu den Schäden von Erdbeben gehören nebst eingestürzten Gebäuden, Rutschungen

und Felsabbrüche auch Feuersbrünste. Namentlich in städtischen Gebieten können sich zerborstene Gasleitungen entzünden, und wenn dann die Wasserleitungen auch unterbrochen und die Straßen von Trümmern übersät sind, ist die Feuerwehr machtlos. Für Rettungsmaßnahmen stellen auch unterbrochene Stromleitungen ein Problem dar. Um die Gefährdung eines Gebietes durch Erdbeben bestimmen zu können, braucht man einen längeren Beobachtungszeitraum. Dieser ergibt sich aus historischen Aufzeichnungen. Wie kann aber die Magnitude eines Erdbebens, das vor mehr als hundert Jahren stattfand, abgeschätzt werden? Aufzeichnungen, beispielsweise aus Klöstern, halten vielfach Beobachtungen über Schäden und den Zeitpunkt des Erdbebens fest. Aus der Kombination von Beobachtungen zum selben Erdbeben an verschiedenen Orten, kann dann das Epizentrum und die Magnitude einigermaßen abgeschätzt werden. In der Schweiz etwa hatten die größten Beben Intensitäten von VIII–IX (entsprechend Magnituden von $M = 6-7$). Bekannt sind die Erdbeben im Raume Chur (1295), Basel (1356), Stans (1601), Brig (1855, 25. und 26. Juli) sowie Rawil (1946).

Tsunamis und deren Vorhersage

Speziell gefährlich sind **Tsunamis**. Dabei handelt es sich um lange Wasserwellen, welche von Erdbeben ausgelöst werden und die Ozeane mit großer Geschwindigkeit durchqueren. Die Geschwindigkeit hängt von der Wassertiefe ab, Sie beträgt gut 100 km/h bei 100 m Wassertiefe und 800 km/h bei 5000 m Wassertiefe. Auf dem offenen Meer sind die Wellen nur wenige Dezimeter hoch, können aber trotzdem durch Satellitenüberwachung erkannt werden. Die Auslösung der Tsunamiwelle erfolgt durch die ruckartige Verstellung des Meeresbodens während eines Erdbebens. Beim Auflaufen der Tsunamiwelle im Küstenbereich weicht zuerst das Wasser zurück. Anschließend folgt eine gewaltige Woge, die den Küstenbereich überflutet und Gebäude zerstört. In der trümmerübersäten Flut beim Zurückfließen des Wassers ist eine Rettung sehr schwierig. Durch die ständige Satellitenüberwachung

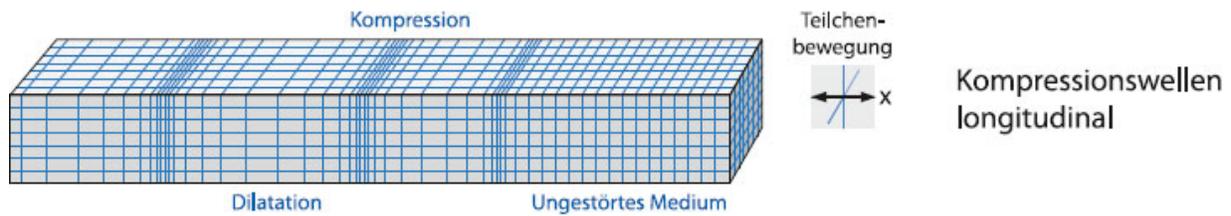
sind heute Frühwarnungen möglich. Trotzdem haben im Jahre 2004 in Sumatra ca. 250 000 Menschen durch einen Tsunami ihr Leben verloren.

Typen seismischer Wellen

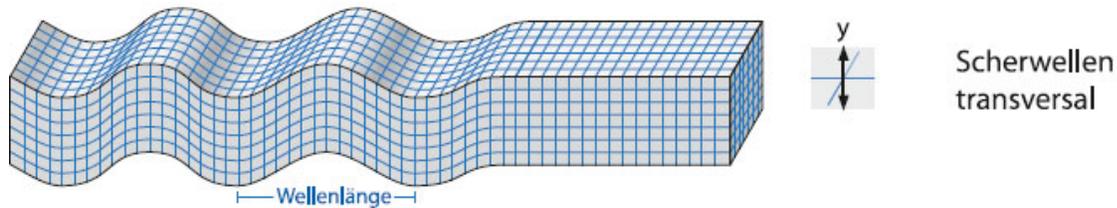
Erdbebenwellen sind elastische Wellen, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch die Gesteine der Erde fortpflanzen. Grundsätzlich ist zwischen **Raumwellen** und **Oberflächenwellen** zu unterscheiden. Raumwellen pflanzen sich durchs Erdinnere fort, während Oberflächenwellen sich hauptsächlich längs der Erdoberfläche fortbewegen. Zu den Raumwellen zählen die P- und S-Wellen (→ [Abb. 1-5](#)).

Abb. 1-5 | Die verschiedenen Typen von Erdbebenwellen.

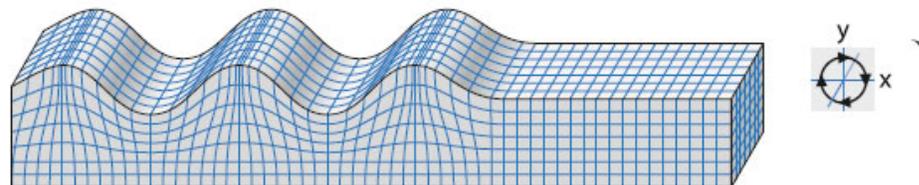
P-Welle: Primärwelle



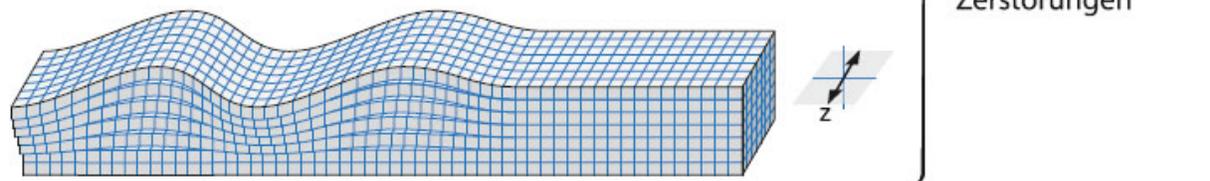
S-Welle: Sekundärwelle



R-Welle: Rayleigh-Welle



Q-Welle: Love-Welle



Fortpflanzungsrichtung der Wellen

P-Wellen (oder **Primärwellen**) sind Kompressionswellen mit longitudinaler Schwingung. Die Teilchenbewegung erfolgt parallel zur Fortpflanzungsrichtung. Auch Schallwellen sind P-Wellen.

S-Wellen (oder **Sekundärwellen**) sind Scherwellen mit transversaler Schwingung. Die Teilchen bewegen sich senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung (hin und her bzw. auf und ab). Scherwellen können sich nur in Festkörpern fortpflanzen, nicht in Fluiden.

Die langsamen Wellen sind zerstörerisch

Oberflächenwellen werden als **L-Wellen** bezeichnet. Sie umfassen **Love-Wellen (O-Wellen)** und **Rayleigh-Wellen (R-Wellen)**. Die Amplitude der Teilchenbewegung nimmt mit der Tiefe ab, ähnlich den Wasserwellen in stehenden Gewässern. Die Teilchenbewegungen sind daher komplex. Im Falle der R-Wellen bewegen sich die Teilchen auf einem Kreis ähnlich der Flaschenpost in den Wasserwellen des Meers. Oberflächenwellen sind energiereich und die Hauptverantwortlichen für Erdbebenschäden

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit seismischer Wellen ist von der Größenordnung km/s sowie von der Gesteinsdichte und den Elastizitätsmoduli abhängig. Die schnellsten Wellen sind die P-Wellen Ihre Geschwindigkeit v_p berechnet sich zu

$$v_p = \sqrt{[K + (4/3)G] / \rho}$$

Hierin ist ρ die Gesteinsdichte, K das Kompressionsmodul und G das Schubmodul. Für S-Wellen berechnet sich die Geschwindigkeit zu

$$v_s = \sqrt{G/\rho}$$

Aus diesen Formeln erkennt man sofort, dass die S-Wellen langsamer sind als die P-Wellen. Im Mittel ist $K \approx 1.67 G$ und somit $v_p \approx 1.7 v_s$. Für Fluide ist das Schubmodul $G = 0$ und somit auch $v_s = 0$.

Die Oberflächenwellen sind noch langsamer als die S-Wellen und kommen bei einem Erdbeben als letzte an.

Seismograph

Seismische Wellen werden durch Seismographen registriert. Dies sind Instrumente mit einer trägen Masse, an welcher eine Schreibfeder festgemacht ist. Die Feder schreibt auf ein sich langsam bewegendes Papier, welches fest mit dem schüttelnden Untergrund verbunden ist. Das Prinzip ist in [→ Abb. 1-6](#) erläutert. Insgesamt werden drei Komponenten registriert, eine vertikale und zwei horizontale, N-S und E-W gerichtete.

In [→ Abb. 1-7](#) sind die Aufzeichnungen eines Erdbebens von zwei Seismographen dargestellt. In den Seismogrammen erkennt man die ersten Ausschläge über der Bodenunruhe, welche den P-Wellen

zugeordnet sind. Etwas später treffen die S-Wellen ein. Noch später und mit viel größerem Ausschlag folgen die Oberflächenwellen. Je weiter vom Hypo- / Epizentrum entfernt der Seismograph ist, desto größer wird das Zeitintervall zwischen P- und S-Wellen. Anhand der in → [Abb. 1-8](#) skizzierten Eichkurve kann anhand des Zeitintervalls zwischen P- und S-Wellen direkt die Distanz zwischen Erdbebenherd und Seismograph-Station abgeleitet werden. Aus den Aufzeichnungen von drei Seismograph-Stationen kann somit das Hypo- / Epizentrum eines Erdbebens bestimmt werden. Zu diesem Zwecke schlägt man um jede Seismographen-Station auf einer Karte einen Kreis, dessen Radius dem entsprechenden Herdabstand entspricht. Der Schnittpunkt der drei Kreise ist der geometrische Ort, welcher alle drei Bedingungen erfüllt.

Abb. 1-6 | Wie der Seismograph Erdbebenwellen registriert.

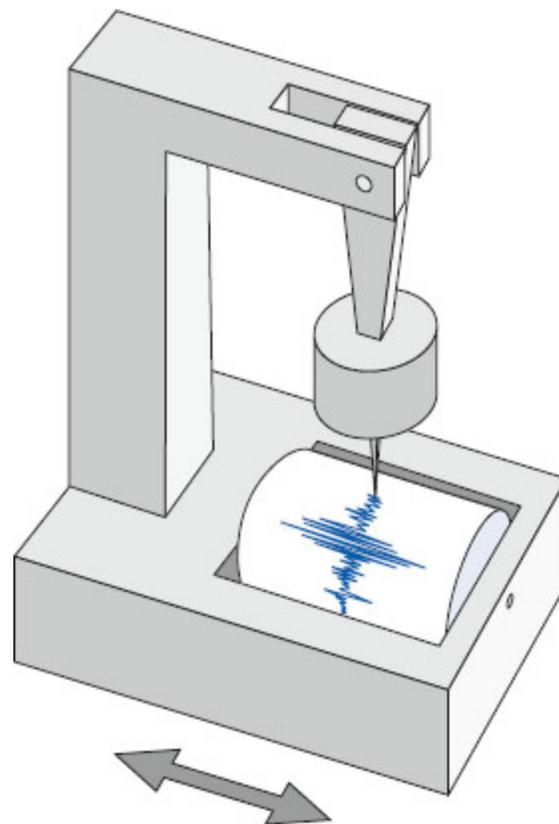


Abb. 1-7 | Zwei Seismogramme eines Erdbebens, aufgezeichnet durch zwei Seismographen.

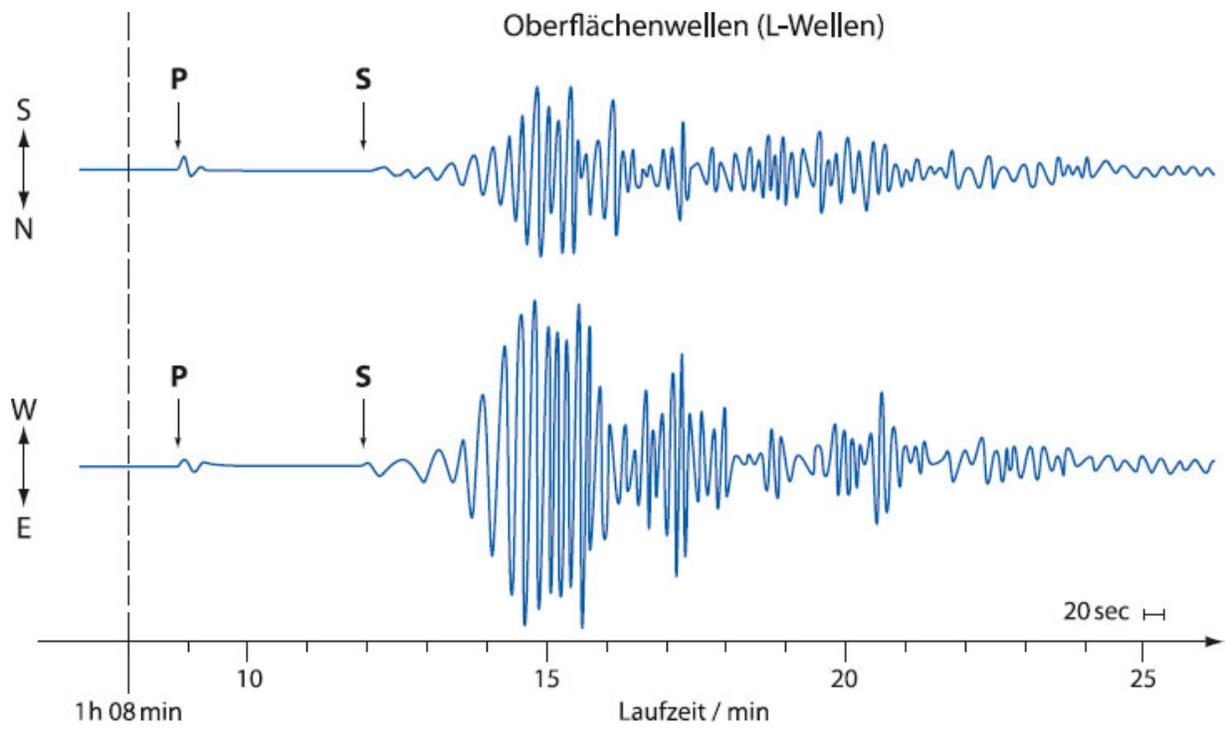
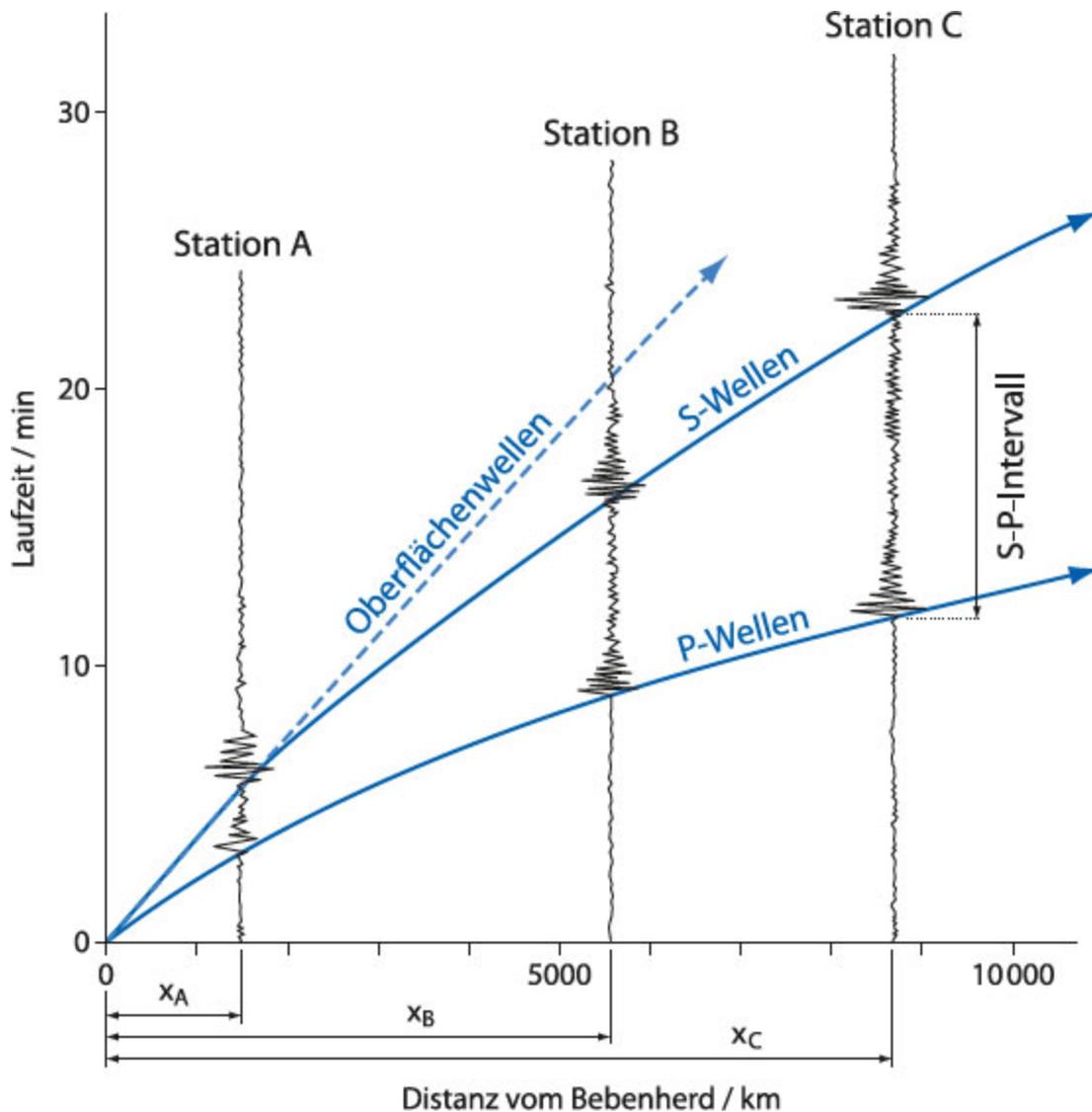


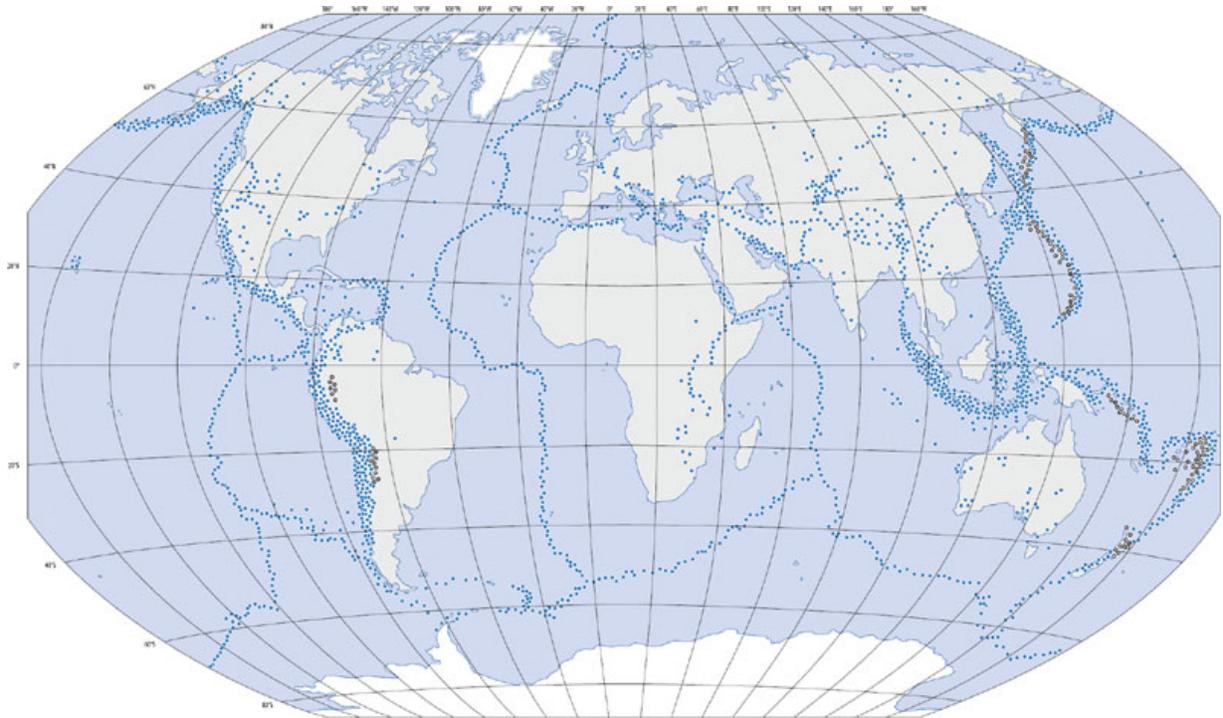
Abb. 1-8 | Eichkurve für den Abstand zum Erdbebenherd.



Wenn man die weltweite Verteilung von Epizentren betrachtet, so fällt sofort auf, dass die allermeisten Epizentren auf lang gestreckten Gürteln liegen (→ Abb. 1-9). Besonders auffallend sind die Gürtel längs der Mittelozeanischen Rücken und der Gürtel, welcher sich rund um den Pazifik zieht (**zirkumpazifischer Gürtel**). Daneben sind auch wolkenartige Erdbebenverteilungen innerhalb der Kontinente vorhanden. Beispiele hierzu sind die Region Türkei-Griechenland oder der Himalaya. Die in → Abb. 1-9 aufgeführten Epizentren stammen von Flachbeben, welche den weitaus größten Teil der Erdbeben ausmachen. In Schwarz sind Tiefbeben mit Herdtiefen von 300–700 km angegeben. Die meisten davon sind im

zirkumpazifischen Gürtel angesiedelt. An diesen Stellen sinken Platten tief in den Erdmantel ein, und die Erdbebenherde liegen direkt an den Grenzen der eintauchenden Platten.

Abb. 1-9 | (S. 22–23) Die weltweite Verteilung der Erdbebenherde in Gürteln.



Erdbeben in Europa

In → **Abb. 1-10** ist die **Verteilung der Erdbebenherde** im Großraum Europa dargestellt. Im Mittelmeerraum sind in der Türkei, in Griechenland, Italien und Spanien sowie im Atlasgebirge von Marokko bis Tunesien gehäufte Vorkommen zu beobachten. Diese etwas wolkenartige Anordnung orientiert sich an den jungen Gebirgen, die offenbar rezente tektonische Aktivität aufweisen. In Kleinasien sind Erdbebenherde an die nordanatolische Störung gebunden, eine Bruchzone, welche sich im Norden des Marmarameers Richtung Istanbul fortsetzt und sich durch besonders hohe Magnituden auszeichnet. Längs dieser Störung bewegt sich Kleinasien relativ zu