minærva

GL 1

SKRIPT

System Erde und endogene Prozesse

Erklärskript

Die Aufgaben 1–46 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Geographie – Leistungsfach Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe GL · Geographie-Leistungsfach

GL1 Endogene Prozesse	GL2 Landschaften	GL3 Atmosphäre	GL4 Wasser, Böden	GL5 Klimawandel	GL6 Bevölkerung, Stadt	GL7 Disparitäten	GL-K Kompakt

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Geographie-Leistungsfach: sieben Themenskripte GL1–GL7 mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans er gehört und ob er zum Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung zählt.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.
Kompakt	GL-K: alle Fachbegriffe, Modelle und wichtigen Abbildungen auf wenigen Seiten, zum schnellen Wiederholen.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht 4
1 Das System Erde: Geosphären und ihre Vernetzung 5
1.1 Die Sphären 5
1.2 Vernetzung: Stoffe, Energie und Rückkopplungen 6
2 Das Anthropozän 8
2.1 Die Idee: der Mensch als geologische Kraft 8
2.2 Wann beginnt das Anthropozän? 8
2.3 Bewertung: Was das Konzept leistet und wo es kritisiert wird 9
3 Schalenbau der Erde und Kontinentverschiebung 10
3.1 Der Schalenbau der Erde 10
3.2 Wegeners Theorie der Kontinentverschiebung 11
4 Die Theorie der Plattentektonik 13
4.1 Die Ozeanböden wachsen: Seafloor-Spreading 13
4.2 Platten und ihre Bewegung 13
4.3 Divergente Plattengrenzen 14
4.4 Konvergente Plattengrenzen 14
4.5 Transformstörungen 16
4.6 Wegener und die Plattentektonik im Vergleich 16
5 Wilson-Zyklus, Hot Spots und Vulkanismus 18
5.1 Der Wilson-Zyklus: Ozeane öffnen und schließen sich 18
5.2 Die Hot-Spot-Theorie 18
5.3 Wo und warum Vulkane entstehen 19
6 Erdbeben und Tsunamis 21
6.1 Wie ein Erdbeben entsteht 21
6.2 Seismische Wellen 21
6.3 Seismische Wellen durchleuchten die Erde 23
6.4 Stärke eines Bebens: Magnitude und Intensität 23
6.5 Wo die Erde bebt 24
6.6 Tsunamis 24
7 Lagerstätten 26
7.1 Lagerstätte, Vorkommen, Reserve 26
7.2 Primäre und sekundäre Erzlagerstätten 26
7.3 Kohle-, Erdöl- und Erdgaslagerstätten 27
7.4 Salzlagerstätten 28
7.5 Anthropogene Lagerstätten 28
8 Naturgefahren, Risiko und Verwundbarkeit 30
8.1 Naturereignis, Naturgefahr, Naturkatastrophe 30
8.2 Risiko = Gefahr × Exposition × Verwundbarkeit 30
8.3 Vulnerabilität und Resilienz 31
8.4 Wie verwundbar ist ein Land? Indikatoren 32
8.5 Das Pressure-and-Release-Modell 32
8.6 Risikomanagement 32
8.7 Warum leben Menschen in Gefahrenräumen? 33
9 Verwundbarkeit im Vergleich: Fallbeispiele 34
9.1 Haiti und Chile 2010: gleiche Gefahr, verschiedene Verwundbarkeit 34
9.2 Japan 2011: Grenzen der Resilienz 34
9.3 Türkei und Syrien 2023: Regeln, die nicht durchgesetzt werden 35
9.4 Vulkane: Nevado del Ruiz 1985 und Pinatubo 1991 35
9.5 Baden-Württemberg: geringe Gefahr, hohe Exposition 35

Worum es geht

Am 12. Januar 2010 und am 27. Februar 2010 bebte zweimal in Amerika die Erde. In Haiti erreichte das Beben die Magnitude 7,0 und tötete weit über hunderttausend Menschen. In Chile setzte das Beben etwa fünfhundertmal so viel Energie frei, doch es starben gut fünfhundert Menschen. Warum trifft dasselbe Naturereignis zwei Gesellschaften so verschieden? Die Antwort hat zwei Teile. Der eine liegt in der Erde selbst: Wo bebt sie, warum, wie oft und wie stark? Der andere liegt in der Gesellschaft: Wie verwundbar sind die Menschen, die dort leben, und wie gut können sie sich schützen?

Dieses Skript beginnt beim großen Ganzen, dem **System Erde** mit seinen Sphären und dem Einfluss des Menschen, der so groß geworden ist, dass manche von einem eigenen Erdzeitalter sprechen, dem Anthropozän. Dann geht es in die Tiefe: Wie ist die Erde aufgebaut, warum wandern Kontinente, was geschieht an den Plattengrenzen, wo entstehen Vulkane und Erdbeben, wie entstehen Lagerstätten von Erzen, Kohle, Erdöl und Salz? Am Ende steht die Frage, die im Abitur 2027 den Schwerpunkt bildet: Was macht Räume verwundbar gegenüber Naturgefahren, und was macht sie widerstandsfähig?

> **System Erde und endogene Prozesse im Lehrplan.** Bildungsplan Geographie, Leistungsfach: 3.5.1; 3.5.2.1 (1), (2), (6), (7). Die Marken unter den Überschriften sagen genau, welcher Abschnitt zu welcher Teilkompetenz gehört.

Lehrplan-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans Geographie (Baden-Württemberg 2016, Leistungsfach, Abschnitt 3.5) der Abschnitt gehört, z. B. `BP 3.5.2.2 (1)` . Die Marke `Abi 2027` zeigt die Schwerpunkte der schriftlichen Abiturprüfung 2027. Sie wechseln von Jahr zu Jahr; alles andere bleibt Stoff des Leistungsfachs und kann mündlich geprüft werden.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit einem Kasten der Fachbegriffe des Bildungsplans und einem Verweis auf passende Übungen in **noctua**. Der Vulkanismus als Landschaft (Vulkanformen, Förderprodukte, Maar und Caldera) folgt in GL2; hier geht es darum, wo und warum Vulkane entstehen.

1 Das System Erde: Geosphären und ihre Vernetzung

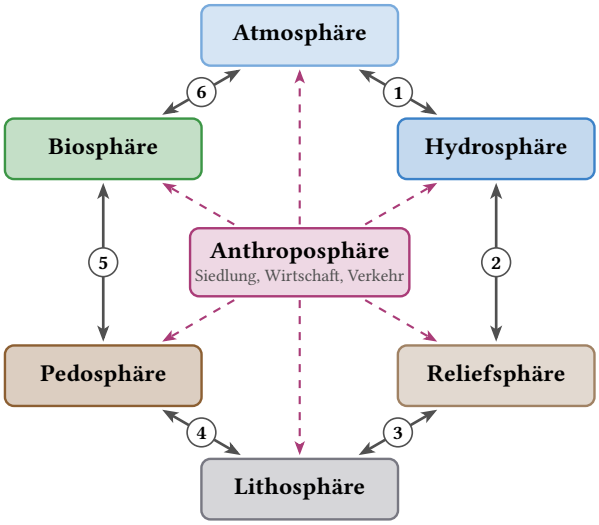
BP 3.5.1 (1)

Ein Gewitter über dem Schwarzwald: Der Regen prasselt auf den Wald, ein Teil verdunstet gleich wieder von den Blättern, ein Teil sickert in den Boden, ein Teil fließt über die Hänge in die Bäche ab und nimmt dabei Bodenteilchen mit. Was hier geschieht, betrifft die Luft, das Wasser, die Pflanzen, den Boden, die Hänge und den Untergrund zugleich. Die Geographie zerlegt diese Wirklichkeit gedanklich in Teilbereiche, die **Geosphären**, und fragt dann, wie sie zusammenhängen.

1.1 Die Sphären

Eine Sphäre („Hülle“) ist ein Teilsystem des Systems Erde, das durch einen bestimmten Stoff oder eine bestimmte Art von Vorgängen gekennzeichnet ist. Die Sphären liegen nicht sauber übereinander wie die Schalen einer Zwiebel, sondern durchdringen sich: Wasser steckt in der Luft, im Boden und in Lebewesen, Gestein steckt im Boden, Luft im Porenraum des Bodens.

- Die **Lithosphäre** ist die Gesteinshülle der Erde, die starre äußere Schale aus Erdkruste und oberstem Erdmantel (etwa 70 bis 150 km dick). Sie liefert das Ausgangsmaterial für Böden und Relief und ist in Platten zerbrochen, deren Bewegung Gebirge, Vulkane und Erdbeben erzeugt (Kapitel 3 bis 6).
- Die **Reliefsphäre** ist die Erdoberfläche mit ihren Formen: Berge und Täler, Ebenen, Hänge, Küsten. Sie ist die Grenzfläche, an der **endogene** Kräfte aus dem Erdinneren (Hebung, Faltung, Vulkanismus) und **exogene** Kräfte von außen (Verwitterung, Abtragung durch Wasser, Eis und Wind) gegeneinander arbeiten. Das Relief steuert, wohin Wasser abfließt, wie warm ein Hang ist und wo Menschen siedeln.
- Die **Pedosphäre** ist die Bodenhülle, die dünne, belebte Verwitterungsschicht an der Oberfläche der Lithosphäre. In ihr durchdringen sich Gestein, Wasser, Luft und Lebewesen; sie ist Standort der Pflanzen, Filter für das Grundwasser und Speicher für Kohlenstoff.
- Die **Hydrosphäre** umfasst alles Wasser der Erde: Ozeane, Seen, Flüsse, Grundwasser, Eis und Wasserdampf. Etwa 97 % des Wassers ist Salzwasser der Meere; vom Süßwasser ist der größte Teil in Gletschern und Eisschilden gebunden.
- Die **Biosphäre** ist der von Lebewesen besiedelte Raum mit allen Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen. Sie reicht von der Tiefsee bis in einige Kilometer Höhe. Pflanzen wandeln durch Photosynthese Sonnenenergie in chemische Energie um und treiben damit fast alle Stoffkreisläufe an.
- Die **Atmosphäre** ist die Gashülle der Erde, vor allem Stickstoff (78 %), Sauerstoff (21 %) und Argon (0,9 %), dazu Spurengase wie Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Das Wetter spielt sich in der untersten Schicht ab, der Troposphäre (8 bis 17 km dick).
- Die **Anthroposphäre** ist der vom Menschen geschaffene und genutzte Teil des Systems: Siedlungen, Verkehrswege, Landwirtschaft, Industrie, aber auch Wirtschaft, Politik und Kultur. Sie greift in alle anderen Sphären ein und ist zugleich von ihnen abhängig.



1 Verdunstung, Niederschlag; das Meer speichert Wärme und gibt sie an die Luft ab.
2 Flüsse, Gletscher und Brandung tragen ab und lagern ab; das Relief lenkt den Abfluss.
3 Tektonik und Gestein bauen das Relief auf (Gebirge, Vulkane); Verwitterung zerlegt das Gestein.
4 Das Ausgangsgestein liefert die Minerale, aus denen der Boden entsteht.
5 Der Boden liefert Wasser und Nährstoffe; Pflanzen und Bodenlebewesen bilden Humus.
6 Photosynthese und Atmung tauschen CO_2 und O_2 Pflanzen verdunsten Wasser.

Abbildung 1: Die Geosphären des Systems Erde. Die natürlichen Sphären tauschen Stoffe und Energie mit ihren Nachbarn aus (Ziffern), die Anthroposphäre greift in alle ein (gestrichelt).

1.2 Vernetzung: Stoffe, Energie und Rückkopplungen

Die Sphären sind durch Flüsse von **Energie** (vor allem Sonnenstrahlung und Erdwärme) und **Stoffen** (Wasser, Kohlenstoff, Gestein, Nährstoffe) miteinander verbunden. Diese **Vernetzung** zeigt sich in großen Kreisläufen:

- Im **Wasserkreislauf** verdunstet Wasser aus dem Meer (Hydrosphäre → Atmosphäre), fällt als Niederschlag, versickert im Boden (Pedosphäre), wird von Pflanzen aufgenommen (Biosphäre) oder fließt ab und formt dabei Täler (Reliefsphäre).
- Im **Kohlenstoffkreislauf** nehmen Pflanzen CO_2 aus der Luft auf, im Boden wird ein Teil als Humus gespeichert, ein Teil gelangt über Flüsse ins Meer, wird dort in Kalkschalen eingebaut und als Kalkstein Teil der Lithosphäre. Vulkane geben den Kohlenstoff nach Millionen Jahren wieder an die Atmosphäre ab.
- Im **Gesteinskreislauf** wird Gestein verwittert und abgetragen, als Sediment abgelagert, versenkt, umgewandelt oder aufgeschmolzen und durch Gebirgsbildung wieder an die Oberfläche gebracht.

Wer verstehen will, was eine Veränderung in einer Sphäre auslöst, muss den Wirkungsketten folgen. Ein Werkzeug dafür ist das **Wirkungsgefüge**: Kästen für die Elemente, Pfeile für die Wirkungen. Abbildung 2 zeigt das für die Rodung eines Bergwalds, wie sie etwa im Himalaya Nepals in vielen Tälern stattgefunden hat.

Zwei Arten von Rückkopplung sind wichtig. Bei einer **positiven** (selbstverstärkenden) Rückkopplung verstärkt die Wirkung ihre eigene Ursache, wie in Abbildung 2 oder bei der Eis-Albedo-Rückkopplung: Schmilzt Eis, wird die Oberfläche dunkler, nimmt mehr Sonnenstrahlung auf, erwärmt sich und lässt weiteres Eis schmelzen. Bei einer **negativen** (dämpfenden) Rückkopplung schwächt die Wirkung ihre Ursache ab, das System pendelt sich ein. Mehr CO_2 in der Luft lässt zum Beispiel manche Pflanzen schneller wachsen, die wiederum mehr CO_2 binden. Positive Rückkopplungen können ein System über einen **Kipppunkt** in einen neuen Zustand treiben (ausführlich in GL5).

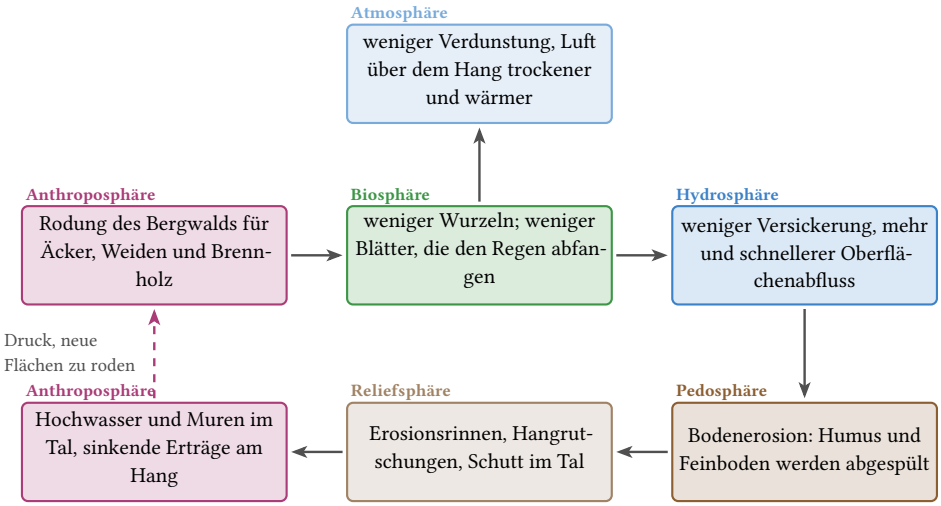


Abbildung 2: Wirkungsgefüge zur Rodung eines Bergwalds. Der gestrichelte Pfeil schließt den Kreis: Sinkende Erträge erhöhen den Druck, weitere Flächen zu roden (positive Rückkopplung).

Merksatz

Die Erde ist ein **System**: Die Geosphären (Litho-, Relief-, Pedo-, Hydro-, Bio-, Atmo- und Anthroposphäre) sind durch Energie- und Stoffflüsse vernetzt. Eine Veränderung in einer Sphäre wirkt über Wirkungsketten und Rückkopplungen auf die anderen zurück. Deshalb lassen sich Naturräume und Naturgefahren nur verstehen, wenn man die Sphären zusammen betrachtet.

Beispiel 1

Vernetzung im Schwarzwald. Im Nordschwarzwald liegt über dem Granit Buntsandstein (Lithosphäre). Er verwittert zu sandigem, nährstoffarmem, saurem Boden (Pedosphäre). Hohe Niederschläge von oft über 1500 mm pro Jahr an den Westhängen (Atmosphäre, Reliefsphäre) waschen Nährstoffe zusätzlich aus (Hydrosphäre). Auf solchen Böden gedeihen vor allem Nadelbäume, Ackerbau lohnt kaum (Biosphäre). Der Mensch hat daraus über Jahrhunderte Waldwirtschaft, Flößerei und Holzindustrie gemacht (Anthroposphäre). Wer nur eine Sphäre betrachtet, versteht keine davon.

Fachbegriffe

Anthroposphäre: vom Menschen geschaffener und genutzter Teil des Systems Erde (Siedlung, Wirtschaft, Verkehr, Gesellschaft).
Atmosphäre: Gashülle der Erde, Ort von Wetter und Klima.
Biosphäre: Gesamtheit der Lebewesen und ihres Lebensraums.
Hydrosphäre: alles Wasser der Erde in flüssiger, fester und gasförmiger Form.
Lithosphäre: starre Gesteinshülle aus Erdkruste und oberstem Erdmantel.
Pedosphäre: Bodenhülle, in der sich Gestein, Wasser, Luft und Lebewesen durchdringen.
Reliefsphäre: Erdoberfläche mit ihren Formen, Grenzfläche endogener und exogener Kräfte.
Vernetzung: Verknüpfung der Sphären durch Energie- und Stoffflüsse, Wirkungsketten und Rückkopplungen.

Üben: **noctua** ↗

2 Das Anthropozän

BP 3.5.1 (2)

Im Februar 2000 unterbrach der Chemiker Paul Crutzen, Nobelpreisträger für die Erforschung des Ozonlochs, auf einer Tagung einen Redner, der vom Holozän sprach, dem Zeitabschnitt seit dem Ende der letzten Kaltzeit vor knapp 12 000 Jahren. Wir lebten gar nicht mehr im Holozän, sagte er, sondern im **Anthropozän**, im „Zeitalter des Menschen“. Noch im selben Jahr veröffentlichte er die Idee zusammen mit dem Biologen Eugene Stoermer.

2.1 Die Idee: der Mensch als geologische Kraft

Das **Anthropozän-Konzept** besagt, dass der Mensch das System Erde inzwischen so stark verändert, dass er zu einem bestimmenden Faktor geworden ist, vergleichbar mit Vulkanismus, Eiszeiten oder Meteoriteneinschlägen. Die Spuren davon seien so dauerhaft, dass Geologen sie noch in Millionen Jahren in den Gesteinsschichten finden würden. Belege dafür gibt es in allen Sphären:

- **Atmosphäre:** Der CO_2-Gehalt der Luft stieg von etwa 280 ppm vor der Industrialisierung auf gut 427 ppm im Jahr 2025 (Mauna Loa, NOAA; wie in GL5), einen Wert, den es seit mindestens 800 000 Jahren nicht gab (Eisbohrkerne).
- **Lithosphäre und Reliefsphäre:** Durch Bergbau, Bauen und Landwirtschaft bewegen Menschen heute mehr Gestein und Boden als alle Flüsse zusammen. Die vom Menschen hergestellte Masse an Beton, Ziegeln, Asphalt, Metall und Kunststoff hat um das Jahr 2020 die Masse aller Lebewesen der Erde übertroffen (etwa 1,1 Billionen Tonnen, Elhacham u. a. 2020).
- **Biosphäre:** Das heutige Artensterben verläuft viel schneller als im Durchschnitt der Erdgeschichte. Nutztiere und Menschen machen den weitaus größten Teil der Masse aller Säugetiere aus.
- **Hydrosphäre:** Staudämme halten große Mengen Sediment zurück, Flussdeltas sinken ab, die Meere versauern durch gelöstes CO_2.
- **Pedosphäre:** Stickstoffdünger hat den natürlichen Stickstoffkreislauf etwa verdoppelt.
- **Neue Stoffe:** Kunststoffe, Beton, Aluminium und künstliche Radionuklide aus den oberirdischen Atomwaffentests der 1950er- und 1960er-Jahre sind weltweit in jungen Ablagerungen nachweisbar, sogenannte **Technofossilien**.

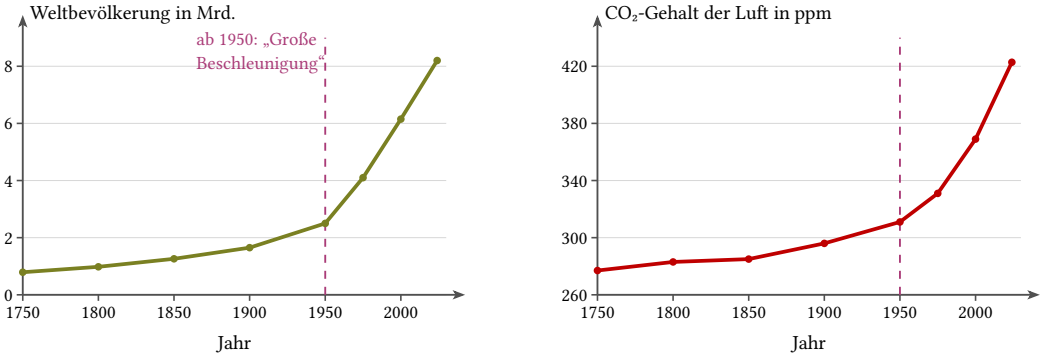


Abbildung 3: Zwei Kurven der „Großen Beschleunigung“. Daten: UN, World Population Prospects 2024; Eisbohrkerne und NOAA 2025.

Abbildung 3 zeigt zwei Kurven, die für viele andere stehen. Nach langsamem Anstieg seit der Industrialisierung knicken sie um 1950 steil nach oben. Diese **Große Beschleunigung** betrifft Bevölkerung, Energieverbrauch, Düngereinsatz, Wasserverbrauch, Verkehr und Tourismus ebenso wie die Folgen in der Natur: CO_2, Methan, Versauerung, Verlust tropischer Wälder.

2.2 Wann beginnt das Anthropozän?

Ein neues Erdzeitalter in der geologischen Zeitskala braucht einen eindeutigen, weltweit erkennbaren Beginn in den Gesteinsschichten. Diskutiert wurden drei Vorschläge:

a) der Beginn der Landwirtschaft vor einigen tausend Jahren: Er verlief aber regional zu verschieden;
b) die Industrialisierung um 1800: Sie begann in England und breitete sich langsam aus;
c) die Zeit um 1950: Mit der Großen Beschleunigung und den Atomwaffentests hinterlässt sie ein weltweit gleichzeitiges Signal (Plutonium, Kunststoff, Ruß).

Eine Arbeitsgruppe von Geologen schlug 2023 die Zeit um 1950 vor und als Referenzort die Jahresschichten im Crawford Lake in Kanada. Im März 2024 lehnte die zuständige Kommission der Internationalen Union der Geologischen Wissenschaften (IUGS) es jedoch ab, das Anthropozän als formale Epoche in die Zeitskala aufzunehmen. Damit bleibt das Anthropozän ein **Konzept**: eine Deutung der Gegenwart, die in Geographie, Geschichte, Politik und Kunst breit verwendet wird, aber kein amtlicher Abschnitt der Erdgeschichte.

2.3 Bewertung: Was das Konzept leistet und wo es kritisiert wird

Stärken	Kritik
Es fasst die Veränderungen aller Sphären in **einem** Begriff zusammen und macht die Größenordnung des menschlichen Einflusses deutlich.	„Der Mensch“ ist zu ungenau: Verursacht haben die Veränderungen vor allem die Industrieländer und die Wohlhabenden; viele Menschen haben kaum dazu beigetragen. Einige sprechen deshalb vom „Kapitalozän“.
Es betont die Verantwortung: Wer das System Erde gestaltet, muss es auch erhalten (Leitidee Nachhaltigkeit, GL5).	Es kann als Allmachtsfantasie gelesen werden, als ob der Mensch die Erde steuern könne; Naturgefahren zeigen die Grenzen.
Es verbindet Natur- und Gesellschaftswissenschaften, also genau die Perspektive der Geographie.	Geologisch fehlt eine formale Festlegung; der Beginn ist umstritten.

Eng verwandt ist das Konzept der **planetaren Belastungsgrenzen**: neun Bereiche (zum Beispiel Klima, Artenvielfalt, Stickstoff- und Phosphorkreislauf, Süßwasser, Landnutzung, Ozeanversauerung), in denen die Menschheit einen sicheren Spielraum nicht verlassen sollte. Nach Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung waren 2025 sieben der neun Grenzen überschritten.

Für dieses Skript ist das Anthropozän aus einem weiteren Grund wichtig: Auch Naturgefahren sind im Anthropozän nicht mehr „rein natürlich“. Der Mensch verändert ihre Häufigkeit (Starkregen im Klimawandel), er erzeugt selbst Erdbeben (Geothermie, Bergbau, Stauseen) und er bestimmt durch die Art, wie er siedelt und baut, wie verwundbar er ist (Kapitel 8 und 9).

Merksatz

Das **Anthropozän** bezeichnet die Idee, dass der Mensch zur bestimmenden Kraft im System Erde geworden ist und seine Spuren dauerhaft in den Gesteinsschichten hinterlässt. Als Beginn gilt meist die Große Beschleunigung um 1950. Als formale geologische Epoche wurde es 2024 abgelehnt; als Konzept zur Deutung der Gegenwart ist es weit verbreitet, aber umstritten.

Fachbegriffe

Anthropozän: Konzept eines „Zeitalters des Menschen“, in dem menschliche Tätigkeit das System Erde dauerhaft und weltweit prägt; Beginn meist um 1950 angesetzt, keine formale Epoche.

Üben: **noctua** ↗

3 Schalenbau der Erde und Kontinentverschiebung

BP 3.5.2.1 (1)

Warum passt die Ostküste Südamerikas so gut an die Westküste Afrikas? Diese Frage hat schon Gelehrte des 17. Jahrhunderts beschäftigt. Eine überzeugende Antwort setzt voraus, dass man weiß, woraus die Erde besteht und was unter den Kontinenten liegt.

3.1 Der Schalenbau der Erde

Niemand hat je tiefer als gut 12 km in die Erde gebohrt (Kola-Bohrung). Unser Wissen über das Erdinnere stammt vor allem aus der Ausbreitung von Erdbebenwellen (Kapitel 6): Wo sich ihre Geschwindigkeit sprunghaft ändert oder wo sie gar nicht ankommen, ändern sich Stoff oder Zustand. So ergibt sich der Schalenbau in Abbildung 4.

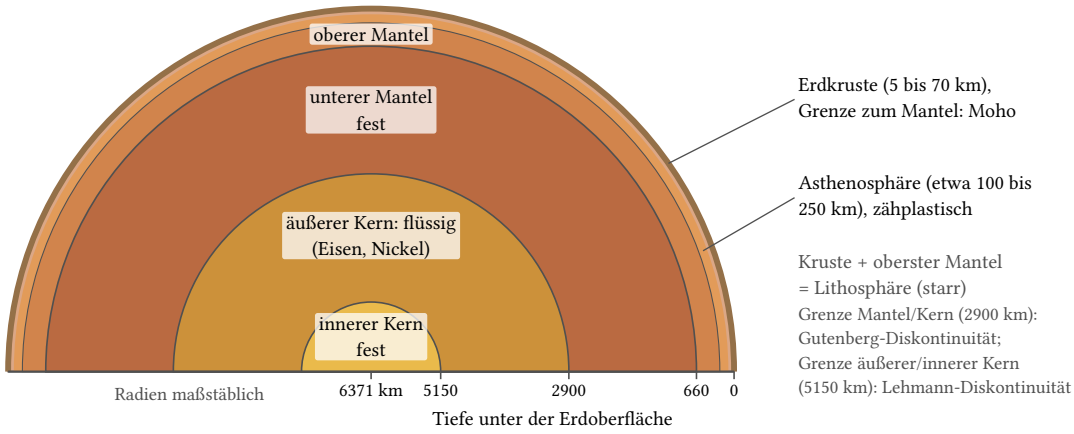


Abbildung 4: Schalenbau der Erde (Halbschnitt). Die Erdkruste ist im Maßstab der Zeichnung dünner als die Linie, mit der sie gezeichnet ist.

- Die **Erdkruste** ist die äußerste Schale. Die **ozeanische Kruste** unter den Meeren ist 5 bis 10 km dick und besteht aus Basalt (Dichte etwa 3,0 g je cm³). Die **kontinentale Kruste** ist im Mittel 30 bis 40 km dick, unter hohen Gebirgen bis 70 km, und hat eine granitische Zusammensetzung (etwa 2,7 g je cm³). Die Grenze zum Mantel heißt nach ihrem Entdecker **Mohorovičić-Diskontinuität**, kurz Moho.
- Der **Erdmantel** reicht bis 2900 km Tiefe und macht über 80 % des Erdvolumens aus. Er besteht aus festem, aber sehr heißem Gestein (Peridotit), das sich über Millionen Jahre langsam wie eine zähe Masse verformen und fließen kann.
- Der **äußere Kern** (2900 bis 5150 km) besteht aus flüssigem Eisen und Nickel. Seine Strömungen erzeugen das Magnetfeld der Erde.
- Der **innere Kern** ist trotz Temperaturen um 5000 bis 6000 °C fest, weil der Druck dort so groß ist.

Für die Plattentektonik ist eine zweite Einteilung wichtiger, die nach dem **Verhalten** des Gesteins fragt (Abbildung 5). Die **Lithosphäre** (Kruste und oberster Mantel) ist starr und bricht bei Belastung. Darunter liegt die **Asthenosphäre** (etwa 100 bis 250 km Tiefe): Hier ist das Mantelgestein so heiß, dass es zu einem kleinen Teil aufgeschmolzen und zähplastisch verformbar ist. Auf ihr können die Lithosphärenplatten gleiten.

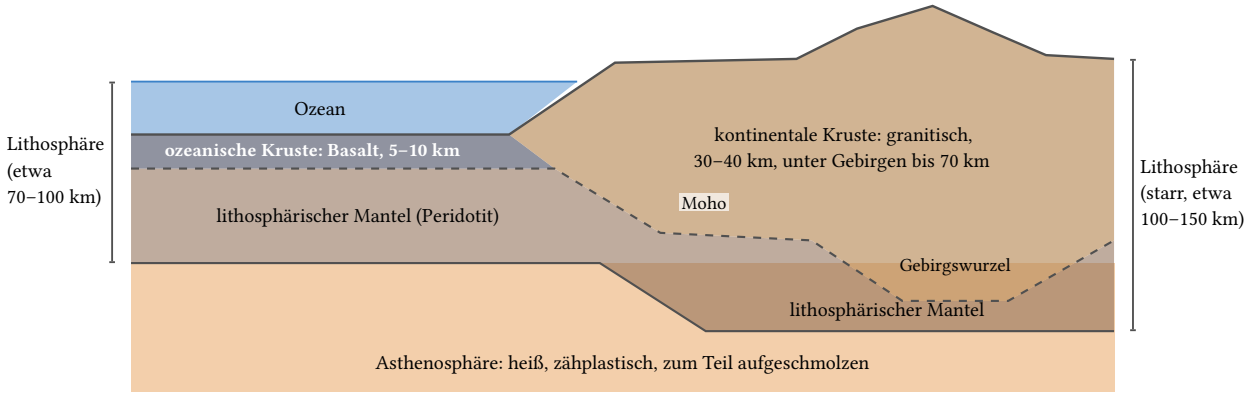


Abbildung 5: Ozeanische und kontinentale Lithosphäre über der Asthenosphäre (schematisch, nicht maßstäblich).

Die leichtere kontinentale Kruste „schwimmt“ gewissermaßen höher auf dem Mantel als die schwerere ozeanische Kruste, und hohe Gebirge haben eine tiefe Wurzel, ähnlich wie ein Eisberg, dessen größter Teil unter Wasser liegt. Dieses Schwimmgleichgewicht heißt **Isostasie**. Wird ein Gebiet entlastet, zum Beispiel durch das Abschmelzen eines Eisschilds, hebt es sich langsam: Teile Skandinaviens steigen seit dem Ende der letzten Kaltzeit noch heute um bis zu etwa 1 cm pro Jahr.

3.2 Wegeners Theorie der Kontinentverschiebung

Um 1900 erklärten die meisten Geologen die Gebirge mit der **Kontraktionstheorie**: Die Erde kühle ab und schrumpfe, ihre Kruste lege sich in Falten wie die Haut eines vertrocknenden Apfels. Ähnliche Fossilien auf verschiedenen Kontinenten erklärte man mit versunkenen **Landbrücken**.

Der Meteorologe und Polarforscher Alfred Wegener (1880–1930) stellte 1912 in Frankfurt eine andere Idee vor und veröffentlichte sie 1915 in dem Buch „Die Entstehung der Kontinente und Ozeane“. Nach **Wegeners Theorie der Kontinentverschiebung** bildeten alle Kontinente einst einen einzigen Urkontinent, **Pangäa** („ganze Erde“), umgeben von einem Urozean. Pangäa zerbrach, die Bruchstücke drifteten auseinander und wandern noch heute. Wegener trug Indizien aus vielen Fächern zusammen (Abbildung 6):

- **Geometrie:** Die Umrisse der Kontinente passen zusammen, am besten nicht entlang der heutigen Küste, sondern entlang des Schelfrands in etwa 1000 m Tiefe, denn dort endet die kontinentale Kruste.
- **Geologie:** Gesteinsserien und alte Gebirgsrümpfe gleichen Alters setzen sich über die Ozeane hinweg fort, zum Beispiel von Brasilien nach Westafrika oder von den Appalachen Nordamerikas nach Schottland und Skandinavien.
- **Paläontologie:** Fossilien des kleinen Süßwasserreptils *Mesosaurus* finden sich nur in Südamerika und im südlichen Afrika; über einen Ozean hätte es nicht schwimmen können. Der Samenfarn *Glossopteris* kommt auf allen Südkontinenten und in Indien vor.
- **Paläoklima:** Spuren einer großen Vereisung vor etwa 300 Millionen Jahren (Gletscherschrammen, Moränen) liegen heute in Südamerika, Afrika, Indien und Australien, teils nahe dem Äquator. Kohleflöze, die aus tropischen Sumpfwäldern entstanden, liegen dagegen heute in Europa, Nordamerika und sogar in der Antarktis.

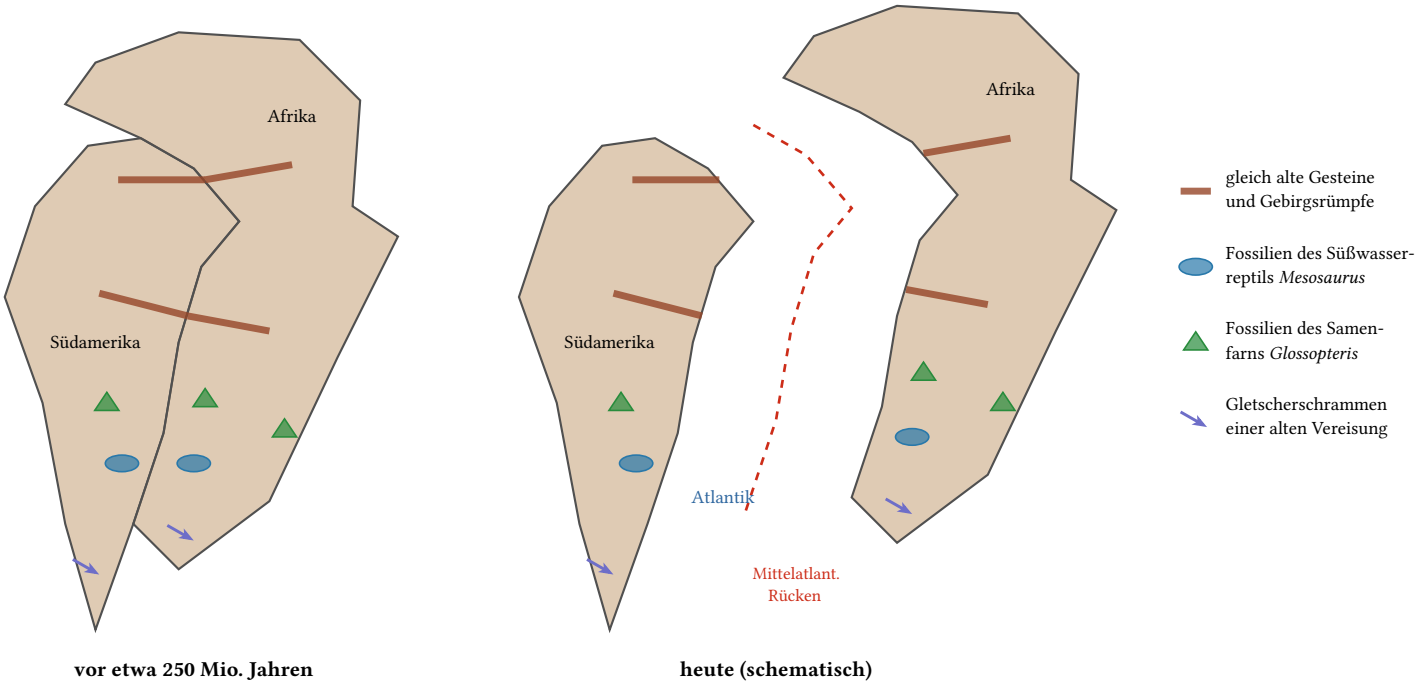


Abbildung 6: Indizien für Wegeners Theorie, schematisch: Fügt man Südamerika und Afrika zusammen, setzen sich Gesteine, Fossilfundorte und Vereisungsspuren über die Naht fort.

Trotz dieser Indizien lehnte die Mehrheit der Fachleute Wegeners Theorie ab, besonders in Nordamerika. Der Grund: Wegener konnte keine überzeugende **Antriebskraft** nennen. Er vermutete Kräfte aus der Erddrehung („Polflucht“) und aus den Gezeiten; beide sind viel zu schwach. Außerdem stellte er sich vor, dass die Kontinente wie Schiffe **durch** die ozeanische Kruste pflügen, was physikalisch unmöglich ist. Wegener starb 1930 auf einer Expedition im Inlandeis Grönlands. Erst drei Jahrzehnte später lieferte die Erforschung der Ozeanböden die fehlenden Teile.

Typischer Fehler

Falsch: „Wegener hat die Plattentektonik entdeckt."

Richtig: Wegener begründete die Theorie der Kontinentverschiebung. Die Plattentektonik entstand erst in den 1960er-Jahren, übernahm seine Grundidee und ersetzte seinen Mechanismus.

Bei Wegener bewegen sich die **Kontinente** durch den Ozeanboden. In der Plattentektonik bewegen sich **Lithosphärenplatten**, die Kontinente und Ozeanböden zugleich tragen, auf der Asthenosphäre.

Fachbegriffe

Wegeners Theorie der Kontinentverschiebung: Theorie (1912/1915), nach der alle Kontinente einst den Urkontinent Pangäa bildeten, der zerbrach; die Kontinente wandern seitdem auseinander. Belegt mit geometrischen, geologischen, paläontologischen und paläoklimatischen Indizien, aber ohne tragfähigen Antrieb.

Üben: **noctua** ↗

4 Die Theorie der Plattentektonik

BP 3.5.2.1 (1)

Nach dem Zweiten Weltkrieg vermaßen Forschungsschiffe mit dem Echolot die Ozeanböden. Statt einer flachen, mit Schlamm bedeckten Ebene fanden sie ein gewaltiges Gebirge: einen Rücken, der sich über etwa 60 000 km durch alle Ozeane zieht, mit einem tiefen Graben auf dem Kamm. Dazu kamen Tiefseerinnen von über 10 km Tiefe am Rand des Pazifiks. Diese Entdeckungen führten in den 1960er-Jahren zur **Theorie der Plattentektonik**.

4.1 Die Ozeanböden wachsen: Seafloor-Spreading

1962 schlug der amerikanische Geologe Harry Hess vor, dass an den mittelozeanischen Rücken ständig Magma aufsteigt, zu neuer ozeanischer Kruste erstarrt und den Ozeanboden nach beiden Seiten auseinanderschiebt (**Seafloor-Spreading**, Ozeanbodenspreizung). Wenn die Ozeanböden an den Rücken wachsen, die Erde aber nicht größer wird, muss Kruste an anderer Stelle wieder verschwinden: in den Tiefseerinnen.

Den Beweis lieferte der Magnetismus. Wenn basaltische Lava erstarrt, richten sich darin eisenhaltige Minerale nach dem Erdmagnetfeld aus und „frieren“ dessen Richtung ein. Das Erdmagnetfeld hat sich in der Erdgeschichte immer wieder umgepolt, im Mittel einige Male pro Million Jahre, zuletzt vor etwa 780 000 Jahren. 1963 erkannten Frederick Vine und Drummond Matthews, dass der Ozeanboden deshalb ein Streifenmuster zeigen muss, das zu beiden Seiten des Rückens spiegelbildlich gleich ist, wie in Abbildung 7.

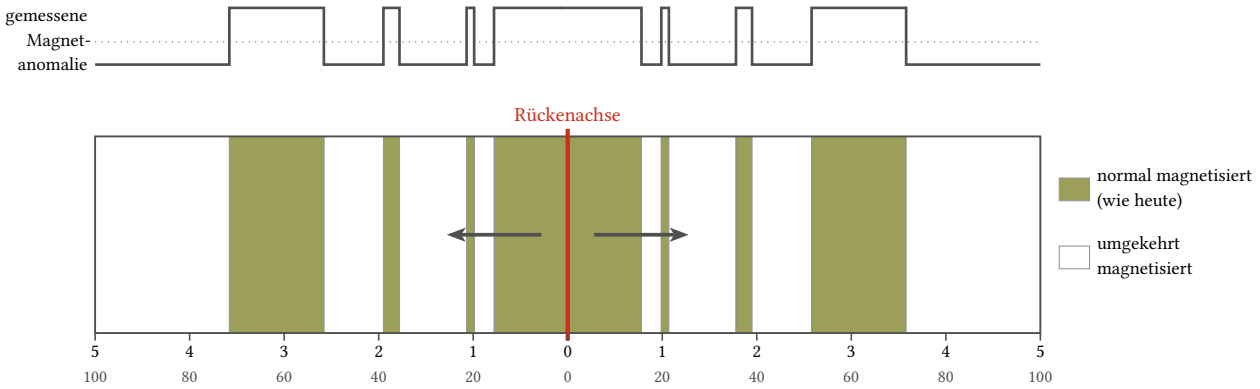


Abbildung 7: Spiegelbildliche Magnetstreifen beiderseits eines mittelozeanischen Rückens. Modell mit vereinfachter Polaritätszeitskala und einer halben Spreizungsrate von 2 cm pro Jahr.

Bohrungen in den Ozeanboden ab 1968 bestätigten: Die Kruste wird mit der Entfernung vom Rücken älter, und die Sedimentschicht darauf wird dicker. Der älteste Ozeanboden ist nur etwa 180 Millionen Jahre alt, während kontinentale Gesteine bis über 4 Milliarden Jahre alt sind. Die Ozeanböden sind also junge, ständig erneuerte Kruste.

Beispiel 2

Spreizungsrate aus den Magnetstreifen. Die Grenze zwischen dem heutigen, normal magnetisierten Streifen und dem ersten umgekehrt magnetisierten Streifen liegt in Abbildung 7 15,6 km von der Rückenachse entfernt. Diese Umpolung fand vor 780 000 Jahren statt. Halbe Spreizungsrate:

$$v = \frac{15{,}6\ \text{km}}{780\ 000\ \text{a}} = \frac{1\ 560\ 000\ \text{cm}}{780\ 000\ \text{a}} = 2\ \frac{\text{cm}}{\text{a}}.$$

Der Ozean öffnet sich also insgesamt um 4 cm pro Jahr, je 2 cm nach jeder Seite.

4.2 Platten und ihre Bewegung

Trägt man alle Erdbebenherde der Erde in eine Karte ein, bilden sie schmale Bänder, die die Erdoberfläche in Felder zerteilen. Diese Felder sind die **Lithosphärenplatten**: sieben große (Pazifische, Nordamerikanische, Südamerikanische, Eurasische, Afrikanische, Indisch-Australische und Antarktische Platte) und zahlreiche kleinere wie die Nazca-, die Philippinische oder die Arabische Platte. Eine Platte kann nur Ozeanboden tragen (Pazifische Platte) oder Kontinent und Ozeanboden zugleich (Afrikanische Platte).

Heute misst man die Bewegung direkt mit Satelliten (GPS): Die Platten bewegen sich mit etwa 2 bis 15 cm pro Jahr gegeneinander, also etwa so schnell, wie Fingernägel wachsen. Der Nordatlantik öffnet sich um gut 2 cm pro Jahr, am Ostpazifischen Rücken sind es über 10 cm pro Jahr.

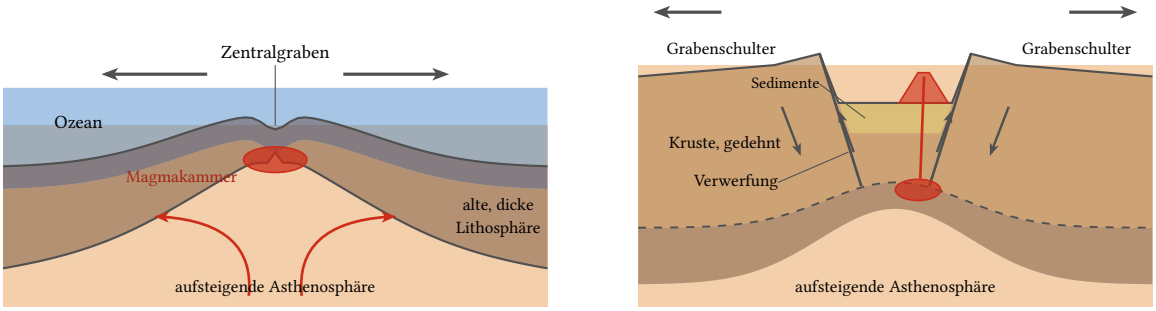
Merksatz

Theorie der Plattentektonik: Die starre Lithosphäre ist in große und kleine Platten zerbrochen, die auf der zähplastischen Asthenosphäre gleiten. An den mittelozeanischen Rücken entsteht neue ozeanische Lithosphäre, an den Tiefseerinnen taucht sie wieder in den Mantel ab (Subduktion). Fast alle Erdbeben, die meisten Vulkane und die großen Gebirge liegen an den Plattengrenzen.

Antrieb. Was bewegt die Platten? Die Energie stammt aus der Wärme des Erdinneren, zum Teil Restwärme aus der Entstehung der Erde, zum Teil Wärme aus dem Zerfall radioaktiver Elemente. Sie hält den Mantel in langsamer **Konvektion**: Heißes Material steigt auf, kühleres sinkt ab. Lange stellte man sich die Platten wie Kisten auf einem Förderband vor, die von Konvektionswalzen getragen werden. Heute gilt eine andere Kraft als die wichtigste: der **Plattenzug** (slab pull). Ozeanische Lithosphäre kühlt mit zunehmendem Alter ab, wird dichter als die Asthenosphäre darunter und sinkt an den Tiefseerinnen ab. Der absinkende Teil zieht die übrige Platte hinter sich her wie ein Tischtuch, das über die Tischkante rutscht. Dazu kommt der **Rückenschub** (ridge push): Die heiße, hoch aufgewölbte Lithosphäre am Rücken gleitet seitlich ab. Platten, an denen große Teile abtauchen, bewegen sich tatsächlich am schnellsten (Pazifische Platte).

4.3 Divergente Plattengrenzen

An einer **divergenten** (konstruktiven) Plattengrenze bewegen sich zwei Platten auseinander. Durch die Entlastung schmilzt das heiße Mantelgestein der Asthenosphäre teilweise auf (**Druckentlastungsschmelzen**), basaltisches Magma steigt auf und bildet neue Kruste (Abbildung 8).



(a) mittelozeanischer Rücken **(b) kontinentaler Grabenbruch**

Abbildung 8: Divergente Plattengrenzen: (a) im Ozean, (b) im Kontinent (schematisch).

- **Mittelozeanische Rücken** sind die häufigste Form. Auf ihrem Kamm liegt ein Zentralgraben, an dem es ständig zu kleinen, flachen Erdbeben und zu Vulkanismus kommt. Basaltlava erstarrt unter Wasser zu **Kissenlava**. An heißen Quellen am Meeresboden treten mineralreiche Lösungen aus (Schwarze Raucher, Kapitel 7). An Land sieht man den Mittelatlantischen Rücken nur in **Island**, weil dort zusätzlich ein Hot Spot liegt (Kapitel 5). In Þingvellir kann man durch die Spalte zwischen Nordamerikanischer und Eurasischer Platte wandern.
- Ein **kontinentaler Grabenbruch** entsteht, wenn ein Kontinent gedehnt wird. Die Kruste wird dünner, ein Streifen sinkt an Verwerfungen ab, die Ränder (Grabenschultern) werden gehoben. Beispiele sind der **Ostafrikanische Graben** mit Vulkanen wie dem Kilimandscharo und der **Oberrheingraben** zwischen Schwarzwald und Vogesen. Im Oberrheingraben ist die Dehnung weitgehend zum Stillstand gekommen; seine Entstehung (seit etwa 45 Millionen Jahren) und der Vulkan des Kaiserstuhls gehören zur Landschaftsgeschichte Südwestdeutschlands (GL2).

4.4 Konvergente Plattengrenzen

An einer **konvergenten** (destruktiven) Plattengrenze bewegen sich zwei Platten aufeinander zu. Was dann geschieht, hängt von der Dichte der beteiligten Lithosphäre ab. Die schwerere ozeanische Lithosphäre taucht unter die leichtere ab (**Subduktion**). Kontinentale Lithosphäre ist zu leicht, um tief abzutauchen.

Ozeanisch–kontinental (Andentyp, Abbildung 9): Die ozeanische Nazca-Platte taucht mit etwa 6 bis 8 cm pro Jahr unter die Südamerikanische Platte ab. Dabei entstehen:

a) eine **Tiefseerinne** vor der Küste (Peru-Chile-Graben, bis etwa 8000 m tief);
b) ein **Akkretionskeil** aus abgeschabten Sedimenten;

c) eine Zone von Erdbebenherden, die vom flachen Bereich an der Rinne schräg in den Mantel hinab bis in etwa 700 km Tiefe reicht, die **Wadati-Benioff-Zone**. Hier entstehen die stärksten Erdbeben der Erde, denn auf der großen Kontaktfläche verhaken sich die Platten und lösen sich in Abständen ruckartig (Kapitel 6);
d) eine **Vulkankette** parallel zur Küste in etwa 100 bis 300 km Entfernung von der Rinne. In etwa 100 km Tiefe gibt die abtauchende Platte Wasser ab, das in Mineralen und Sedimenten gebunden war. Das Wasser senkt die Schmelztemperatur des darüberliegenden Mantelgesteins, das deshalb teilweise aufschmilzt. Das Magma steigt auf, nimmt auf dem langen Weg durch die dicke kontinentale Kruste Material auf und wird zäh und gasreich: Es entstehen **explosive Schichtvulkane** wie der Cotopaxi oder der Villarrica;
e) ein **Faltengebirge** durch die Einengung und das aufsteigende Magma: die Anden.

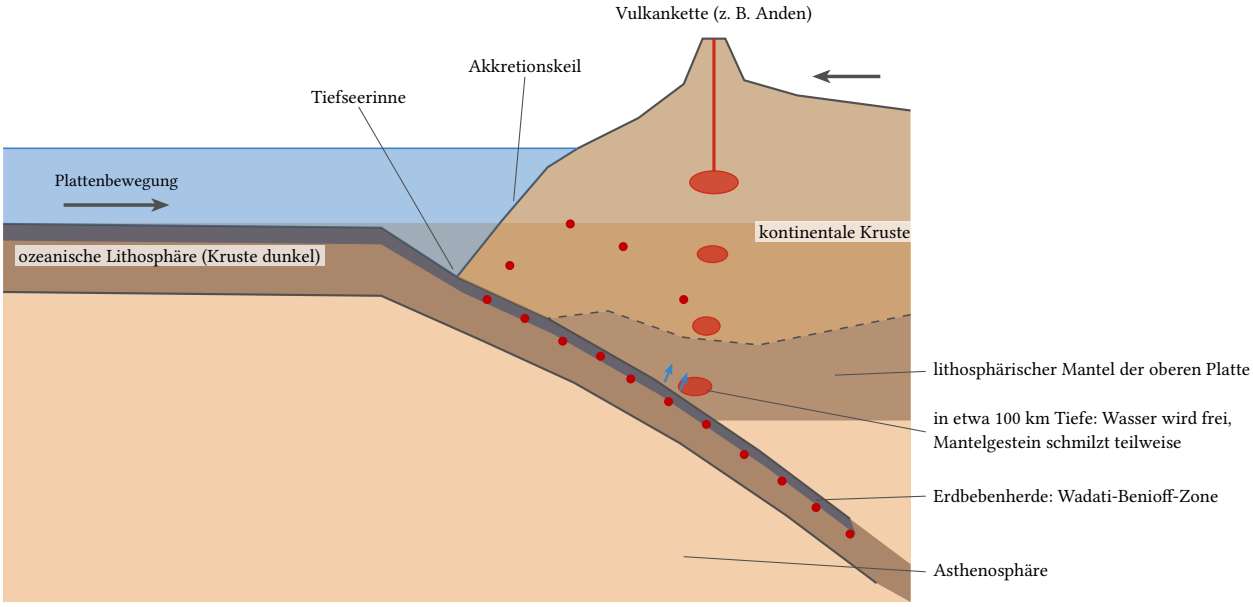
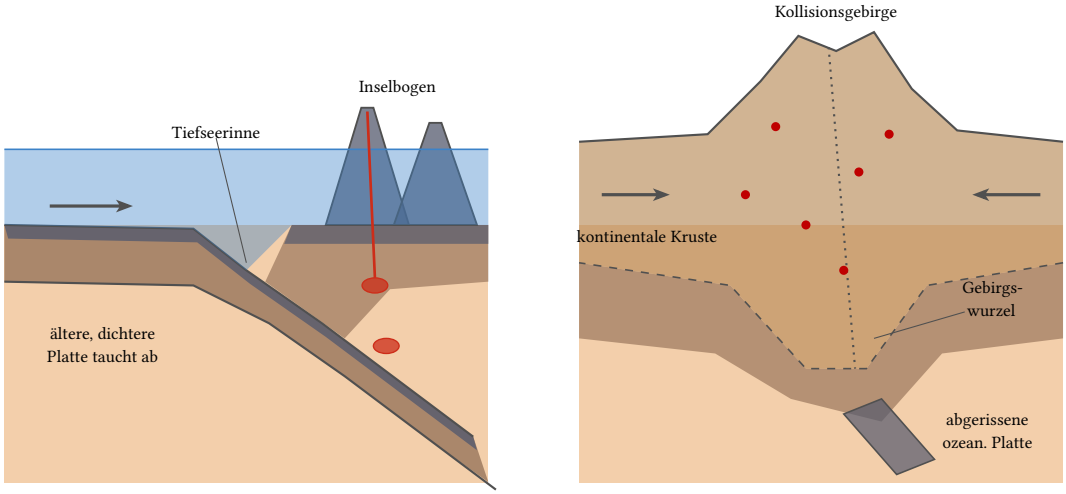


Abbildung 9: Subduktion ozeanischer unter kontinentale Lithosphäre (Andentyp, schematisch, stark überhöht).

Ozeanisch–ozeanisch (Abbildung 10 a): Treffen zwei ozeanische Platten aufeinander, taucht die ältere, kühlere und damit dichtere ab. Über ihr entsteht ein bogenförmiger Zug von Vulkaninseln, ein **Inselbogen**, zum Beispiel die Marianen, die Aleuten oder die Kleinen Antillen. Japan ist ein Inselbogen, der zum Teil auf kontinentaler Kruste sitzt. Im Marianengraben liegt mit knapp 11 000 m die tiefste Stelle der Ozeane.

Kontinental–kontinental (Abbildung 10 b): Ist der Ozean zwischen zwei Kontinenten vollständig subduziert, stoßen die Kontinente zusammen (**Kollision**). Keiner taucht tief ab; die Kruste wird gestaucht, verschuppt und verdickt sich auf das Doppelte. So entstehen die höchsten Gebirge mit tiefen Wurzeln: Der **Himalaya** entsteht seit etwa 50 Millionen Jahren aus der Kollision Indiens mit Eurasien, die **Alpen** aus der Kollision der Adriatischen Platte (eines Teils Afrikas) mit Europa. Vulkanismus fehlt weitgehend, Erdbeben sind dagegen häufig und reichen über ein breites Gebiet (Nepal 2015, Kapitel 9).



(a) ozeanisch – ozeanisch **(b) kontinental – kontinental**

Abbildung 10: Weitere konvergente Plattengrenzen: (a) Inselbogen, (b) Kollisionsgebirge (schematisch).

4.5 Transformstörungen

An einer **Transformstörung** (konservativen Plattengrenze) gleiten zwei Platten waagerecht aneinander vorbei; Kruste wird weder gebildet noch vernichtet. Die meisten Transformstörungen verbinden versetzte Abschnitte der mittelozeanischen Rücken (Abbildung 11). Nur zwischen den Rückenabschnitten bewegen sich die Platten gegeneinander; außerhalb davon setzen sich die Störungen als inaktive **Bruchzonen** fort.

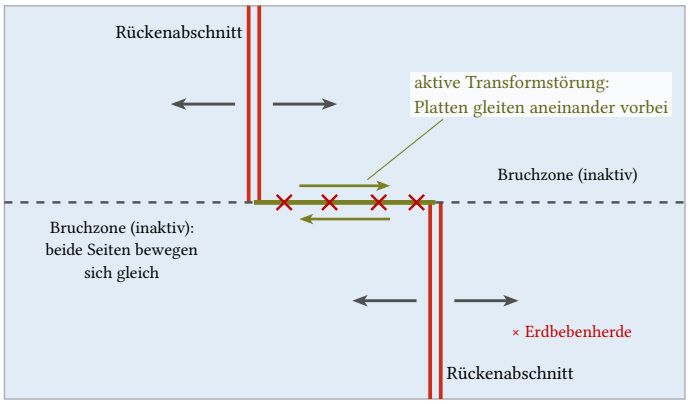


Abbildung 11: Transformstörung zwischen zwei versetzten Rückenabschnitten (Aufsicht).

Die bekannteste Transformstörung an Land ist die **San-Andreas-Verwerfung** in Kalifornien. Die Pazifische Platte gleitet dort mit einigen Zentimetern pro Jahr an der Nordamerikanischen Platte nach Nordwesten vorbei. Da sich die Platten verhaken, baut sich Spannung auf, die sich in Erdbeben wie dem von San Francisco 1906 entlädt. Vulkanismus gibt es an Transformstörungen kaum.

	divergent	konvergent	Transform
Bewegung	auseinander	aufeinander zu	aneinander vorbei
Kruste	entsteht (konstruktiv)	wird subduziert oder gestaucht (destruktiv)	bleibt erhalten (konservativ)
Formen	Rücken mit Zentralgraben, Grabenbruch	Tiefseerinne, Inselbogen, Vulkankette, Faltengebirge	Verwerfung, Bruchzone
Erdbeben	häufig, flach, meist schwach	häufig; flach bis 700 km tief, die stärksten der Erde	häufig, flach, teils stark
Vulkanismus	effusiv, basaltisch	explosiv, zähflüssiges Magma (nicht bei Kollision)	kaum
Beispiele	Mittelatlantischer Rücken, Island, Ostafrika	Anden, Japan, Marianen, Himalaya, Alpen	San-Andreas-Verwerfung, Nordanatolische Verwerfung

Tabelle 1: Die drei Arten von Plattengrenzen im Überblick.

4.6 Wegener und die Plattentektonik im Vergleich

Der Bildungsplan verlangt, die Theorien zu **vergleichen**. Ein Vergleich legt Kriterien fest, stellt Gemeinsamkeiten und Unterschiede gegenüber und formuliert ein Ergebnis.

Kriterium	Kontinentverschiebung (Wegener 1915)	Plattentektonik (seit den 1960er-Jahren)
Was bewegt sich?	die Kontinente (Sial) durch die Ozeanböden (Sima)	Lithosphärenplatten mit Kontinenten und Ozeanböden
Worauf?	durch die zähe ozeanische Kruste	auf der zähplastischen Asthenosphäre
Antrieb	Polflucht und Gezeitenkräfte (zu schwach)	Wärme des Erdinneren: Mantelkonvektion, Plattenzug, Rückenschub
Ozeanböden	alt und passiv	jung; entstehen an Rücken, verschwinden in Rinnen
Belege	Küstenform, Gesteine, Fossilien, Paläoklima	zusätzlich Magnetstreifen, Alter der Ozeanböden, Erdbebenverteilung, GPS-Messungen
Gebirge, Vulkane, Erdbeben	Gebirge an der Stirnseite wandernder Kontinente, sonst kaum erklärt	erklärt durch die Vorgänge an den Plattengrenzen

Tabelle 2: Vergleich der beiden Theorien.

Ergebnis: Beide Theorien teilen die Grundidee, dass Kontinente ihre Lage verändern und einst zusammenhingen; Wegeners Indizien gelten weiterhin. Die Plattentektonik unterscheidet sich aber im entscheidenden Punkt, dem Mechanismus: Nicht Kontinente pflügen durch den Ozean, sondern ganze Lithosphärenplatten bewegen sich, angetrieben von der Wärme des Erdinneren. Sie erklärt damit auch Erdbeben, Vulkane und Gebirge in einem einzigen Modell. Die Plattentektonik ist deshalb keine Widerlegung, sondern eine Weiterentwicklung Wegeners, und eines der wichtigsten Beispiele dafür, wie eine abgelehnte Idee durch neue Daten wissenschaftlich anerkannt wird.

Fachbegriffe

Plattengrenzen: Zonen, an denen sich Lithosphärenplatten auseinander (divergent), aufeinander zu (konvergent) oder aneinander vorbei (Transform) bewegen.

Subduktion: Abtauchen dichterer ozeanischer Lithosphäre unter eine andere Platte in den Mantel.

Theorie der Plattentektonik: Theorie, nach der die Lithosphäre in Platten zerbrochen ist, die auf der Asthenosphäre gleiten; an Rücken entsteht, an Tiefseerinnen vergeht ozeanische Kruste.

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Plattengrenzen und Ozeanboden** ↗

5 Wilson-Zyklus, Hot Spots und Vulkanismus

BP 3.5.2.1 (1)

Die Plattentektonik erklärt, was an einzelnen Plattengrenzen geschieht. Zwei weitere Theorien des Bildungsplans erweitern den Blick: der Wilson-Zyklus auf die Zeit, die Hot-Spot-Theorie auf Vulkane mitten in einer Platte. Zusammen erklären sie, wo und warum Vulkane entstehen.

5.1 Der Wilson-Zyklus: Ozeane öffnen und schließen sich

Der kanadische Geophysiker J. Tuzo Wilson fragte 1966: „Hat sich der Atlantik geschlossen und dann wieder geöffnet?“ Er hatte bemerkt, dass in den Gebirgen beiderseits des Nordatlantiks Fossilien vorkommen, die zu einem älteren Ozean gehören, der lange vor dem Atlantik bestand und sich geschlossen hatte. Daraus entwickelte er die Vorstellung, dass Ozeanbecken einen Lebenszyklus durchlaufen. Dieser **Wilson-Zyklus** (Abbildung 12) dauert einige hundert Millionen Jahre:

1. **Aufwölbung und Dehnung:** Unter einem großen Kontinent staut sich Wärme, die Lithosphäre wölbt sich auf und wird gedehnt.
2. **Grabenbruch:** Der Kontinent reißt auf, es entstehen Grabenbrüche mit Vulkanismus. Heute: Ostafrikanischer Graben.
3. **Junges Meer:** Der Graben sinkt unter den Meeresspiegel, am Boden entsteht erste ozeanische Kruste. Heute: Rotes Meer.
4. **Ozean mit passiven Rändern:** Der Ozean wird breiter; an seinen Rändern gibt es keine Plattengrenze, Kontinent und Ozeanboden gehören zur selben Platte. Heute: Atlantik.
5. **Subduktion:** Alte, schwer gewordene ozeanische Lithosphäre beginnt an einem Rand abzutauchen; der Ozean schrumpft. Heute: Pazifik, der von Subduktionszonen umgeben ist.
6. **Kollision:** Der Ozean ist verschwunden, die Kontinente stoßen zusammen, ein Gebirge entsteht. Heute: Himalaya. Ein neuer Superkontinent kann sich bilden, der später wieder zerbricht.

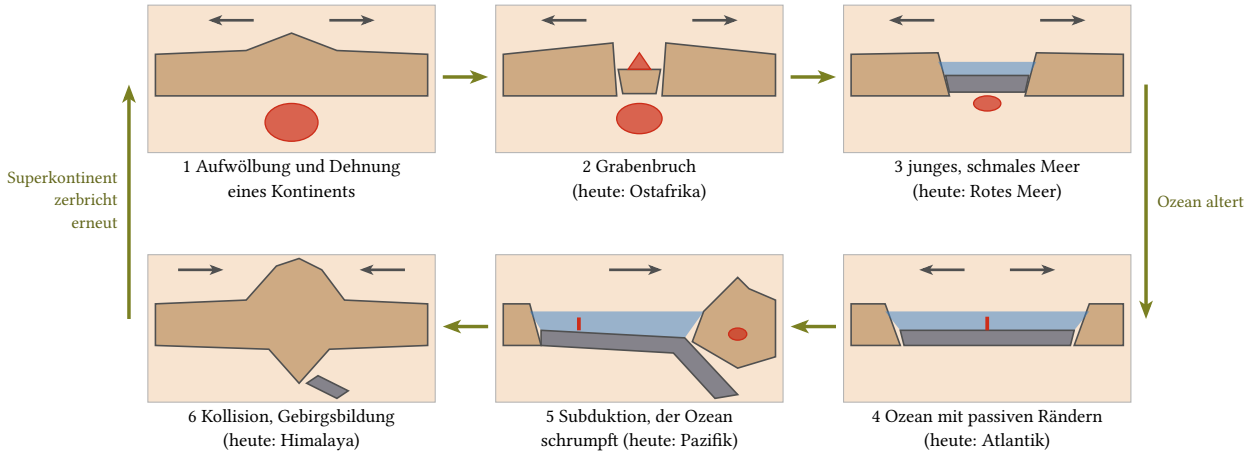


Abbildung 12: Der Wilson-Zyklus in sechs Stadien (schematische Profile).

Der Zyklus hat sich in der Erdgeschichte mehrfach wiederholt. Vor etwa einer Milliarde Jahren bestand der Superkontinent **Rodinia**, vor etwa 300 bis 200 Millionen Jahren **Pangäa**. Für die Zukunft sagen Modelle wieder einen Superkontinent voraus, wenn sich der Pazifik oder der Atlantik schließt; wie er aussehen wird, ist offen. Der Wilson-Zyklus zeigt, dass die heutige Verteilung von Kontinenten und Ozeanen nur eine Momentaufnahme ist und dass jedes Stadium irgendwo auf der Erde gerade zu beobachten ist.

5.2 Die Hot-Spot-Theorie

Hawaii liegt mitten in der Pazifischen Platte, Tausende Kilometer von der nächsten Plattengrenze entfernt, und hat doch einige der aktivsten Vulkane der Erde. Die Plattentektonik allein erklärt das nicht. Wilson schlug 1963 vor, dass unter Hawaii eine ortsfeste Schmelzzone im Mantel liegt, ein **Hot Spot** („heißer Fleck“). William Jason Morgan ergänzte 1971, dass Hot Spots von **Mantelplumes** gespeist werden: schlauchförmigen Strömen heißen Mantelgesteins, die wahrscheinlich tief im Mantel, vielleicht an der Grenze zum Kern, beginnen. Unter der Lithosphäre breitet sich der

Plume pilzförmig aus, durch Druckentlastung schmilzt Gestein auf, und basaltisches Magma dringt durch die Platte nach oben.

Nach der **Hot-Spot-Theorie** bleibt der Plume an Ort und Stelle, während die Platte über ihn hinweggleitet. Wie bei einem Blatt Papier, das man über eine Kerzenflamme zieht, entsteht eine Spur: eine Kette von Vulkanen, die umso älter sind, je weiter sie vom Hot Spot entfernt sind (Abbildung 13). Nur über dem Hot Spot ist der Vulkan aktiv; die älteren Vulkane erlöschen, werden abgetragen, sinken mit der abkühlenden Platte ab und tauchen als flache, abgetragene Seeberge unter den Meeresspiegel.

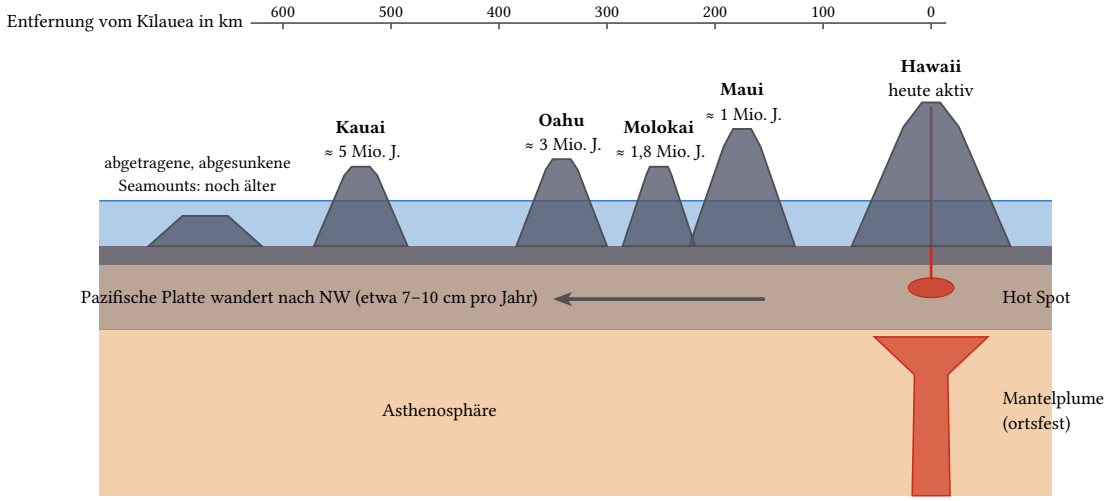


Abbildung 13: Hot Spot Hawaii: Die Pazifische Platte wandert über den ortsfesten Plume, die Inseln werden nach Nordwesten älter. Alter gerundet nach USGS, Abstände aus Kartenkoordinaten berechnet.

Beispiel 3

Plattengeschwindigkeit aus der Hawaii-Kette. Kauai ist etwa 5 Millionen Jahre alt und liegt etwa 530 km vom heute aktiven Kīlauea entfernt. Daraus folgt

$$v = \frac{530\ \text{km}}{5\ 000\ 000\ \text{a}} = \frac{53\ 000\ 000\ \text{cm}}{5\ 000\ 000\ \text{a}} \approx 11\ \frac{\text{cm}}{\text{a}}.$$

Mit Oahu (etwa 340 km, etwa 3 Millionen Jahre) erhält man ebenfalls gut 11 cm pro Jahr. Die Werte sind grob, weil die Alter gerundet sind und die Vulkane einige hunderttausend Jahre lang wachsen; als Größenordnung passen sie zu den GPS-Messungen der Pazifischen Platte von etwa 7 bis 10 cm pro Jahr.

Weitere Hot Spots liegen unter Island (zusammen mit dem Mittelatlantischen Rücken), den Galápagos-Inseln, Réunion und unter dem Yellowstone-Nationalpark. Liegt ein Hot Spot unter einem Kontinent, kann das Magma Krustengestein aufschmelzen und sehr explosiv werden: Yellowstone ist ein solcher „Supervulkan“. Auch unter der Eifel vermuten viele Forscher einen kleinen Plume; der jüngste Ausbruch dort liegt nur etwa 11 000 Jahre zurück.

Die Hot-Spot-Theorie wird bis heute weiterentwickelt. Die Kette von Hawaii knickt nach mehreren tausend Kilometern in die nordwärts verlaufende Emperor-Kette ab; der Knick ist etwa 47 Millionen Jahre alt. Lange deutete man ihn als Richtungswechsel der Pazifischen Platte. Messungen an alten Laven zeigen aber, dass auch der Hawaii-Plume selbst gewandert ist. Hot Spots sind also nicht völlig ortsfest, aber sie bewegen sich viel langsamer als die Platten.

5.3 Wo und warum Vulkane entstehen

Gestein im Erdmantel ist normalerweise fest, obwohl es heiß genug zum Schmelzen wäre, weil der hohe Druck den Schmelzpunkt anhebt. Magma entsteht nur, wenn eine von drei Bedingungen erfüllt ist:

- **Druckentlastung:** Heißes Mantelgestein steigt auf und gerät unter geringeren Druck, sein Schmelzpunkt sinkt unter die Temperatur des Gesteins (mittelozeanische Rücken, Grabenbrüche, Hot Spots).
- **Wasserzufuhr:** Wasser aus einer abtauchenden Platte senkt den Schmelzpunkt des Mantelgesteins, so wie Salz Eis schon unter 0 °C schmelzen lässt (Subduktionszonen).
- **Wärmezufuhr:** Aufsteigendes Magma erhitzt die Kruste und schmilzt sie teilweise auf (unter Kontinenten, zum Beispiel Yellowstone).

Deshalb liegen die rund 1350 möglicherweise aktiven Vulkane an Land nicht zufällig verteilt. Etwa drei Viertel von ihnen säumen den Pazifik, den **Pazifischen Feuerring** aus Subduktionszonen. Den größten Teil des Magmas fördern aber die unsichtbaren Vulkane der mittelozeanischen Rücken unter Wasser.

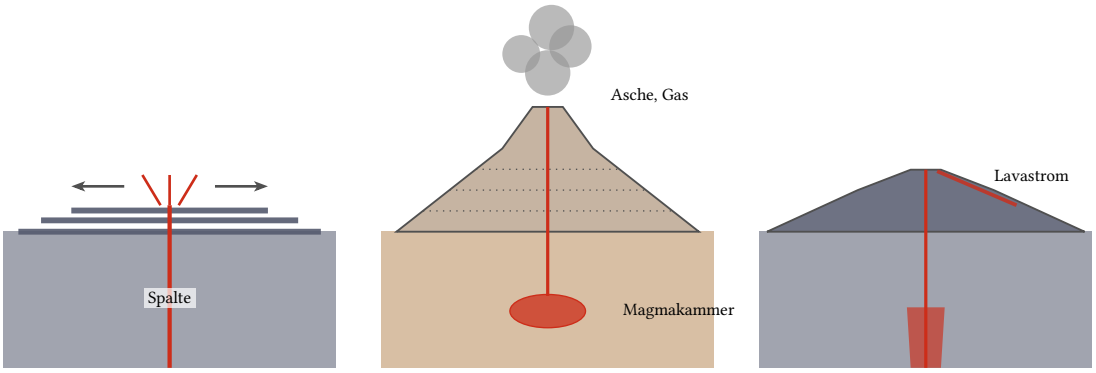


Abbildung 14: Drei Grundtypen des Vulkanismus nach ihrer plattentektonischen Lage. Die Vulkanformen und Förderprodukte folgen in GL2.

Ob ein Vulkan ruhig (**effusiv**) ausfließt oder heftig (**explosiv**) ausbricht, hängt vor allem von der Zähigkeit des Magmas und seinem Gasgehalt ab, und beides hängt von der Lage an der Plattengrenze ab (Abbildung 14). **Basaltisches** Magma aus dem Mantel ist arm an Kieselsäure (etwa 45 bis 52 % SiO_2), sehr heiß (etwa 1100 bis 1200 °C) und dünnflüssig; Gase entweichen leicht. **Andesitisches** und **rhyolithisches** Magma an Subduktionszonen ist reicher an Kieselsäure, kühler und zähflüssig; das Gas, darunter viel Wasserdampf aus der abtauchenden Platte, kann nicht entweichen, der Druck steigt, bis der Vulkan explodiert. Daher sind die gefährlichsten Vulkane der Erde die Schichtvulkane über Subduktionszonen (Vesuv, Pinatubo, Merapi, Nevado del Ruiz).

Merksatz

Vulkane entstehen dort, wo Gestein im Mantel oder in der Kruste aufschmilzt: an **divergenten Grenzen** und über **Hot Spots** durch Druckentlastung (basaltisch, dünnflüssig, meist effusiv), an **Subduktionszonen** durch Wasserzufuhr (andesitisch bis rhyolithisch, zähflüssig, gasreich, explosiv). An Kollisionszonen und Transformstörungen gibt es kaum Vulkanismus.

Fachbegriffe

Hot Spot: ortsfeste Schmelzzone im Mantel über einem Mantelplume, unabhängig von Plattengrenzen.
Hot-Spot-Theorie: Theorie (Wilson 1963, Morgan 1971), nach der eine Platte über einen nahezu ortsfesten Plume gleitet, sodass eine Vulkankette mit zunehmendem Alter entsteht.
Wilson-Zyklus: Abfolge von Öffnung und Schließung eines Ozeanbeckens: Aufwölbung, Grabenbruch, junges Meer, Ozean, Subduktion, Kollision.

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Plattengrenzen und Ozeanboden** ↗

6 Erdbeben und Tsunamis

BP 3.5.2.1 (2)

Jedes Jahr registrieren die Messnetze der Erde über hunderttausend Erdbeben, von denen die meisten niemand spürt. Etwa fünfzehn erreichen im Mittel eine Magnitude von 7 oder mehr. Was dabei in der Erde geschieht, lässt sich gut erklären; wann und wo genau das nächste starke Beben kommt, dagegen nicht.

6.1 Wie ein Erdbeben entsteht

An Plattengrenzen und an Verwerfungen im Inneren der Platten bewegen sich Gesteinsblöcke gegeneinander. Weil die Bruchflächen rau sind, verhaken sich die Blöcke. Die Bewegung geht in der Tiefe weiter, das Gestein verformt sich elastisch, und Spannung baut sich auf, oft über Jahrzehnte bis Jahrhunderte. Übersteigt die Spannung die Festigkeit des Gesteins, reißt es ruckartig, die Blöcke schnellen in eine neue Lage, und die gespeicherte Energie wird in Sekunden als Wärme und als **seismische Wellen** frei (**Theorie des elastischen Rückpralls**, entwickelt nach dem Beben von San Francisco 1906).

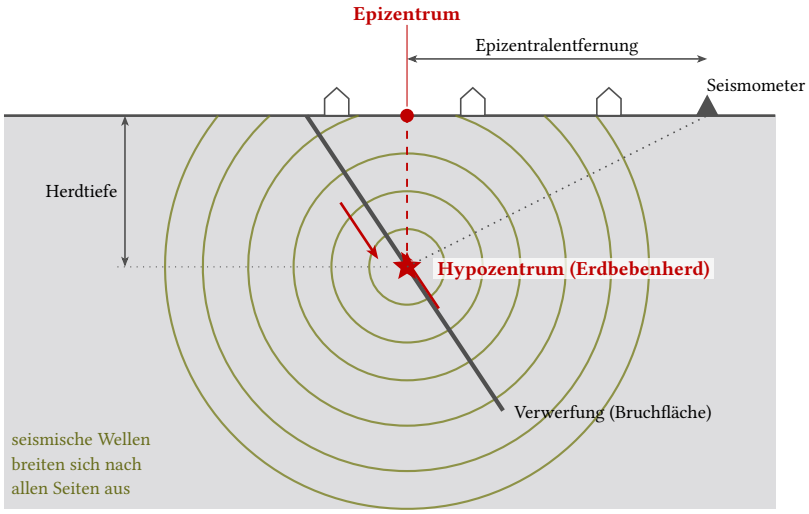


Abbildung 15: Erdbebenherd im Profil (schematisch).

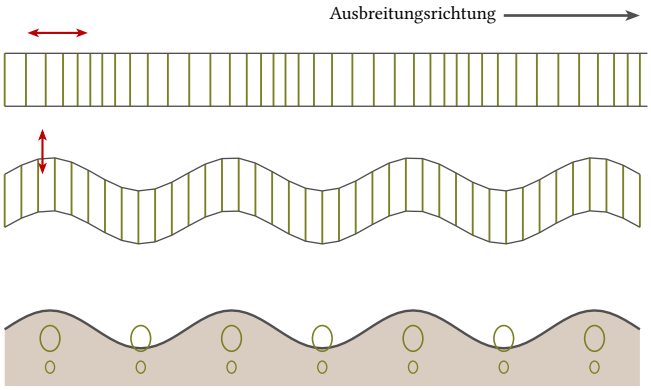
Der Ort im Erdinneren, an dem der Bruch beginnt, ist das **Hypozentrum** (Erdbebenherd). Der Punkt der Erdoberfläche senkrecht darüber ist das **Epizentrum** (Abbildung 15). Der Abstand zwischen beiden ist die **Herdtiefe**. Man unterscheidet flache Beben (bis 70 km Tiefe), mitteltiefe (70 bis 300 km) und tiefe Beben (300 bis 700 km). Tiefe Beben gibt es nur in den Wadati-Benioff-Zonen der Subduktionszonen. Flache Beben richten bei gleicher Stärke die größten Schäden an, weil die Wellen bis zur Oberfläche weniger Energie verlieren.

Auf ein Hauptbeben folgen meist **Nachbeben**, oft über Monate; manchen Hauptbeben gehen Vorbeben voraus. Nachbeben bringen bereits beschädigte Gebäude zum Einsturz und behindern die Rettung.

6.2 Seismische Wellen

Vom Herd breiten sich verschiedene Wellen aus (Abbildung 16):

- **P-Wellen** (Primärwellen) sind Längswellen: Das Gestein wird in Ausbreitungsrichtung abwechselnd gestaucht und gedehnt wie bei einer Schallwelle. Sie sind am schnellsten (in der Kruste etwa 6 km pro Sekunde, im Mantel bis über 13) und laufen durch feste, flüssige und gasförmige Stoffe.
- **S-Wellen** (Sekundärwellen) sind Querwellen: Das Gestein wird seitlich geschert. Sie sind langsamer (in der Kruste etwa 3,5 km pro Sekunde) und können sich in Flüssigkeiten nicht ausbreiten, weil Flüssigkeiten keiner Scherung widerstehen.
- **Oberflächenwellen** entstehen, wenn Raumwellen die Oberfläche erreichen, und laufen an ihr entlang. Sie sind am langsamsten, haben aber die größten Ausschläge und verursachen die meisten Schäden.



P-Welle (Primärwelle)
Längswelle: Gestein wird gestaucht und gedehnt, Teilchen schwingen in Ausbreitungsrichtung; schnellste Welle (in der Kruste etwa 6 km pro s), durchläuft Festes und Flüssiges

S-Welle (Sekundärwelle)
Querwelle: Gestein wird geschert, Teilchen schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung; langsamer (etwa 3,5 km pro s), kann Flüssigkeiten nicht durchlaufen

Oberflächenwellen
laufen an der Erdoberfläche entlang (Rayleigh-Wellen: rollende Bewegung, Love-Wellen: seitliches Rütteln); am langsamsten, aber größte Ausschläge und größte Schäden

Abbildung 16: Seismische Wellen und die Bewegung des Gesteins (schematisch, stark überhöht).

Ein **Seismometer** zeichnet die Bodenbewegung auf, das Ergebnis ist ein **Seismogramm** (Abbildung 17). Weil die P-Wellen schneller sind als die S-Wellen, kommen sie zuerst an; der Zeitabstand Δt zwischen beiden wächst mit der Entfernung vom Herd.

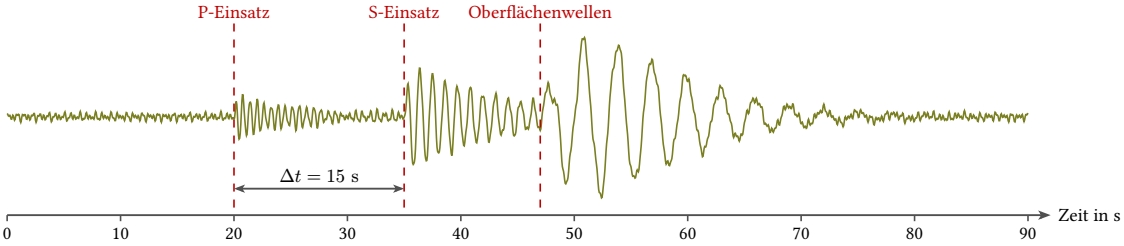


Abbildung 17: Seismogramm einer Station (Modell): Die P-Wellen kommen zuerst an, 15 Sekunden später die S-Wellen, danach die Oberflächenwellen mit den größten Ausschlägen.

Beispiel 4

Entfernung aus dem Seismogramm. Mit den Modellgeschwindigkeiten $v_P = 6\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $v_S = 3{,}5\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$ brauchen die Wellen für die Entfernung d die Zeiten $t_P = \frac{d}{v_P}$ und $t_S = \frac{d}{v_S}$. Ihr Abstand ist

$$\Delta t = \frac{d}{3{,}5\ \frac{\text{km}}{\text{s}}} - \frac{d}{6\ \frac{\text{km}}{\text{s}}} = d \cdot \frac{6 - 3{,}5}{3{,}5 \cdot 6}\ \frac{\text{s}}{\text{km}} = d \cdot 0{,}119\ \frac{\text{s}}{\text{km}},$$

also $d \approx 8{,}4\ \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \Delta t$. Für $\Delta t = 15$ s (Abbildung 17) ist $d \approx 126$ km.

Eine Station kennt so nur die Entfernung, nicht die Richtung: Das Epizentrum liegt irgendwo auf einem Kreis um die Station. Mit drei Stationen schneiden sich drei Kreise in einem Punkt, dem Epizentrum (Abbildung 18). Heute werten Rechner die Daten Hunderter Stationen in Sekunden aus.

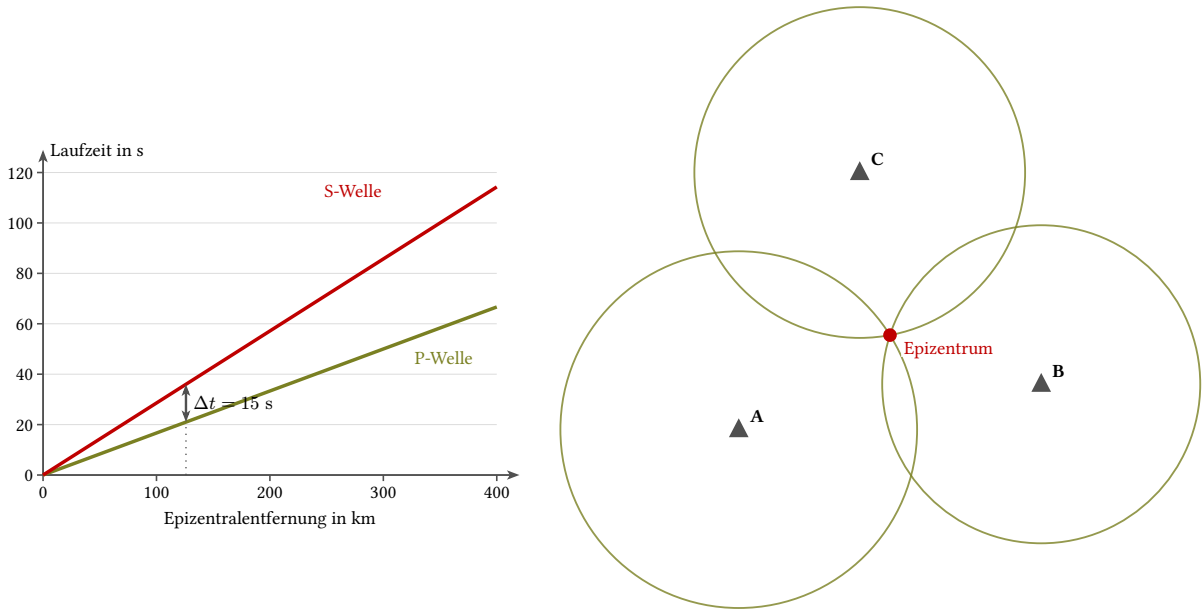


Abbildung 18: Links: Laufzeitkurven der P- und S-Wellen (Modellgeschwindigkeiten 6 und 3,5 km pro Sekunde). Rechts: Ortung des Epizentrums mit drei Stationen.

6.3 Seismische Wellen durchleuchten die Erde

Seismische Wellen werden an Grenzflächen gebrochen und reflektiert, ähnlich wie Licht an einer Glasscheibe. 1914 bemerkte Beno Gutenberg, dass auf der dem Beben gegenüberliegenden Erdseite zwischen etwa 103° und 142° Entfernung keine direkten P-Wellen ankommen: Sie werden an einer Grenzfläche in 2900 km Tiefe so stark gebrochen, dass ein **Schattenraum** entsteht (Abbildung 19). S-Wellen kommen jenseits von 103° überhaupt nicht an. Da S-Wellen keine Flüssigkeiten durchlaufen, muss der äußere Kern flüssig sein. Inge Lehmann entdeckte 1936 schwache P-Wellen im Schattenraum und schloss daraus auf einen festen inneren Kern.

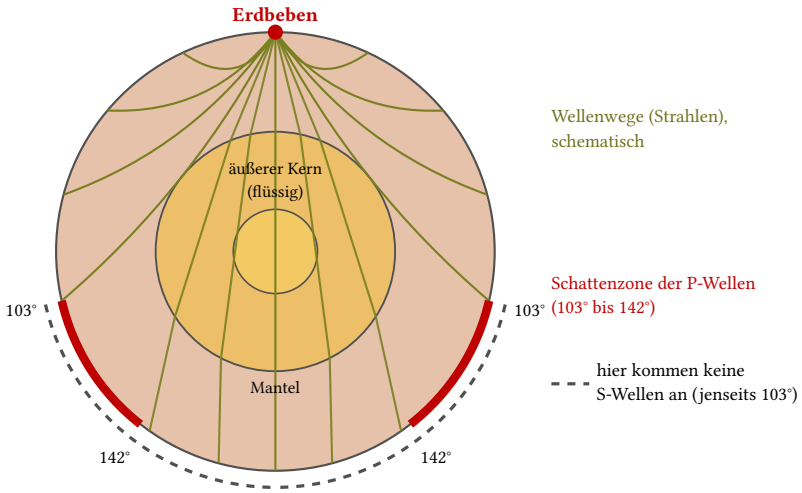


Abbildung 19: Schattenzonen der Erdbebenwellen: Der flüssige äußere Kern bricht die P-Wellen und hält die S-Wellen auf (schematisch).

6.4 Stärke eines Bebens: Magnitude und Intensität

Die **Magnitude** misst die Energie, die am Herd frei wird. Charles Richter führte 1935 die erste Magnitudenskala ein; heute verwendet man meist die **Momentmagnitude** M_w, die aus der Größe der Bruchfläche und dem Versatz berechnet wird. Die Skala ist logarithmisch und nach oben offen: Eine Stufe mehr bedeutet etwa den zehnfachen Ausschlag im Seismogramm und etwa 32-mal so viel Energie, zwei Stufen also rund tausendmal so viel. Das stärkste je gemessene Beben erreichte in Chile 1960 die Magnitude 9,5.

Die **Intensität** beschreibt dagegen die Wirkung an einem bestimmten Ort: Was spüren die Menschen, was geschieht mit Gebäuden und Landschaft? In Europa gilt die zwölfstufige Europäische Makroseismische Skala (EMS-98), von I (nicht

fühlbar) bis XII (vollständig verwüstend). Ein Beben hat also **eine** Magnitude, aber an jedem Ort eine andere Intensität. Sie hängt von der Magnitude, der Entfernung zum Herd, der Herdtiefe, dem Untergrund (Lockersedimente schaukeln die Wellen auf, in Mexiko-Stadt 1985 zum Beispiel ein alter Seeboden) und von der Bauweise ab.

Magnitude	Anzahl pro Jahr (etwa)	typische Wirkung nahe dem Epizentrum
unter 2	Millionen	nur von Messgeräten erfasst
3 bis 4	über 100 000	deutlich spürbar, kaum Schäden
5 bis 6	über 1000	Schäden an schlecht gebauten Häusern
6 bis 7	über 100	schwere Schäden in einem Umkreis von Dutzenden km
7 bis 8	etwa 15	verheerende Schäden über große Gebiete
8 und mehr	etwa 1	Zerstörung in weitem Umkreis, oft Tsunamis

Tabelle 3: Magnitude, Häufigkeit und Wirkung von Erdbeben (Größenordnungen nach USGS, die Wirkung hängt stark von Herdtiefe, Untergrund und Bauweise ab).

6.5 Wo die Erde bebt

Die allermeisten Beben liegen an den Plattengrenzen, die stärksten an den Subduktionszonen rund um den Pazifik und an den Kollisionszonen vom Mittelmeer über die Türkei und Iran bis zum Himalaya. Es gibt aber auch Beben im Inneren der Platten, wo alte Schwächezonen durch die Kräfte der Plattenbewegung reaktiviert werden.

Baden-Württemberg gehört zu den erdbebenreichsten Gebieten Deutschlands. Im **Oberrheingraben** und am **Zollerngraben** auf der Schwäbischen Alb entlädt sich Spannung aus der Kollision Afrikas mit Europa. 1356 zerstörte ein Beben mit einer geschätzten Magnitude von etwa 6,6 die Stadt Basel; es war das stärkste historisch belegte Beben nördlich der Alpen. Am 3. September 1978 erreichte ein Beben bei Albstadt die Magnitude 5,7 und beschädigte Tausende Gebäude. In der Normenkarte für erdbebensicheres Bauen gehört die Region Albstadt deshalb zur höchsten deutschen Erdbebenzone.

Eine echte **Vorhersage** (Ort, Zeit und Stärke) ist bis heute nicht möglich. Man kann aber angeben, wie wahrscheinlich ein Beben einer bestimmten Stärke in einem Gebiet in den nächsten Jahrzehnten ist (Gefährdungskarten). Zudem gibt es **Frühwarnsysteme**: Sie erkennen die schnellen P-Wellen und senden ein Funksignal, das Orte in einiger Entfernung einige Sekunden vor den zerstörerischen S- und Oberflächenwellen erreicht. Das reicht, um Züge zu bremsen, Gasleitungen zu schließen und sich in Schutz zu bringen (Japan, Mexiko).

6.6 Tsunamis

Ein **Tsunami** (japanisch „Hafenwelle“) ist eine Folge von Meereswellen, die eine große Wassermasse plötzlich verschiebt. Meist ist die Ursache ein Seebeben an einer Subduktionszone: Die obere Platte, die sich über Jahrhunderte verbogen hat, schnellt zurück und hebt den Meeresboden auf Hunderten Kilometern Länge um einige Meter an. Die ganze Wassersäule darüber wird mit angehoben und fließt als Welle nach allen Seiten ab (Abbildung 20). Seltener lösen Hangrutschungen, Vulkanausbrüche oder Meteoriteneinschläge Tsunamis aus.

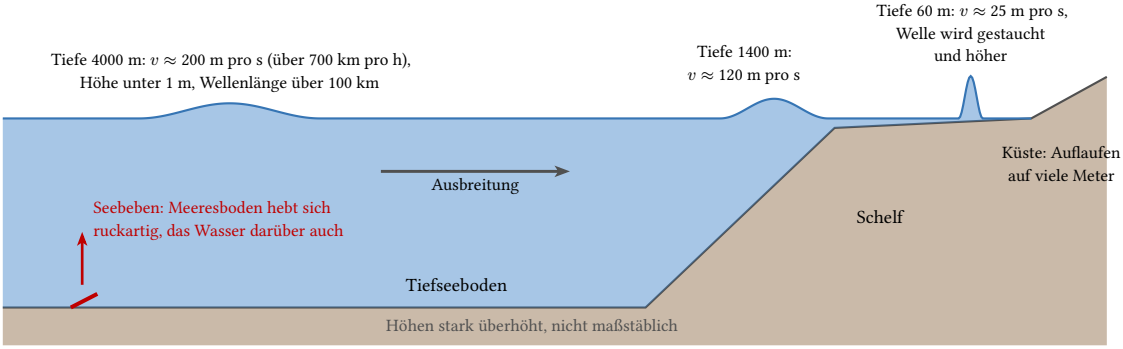


Abbildung 20: Ein Tsunami läuft über den tiefen Ozean schnell und flach, an der Küste wird er langsamer und höher. Wellen stark überhöht.

Ein Tsunami unterscheidet sich grundlegend von einer Windwelle: Er bewegt das Wasser bis zum Meeresboden, seine Wellenlänge beträgt über 100 km und seine Geschwindigkeit hängt nur von der Wassertiefe h ab:

$$v = \sqrt{g \cdot h} \quad \text{mit} \quad g = 9{,}81 \ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Über dem 4000 m tiefen Ozean sind das $\sqrt{9{,}81 \cdot 4000}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 198\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$, also über 700 km pro Stunde, so schnell wie ein Verkehrsflugzeug. Auf hoher See ist die Welle aber oft weniger als einen Meter hoch und bleibt von Schiffen unbemerkt. Erreicht sie flaches Wasser, wird sie langsamer; die nachfolgenden Wasser holen auf, die Welle wird gestaucht und türmt sich auf viele Meter Höhe auf. An Land kann sie kilometerweit vordringen, und weil die Wellen in Abständen von 10 bis 60 Minuten folgen, ist die erste Welle oft nicht die höchste. Kommt zuerst das Wellental an, zieht sich das Meer ungewöhnlich weit zurück, ein Warnzeichen, das viele Menschen nicht kennen.

Beispiel 5

Wie viel Zeit bleibt? Ein Seebeben vor Sumatra löst einen Tsunami aus. Die Küste Sri Lankas ist etwa 1600 km entfernt, der Indische Ozean dazwischen etwa 4000 m tief. Laufzeit: $t = \frac{s}{v} = \frac{1\,600\,000\ \text{m}}{198\ \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 8100\ \text{s} \approx 2{,}2\ \text{h}$. Mit einem Warnsystem hätte man die Küste in dieser Zeit räumen können. 2004 gab es im Indischen Ozean noch keines.

Der Tsunami vom 26. Dezember 2004 nach einem Beben der Magnitude 9,1 vor Sumatra tötete in 14 Ländern rund um den Indischen Ozean etwa 230 000 Menschen. Danach wurde ein Warnsystem für den Indischen Ozean aufgebaut, mit Seismometern, Drucksensoren am Meeresboden und Bojen, die die Daten über Satelliten weitergeben. Im Pazifik gibt es ein solches System schon seit 1949. Doch auch die beste Technik nützt nur, wenn die Warnung die Menschen in den letzten Fischerdörfern erreicht, wenn sie wissen, was zu tun ist, und wenn es erhöhte Fluchtorte gibt (Kapitel 9).

Fachbegriffe

Epizentrum: Punkt der Erdoberfläche senkrecht über dem Erdbebenherd.
Hypozentrum: Erdbebenherd; Ort im Erdinneren, an dem der Bruch beginnt.
seismische Wellen: elastische Wellen, die sich vom Herd ausbreiten: P-Wellen (Längswellen, am schnellsten), S-Wellen (Querwellen, nicht durch Flüssigkeiten) und Oberflächenwellen (größte Schäden).
Tsunami: durch plötzliche Verschiebung großer Wassermassen ausgelöste Meereswelle mit sehr großer Wellenlänge, die sich an flachen Küsten auftürmt.

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **Erdbeben orten** ↗

7 Lagerstätten

BP 3.5.2.1 (6)

Ein Smartphone enthält Dutzende chemische Elemente: Kupfer für die Leitungen, Gold für die Kontakte, Lithium und Kobalt für den Akku, Zinn für die Lötstellen, Seltene Erden für Lautsprecher und Vibrationsmotor. Jedes davon wurde irgendwo auf der Erde abgebaut, wo die Natur es zuvor in ungewöhnlich hoher Konzentration angereichert hatte. Wie entstehen solche Anreicherungen?

7.1 Lagerstätte, Vorkommen, Reserve

In der Erdkruste sind die meisten Rohstoffe fein verteilt. Ein Kilogramm durchschnittliches Krustengestein enthält etwa 0,05 g Kupfer und nur wenige millionstel Gramm Gold. Abbauen lohnt sich nur dort, wo natürliche Prozesse den Stoff um ein Vielfaches angereichert haben. Eine solche Anreicherung heißt **Vorkommen**; eine **Lagerstätte** ist ein Vorkommen, das sich mit heutiger Technik wirtschaftlich abbauen lässt. Ob ein Vorkommen eine Lagerstätte ist, hängt also auch vom Preis und von der Technik ab: Steigt der Kupferpreis, werden ärmere Erze zu Lagerstätten. Die bekannten, wirtschaftlich abbaubaren Mengen heißen **Reserven**.

Lagerstätten entstehen durch **endogene** Prozesse (Magmatismus, heiße Lösungen, Metamorphose), durch **exogene** Prozesse (Verwitterung, Transport, Ablagerung, Verdunstung, Ablagerung von Lebewesen) oder durch beide nacheinander. Die Plattentektonik bestimmt, wo welche Prozesse ablaufen.

7.2 Primäre und sekundäre Erzlagerstätten

Erze sind Minerale oder Gesteine, aus denen sich Metalle gewinnen lassen. Eine **primäre Erzlagerstätte** ist unmittelbar aus Magma oder aus heißen Lösungen im Zusammenhang mit Magma entstanden, also endogen (Abbildung 21):

- **Liquidmagmatische Lagerstätten:** Beim Abkühlen einer Schmelze kristallisieren schwere Erzminerale wie Chromit oder Magnetit früh aus und sinken ab; am Boden des Magmenkörpers reichern sie sich an. Beispiel: das Bushveld in Südafrika mit den größten Platin- und Chromvorräten der Erde.
- **Hydrothermale Lagerstätten:** Beim Erstarren eines Plutons bleiben heiße, wässrige Restlösungen übrig, die Metalle gelöst enthalten. Sie dringen in Spalten des umgebenden Gesteins ein, kühlen ab, und die Erze kristallisieren als **Erzgänge** aus. Im Schwarzwald wurden so Silber, Blei und Zink abgebaut, im Mittelalter mit großem Gewinn (Silberbergbau am Schauinsland); in der Grube Clara bei Oberwolfach werden bis heute Flussspat und Schwerspat gefördert.
- **Porphyrische Kupferlagerstätten** bilden sich über Subduktionszonen, wo die gasreichen Magmen ihre Metalle in großen Gesteinskörpern verteilen. Chile ist deshalb der größte Kupferproduzent der Erde (knapp ein Viertel der Weltförderung).
- An **Schwarzen Rauchern** der mittelozeanischen Rücken tritt bis über 350 °C heißes, metallreiches Wasser aus; beim Kontakt mit dem kalten Meerwasser fallen Sulfide von Kupfer, Zink und Eisen aus und bilden Massivsulfid-Lagerstätten am Meeresboden.

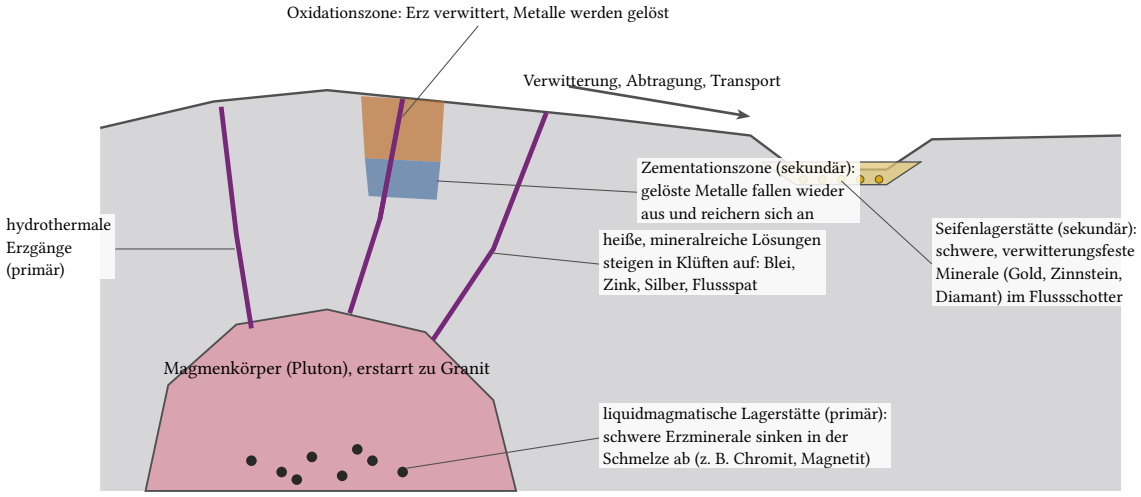


Abbildung 21: Primäre und sekundäre Erzlagerstätten (schematisches Profil).

Eine **sekundäre Erzlagerstätte** entsteht, wenn exogene Prozesse ein vorhandenes Erz umlagern und dabei weiter anreichern:

- **Zementationszone:** An der Oberfläche verwittert ein Erzgang, Sickerwasser löst die Metalle in der **Oxidationszone** und transportiert sie nach unten. Am Grundwasserspiegel fallen sie wieder aus und bilden eine besonders reiche Zone.
- **Seifenlagerstätten:** Bei der Verwitterung werden schwere und widerstandsfähige Minerale wie Gold, Zinnstein oder Diamant freigelegt und von Flüssen transportiert. Wo die Strömung nachlässt, sinken sie wegen ihrer hohen Dichte zuerst ab und reichern sich im Schotter an. Goldwäscher am Rhein haben solche Seifen bis ins 19. Jahrhundert ausgebeutet.
- **Verwitterungslagerstätten:** In den Tropen löst intensive chemische Verwitterung über Millionen Jahre fast alle Bestandteile eines Gesteins heraus; zurück bleiben schwer lösliche Eisen- und Aluminiumverbindungen. So entsteht **Bauxit**, das Erz des Aluminiums (Guinea, Australien).

7.3 Kohle-, Erdöl- und Erdgaslagerstätten

Kohle, Erdöl und Erdgas sind **fossile Energieträger**: Sie bestehen aus den Resten von Lebewesen, deren Energie aus der Sonnenstrahlung vor Millionen Jahren stammt.

Kohlelagerstätten entstehen aus Pflanzen. In großen Sumpfwäldern fallen Bäume in sauerstoffarmes Wasser und verrotten nicht vollständig; es bildet sich **Torf**. Senkt sich das Gebiet, wird der Torf von Sand und Ton überdeckt, gerät tiefer, unter höheren Druck und höhere Temperatur. Wasser und flüchtige Bestandteile werden ausgepresst, der Kohlenstoffanteil steigt: Aus Torf wird über Millionen Jahre **Braunkohle**, dann **Steinkohle** und schließlich **Anthrazit** (**Inkohlung**, Tabelle 4). Wiederholt sich der Wechsel aus Sumpfwald und Überdeckung, entstehen viele Kohleschichten übereinander, die **Flöze**. Die Steinkohle des Ruhrgebiets stammt aus dem Karbon (vor etwa 360 bis 300 Millionen Jahren), als dort tropische Sumpfwälder am Rand eines Gebirges wuchsen; die Braunkohle des Rheinischen Reviers und der Lausitz ist mit etwa 30 bis 5 Millionen Jahren viel jünger.

Stufe	Kohlenstoffanteil	Heizwert	Beispiel
Torf	etwa 55 bis 60 %	gering	Moore im Schwarzwald und in Oberschwaben
Braunkohle	etwa 60 bis 75 %	mittel	Rheinisches Revier, Lausitz (Tagebau)
Steinkohle	etwa 75 bis 90 %	hoch	Ruhrgebiet, Saarland (deutscher Abbau seit 2018 beendet)
Anthrazit	über 90 %	sehr hoch	Ibbenbüren, Wales

Tabelle 4: Die Inkohlungsreihe (Kohlenstoffanteil auf wasser- und aschefreie Kohle bezogen, gerundet).

Erdöl- und Erdgaslagerstätten entstehen meist aus Meeresplankton. In abgeschlossenen, sauerstoffarmen Meeresbecken sinkt abgestorbenes Plankton zu Boden und wird zu Faulschlamm. Daraus entsteht ein dunkles, feinkörniges **Muttergestein**, das organische Substanz (Kerogen) enthält. Wird es durch weitere Ablagerungen in die Tiefe versenkt, steigt die Temperatur im Mittel um etwa 30 °C je Kilometer. Zwischen etwa 60 und 120 °C spaltet sich das Kerogen zu Erdöl, bei höheren Temperaturen zu Erdgas (Abbildung 22). Liegt das Muttergestein zu tief oder zu lange in großer Hitze, bleibt nur noch Gas übrig.

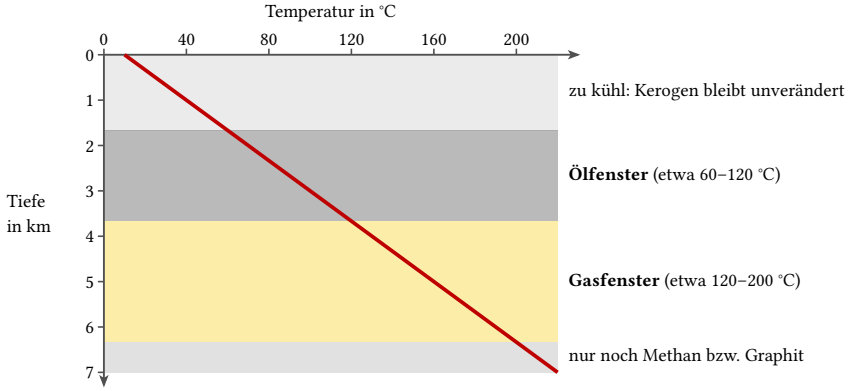


Abbildung 22: Ölfenster und Gasfenster bei einem mittleren Temperaturanstieg von 30 °C je Kilometer und 10 °C an der Oberfläche.

Öl und Gas sind leichter als das Wasser in den Poren der Gesteine und wandern deshalb nach oben (**Migration**). Eine Lagerstätte entsteht nur, wenn sie dabei in ein poröses **Speichergestein** (Sandstein, Kalkstein) gelangen, das von einer undurchlässigen **Deckschicht** (Tonstein, Salz) abgedichtet ist, und wenn die Schichten eine **Falle** bilden: eine

Aufwölbung (Antiklinale), eine Verwerfung oder die Flanke eines Salzstocks (Abbildung 23). In der Falle schichten sich die Stoffe nach ihrer Dichte: oben Gas, darunter Öl, ganz unten Wasser. Fehlt die Falle, entweicht das Öl an die Oberfläche und geht verloren. Die größten Lagerstätten liegen am Persischen Golf; in Deutschland wird Erdöl unter anderem im Oberrheingraben gefördert.

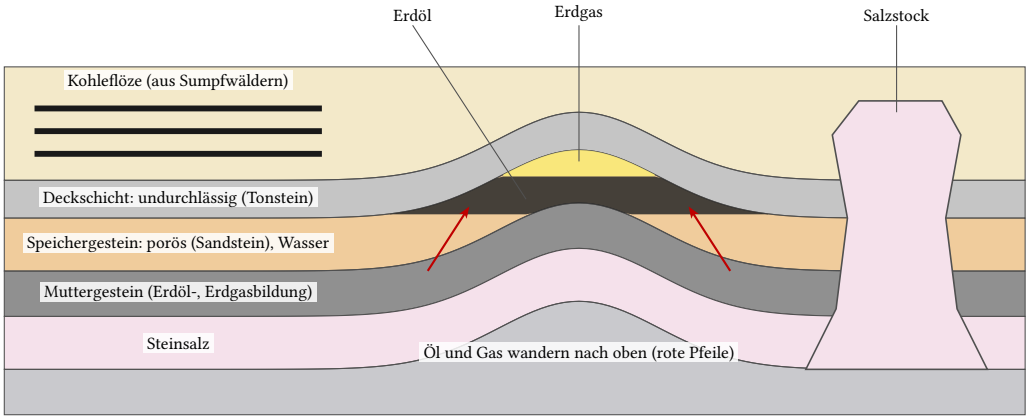


Abbildung 23: Kohle, Erdöl, Erdgas und Salz im schematischen Profil: Antiklinalfalle mit Gas über Öl, Salzstock und Kohleflöze.

7.4 Salzlagerstätten

Salzlagerstätten entstehen, wenn Meerwasser in einem flachen, vom offenen Meer teilweise abgeschnürten Becken unter trockenheißem Klima verdunstet. Die gelösten Salze fallen in einer festen Reihenfolge aus, von den am schwersten löslichen zu den leichtest löslichen: zuerst Kalk, dann Gips und Anhydrit, dann Steinsalz und zuletzt Kali- und Magnesiumsalze. Fließt immer wieder Meerwasser nach, können Salzschichten von Hunderten Metern Dicke entstehen. Heute läuft dieser Vorgang zum Beispiel in Lagunen am Persischen Golf ab.

In Baden-Württemberg liegt Steinsalz aus dem Mittleren Muschelkalk (vor etwa 240 Millionen Jahren); es wird in Heilbronn und Bad Friedrichshall abgebaut. Die mächtigen Salzlager Norddeutschlands stammen aus dem Zechsteinmeer der Permzeit (vor etwa 255 Millionen Jahren). Weil Salz leichter ist als die Gesteine darüber und sich unter Druck plastisch verformt, steigt es dort an Schwachstellen auf und bildet pilzförmige **Salzstöcke**, die sich durch Tausende Meter Gestein nach oben drücken. Ihre Flanken sind wichtige Fallen für Erdöl und Erdgas; ausgesolte Hohlräume dienen als Speicher für Erdgas und künftig für Wasserstoff.

7.5 Anthropogene Lagerstätten

Eine **anthropogene Lagerstätte** ist eine vom Menschen geschaffene Anreicherung von Rohstoffen: Gebäude, Infrastruktur, Halden, Deponien und Elektroschrott. Weltweit fielen 2022 etwa 62 Millionen Tonnen Elektroschrott an, davon wurden nur etwa 22 % nachweislich gesammelt und recycelt (Global E-waste Monitor 2024). Eine Tonne alter Handys enthält ein Vielfaches des Goldes einer Tonne gewöhnlichen Golderzes. Die Rückgewinnung aus solchen Quellen heißt **Urban Mining** („Bergbau in der Stadt“). Sie spart Energie, Fläche und Wasser, vermeidet Bergbauschäden und macht unabhängiger von Importen. Schwierig sind die vielen fein verteilten Stoffe, die aufwendige Trennung und die illegale Ausfuhr von Elektroschrott in Länder mit niedrigen Umweltstandards, wo er oft unter gefährlichen Bedingungen zerlegt wird.

Merksatz

Lagerstätten sind wirtschaftlich abbaubare Anreicherungen von Rohstoffen. **Primäre Erzlagerstätten** entstehen endogen aus Magma und heißen Lösungen, **sekundäre** durch exogene Umlagerung (Zementation, Seifen). Kohle entsteht durch Inkohlung von Sumpfwäldern, Erdöl und Erdgas aus Plankton im Muttergestein und sammeln sich in Fallen unter Deckschichten, Salz entsteht durch Verdunstung von Meerwasser. Anthropogene Lagerstätten sind vom Menschen geschaffen.

Fachbegriffe

anthropogene Lagerstätte: vom Menschen geschaffene Rohstoffanreicherung (Gebäude, Deponien, Halden, Elektroschrott), Ziel des Urban Mining.

Erdgaslagerstätte: Ansammlung von Erdgas in einer Falle; entsteht aus Muttergestein bei höheren Temperaturen als Erdöl oder aus Kohle.

Erdöllagerstätte: Ansammlung von Erdöl in porösem Speichergestein unter einer undurchlässigen Deckschicht in einer Falle; aus Plankton im Ölfenster gebildet.

Kohlelagerstätte: Abfolge von Kohleflözen, entstanden durch Inkohlung abgestorbener Sumpfwälder.

primäre Erzlagerstätte: unmittelbar aus Magma oder hydrothermalen Lösungen entstandene Erzanreicherung (endogen).

Salzlagerstätte: durch Verdunstung von Meerwasser in abgeschnürten Becken entstandene Salzschichten, teils zu Salzstöcken aufgestiegen.

sekundäre Erzlagerstätte: durch Verwitterung, Umlagerung und erneute Anreicherung eines vorhandenen Erzes entstandene Lagerstätte (exogen).

Üben: **noctua** ↗

8 Naturgefahren, Risiko und Verwundbarkeit

BP 3.5.2.1 (7) Abi 2027

Ein Erdbeben der Magnitude 7 in der menschenleeren Wüste Gobi ist ein Naturereignis. Dasselbe Beben unter einer Millionenstadt kann eine Katastrophe sein. Und zwei gleich starke Beben unter zwei Millionenstädten können ganz verschieden enden, wie Haiti und Chile 2010 zeigen. Daraus folgt der Kerngedanke dieses Kapitels: **Katastrophen sind nicht natürlich.** Natürlich ist das Ereignis; ob es zur Katastrophe wird, entscheidet die Gesellschaft.

8.1 Naturereignis, Naturgefahr, Naturkatastrophe

- Ein **Naturereignis** ist ein natürlicher Vorgang wie ein Erdbeben, ein Vulkanausbruch, ein Sturm oder ein Hochwasser, unabhängig davon, ob Menschen betroffen sind.
- Eine **Naturgefahr** (englisch **hazard**) ist ein Naturereignis, das Menschen, Sachwerte oder Umwelt schädigen kann. Man beschreibt sie durch ihre Art, ihre Stärke und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit, zum Beispiel: „Mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % tritt in den nächsten 50 Jahren in diesem Gebiet ein Beben der Intensität VIII auf." Im Englischen wird **hazard** teils auch für das konkrete Schadensrisiko verwendet; im Bildungsplan steht **Hazard** für die Gefahr.
- Eine **Naturkatastrophe** liegt vor, wenn ein Naturereignis so große Schäden anrichtet, dass die betroffene Gesellschaft sie nicht mehr aus eigener Kraft bewältigen kann und auf Hilfe von außen angewiesen ist.

Man unterscheidet **geophysikalische** Gefahren (Erdbeben, Tsunamis, Vulkanausbrüche, Massenbewegungen), **meteorologische** (Stürme, Hagel), **hydrologische** (Hochwasser, Sturmfluten) und **klimatologische** (Dürren, Hitzewellen, Waldbrände). Viele Ereignisse hängen zusammen: Ein Beben löst einen Tsunami und Hangrutschungen aus, ein Vulkanausbruch Schlammströme, ein Starkregen Muren. Der Mensch kann Gefahren auch verstärken oder auslösen, etwa durch Abholzung (Rutschungen) oder Flussbegradigung (Hochwasser).

8.2 Risiko = Gefahr × Exposition × Verwundbarkeit

Das **Risiko** ist der Schaden, mit dem in einem Raum zu rechnen ist. Es entsteht nur, wenn drei Bedingungen zusammentreffen (Abbildung 24):

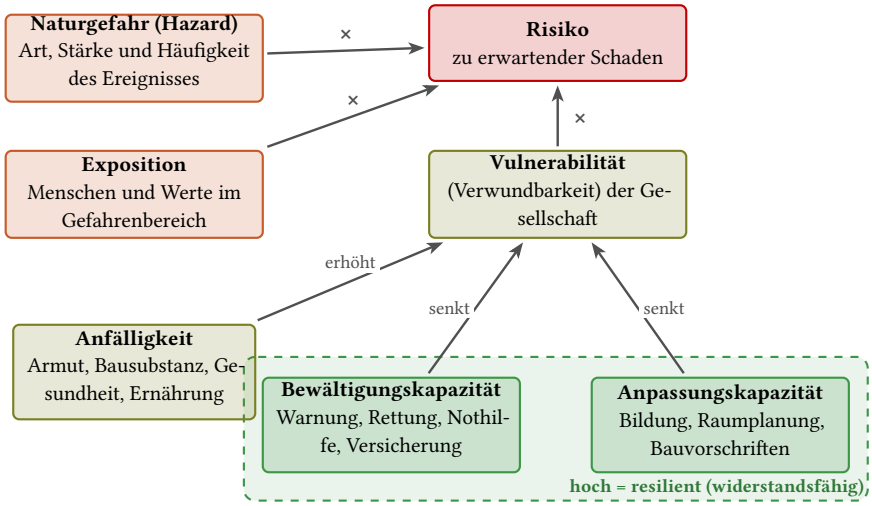


Abbildung 24: Das Risiko ergibt sich aus Naturgefahr, Exposition und Vulnerabilität. Hohe Bewältigungs- und Anpassungskapazitäten machen eine Gesellschaft resilient.

$$\text{Risiko} = \text{Naturgefahr} \times \text{Exposition} \times \text{Vulnerabilität}$$

a) eine **Naturgefahr** (Hazard), also ein mögliches Ereignis bestimmter Stärke und Häufigkeit;
b) die **Exposition**: Menschen, Gebäude, Infrastruktur und Werte befinden sich im Gefahrenbereich;
c) die **Verwundbarkeit (Vulnerabilität)**: die Anfälligkeit dieser Menschen und Werte für Schäden und ihre (fehlende) Fähigkeit, das Ereignis zu bewältigen und sich anzupassen.

Das Malzeichen ist nicht wörtlich zu verstehen, drückt aber einen wichtigen Gedanken aus: Ist einer der drei Faktoren null, gibt es kein Risiko. Ohne Menschen im Gefahrenbereich keine Katastrophe, ohne Gefahr ebenfalls nicht. Und je verwundbarer die Menschen, desto größer der Schaden bei gleicher Gefahr. Das Risiko lässt sich also an drei Stellen

senken: Die Gefahr selbst lässt sich bei Erdbeben und Vulkanen kaum beeinflussen; die Exposition durch Raumplanung (nicht in Überschwemmungsgebieten, an Steilhängen oder in der Nähe aktiver Vulkane bauen); die Verwundbarkeit durch Bauvorschriften, Warnsysteme, Bildung und Armutsbekämpfung.

8.3 Vulnerabilität und Resilienz

Die **Verwundbarkeit (Vulnerabilität)** ist der zentrale Begriff des Schwerpunktthemas. Sie beschreibt, wie stark eine Gesellschaft, eine Gruppe oder ein Raum durch ein Ereignis geschädigt wird und wie gut er sich davon erholt. Sie setzt sich aus drei Teilen zusammen (so auch im WeltRisikoIndex):

- **Anfälligkeit:** Wie leicht entsteht Schaden? Das hängt ab von Armut, Ernährung und Gesundheit, Wohnqualität und Bausubstanz, Abhängigkeit von einem einzigen Einkommen (etwa der eigenen Ernte), Alter und Behinderung.
- **Bewältigungskapazität:** Kann die Gesellschaft das Ereignis unmittelbar bewältigen? Gibt es Frühwarnung, Katastrophenschutz, Rettungsdienste, Krankenhäuser, Notvorräte, Versicherungen, eine funktionierende Verwaltung?
- **Anpassungskapazität:** Kann die Gesellschaft langfristig lernen und sich anpassen? Gibt es Bildung, Forschung, Raumplanung, durchgesetzte Bauvorschriften, Investitionen in Vorsorge, politische Beteiligung auch der Ärmsten?

Das Gegenstück ist die **Widerstandsfähigkeit (Resilienz)**: die Fähigkeit einer Gesellschaft oder eines Raums, ein Ereignis abzufedern, die wichtigen Funktionen aufrechtzuerhalten, sich schnell zu erholen und daraus zu lernen, sodass sie beim nächsten Mal weniger verwundbar ist. Eine resiliente Stadt verhindert nicht jedes Beben, aber ihre Krankenhäuser bleiben stehen, die Wasserversorgung läuft nach Tagen wieder, und der Wiederaufbau macht sie sicherer als zuvor („build back better“).

Typischer Fehler

Falsch: „Arme Länder sind stärker gefährdet, weil es dort mehr Erdbeben gibt.“

Richtig: Gefährdung (Hazard) und Verwundbarkeit sind verschiedene Dinge. Chile und Japan sind stark gefährdet, aber wenig verwundbar; Haiti ist gefährdet **und** sehr verwundbar.

Wer Risiken erklärt, muss die drei Faktoren auseinanderhalten und jeweils am Material belegen. Im Abitur kostet die Verwechslung von Gefährdung, Exposition und Verwundbarkeit regelmäßig Punkte.

Verwundbarkeit ist nicht gleichmäßig verteilt, weder zwischen Ländern noch innerhalb eines Landes. Besonders verwundbar sind Menschen, die

- in gefährdeten Lagen wohnen, weil sicheres Bauland zu teuer ist: in Marginalsiedlungen an Steilhängen, in Flussauen, am Fuß von Vulkanen;
- in Häusern aus ungeeignetem Material leben oder in Häusern, deren Bauvorschriften nicht eingehalten wurden;
- arm sind, keine Rücklagen und keine Versicherung haben und nach einem Ereignis ihre Lebensgrundlage verlieren;
- alt, krank, behindert oder sehr jung sind, die Landessprache nicht sprechen oder keinen Zugang zu Warnungen haben;
- politisch an den Rand gedrängt sind und deren Interessen bei Planung, Warnung und Wiederaufbau übersehen werden.

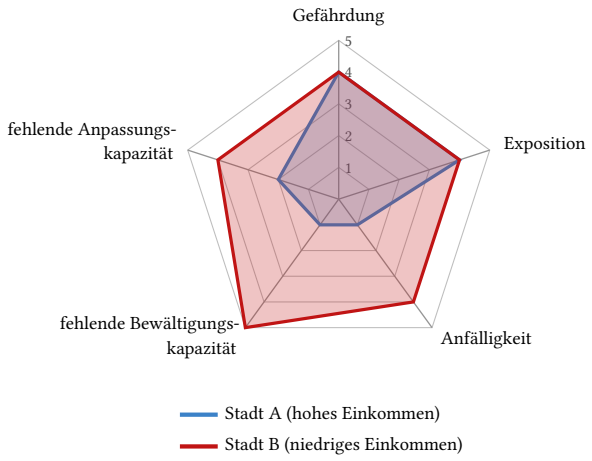


Abbildung 25: Analysespinne zum Vergleich zweier Küstenstädte an derselben Subduktionszone (Modellwerte, 1 = gering, 5 = sehr hoch). Gleiche Gefährdung und Exposition, aber sehr unterschiedliche Verwundbarkeit.

Eine **Analysespinne** (Netzdiagramm) wie in Abbildung 25 macht solche Unterschiede sichtbar und wird im Abitur als eigene Darstellung erwartet. Wichtig ist, die Achsen sauber zu benennen, alle Achsen einheitlich zu richten und die

Richtung anzugeben. Hier liegt außen jeweils der höhere Wert, bei Risikogrößen also das Ungünstige; bei Entwicklungsindikatoren (GL7) rechnet man dagegen meist so um, dass außen der günstige Wert liegt.

8.4 Wie verwundbar ist ein Land? Indikatoren

Um Verwundbarkeit zu vergleichen, verwendet man Indikatoren. Der **Human Development Index** (HDI) der Vereinten Nationen fasst Lebenserwartung, Bildung und Einkommen zusammen (GL7); er hängt eng mit Anfälligkeit und Bewältigungskapazität zusammen. Der **WeltRisikoIndex**, den das Bündnis Entwicklung Hilft und die Ruhr-Universität Bochum jährlich für 193 Länder berechnen, verknüpft die Exposition gegenüber Erdbeben, Tsunamis, Wirbelstürmen, Überschwemmungen, Dürren und Meeresspiegelanstieg mit der Vulnerabilität aus rund hundert Indikatoren. 2025 hatten die Philippinen das höchste Risiko (Index 46,56), gefolgt von Indien und Indonesien; Deutschland lag mit 4,28 auf Platz 95 im Mittelfeld (WeltRisikoBericht 2025). Ein hoher Indexwert kann allerdings verschiedene Ursachen haben: Chile oder Japan haben eine sehr hohe Exposition bei geringer Vulnerabilität, viele Länder Afrikas eine eher geringe Exposition bei sehr hoher Vulnerabilität.

Indikatoren für ganze Staaten verdecken die Unterschiede im Inneren: Die Verwundbarkeit eines Villenviertels und einer Marginalsiedlung in derselben Stadt kann sich stärker unterscheiden als die zweier Länder. Und Indizes zeigen nur, was messbar ist: Korruption, die Durchsetzung von Bauvorschriften oder das Vertrauen in Warnungen gehen schwer in Zahlen ein, entscheiden aber oft über Leben und Tod.

8.5 Das Pressure-and-Release-Modell

Warum sind manche Gruppen so verwundbar? Das **Pressure-and-Release-Modell** (Blaikie, Wisner und andere, 1994) verfolgt die Ursachen zurück (Abbildung 26). Unsichere Lebensbedingungen (Hütte am Steilhang) haben Ursachen (Landflucht, Bodenpreise, keine Ausbildung), die ihrerseits auf tiefere Grundursachen zurückgehen (Armut, ungleiche Verteilung von Land und Macht, schwache oder korrupte Regierungsführung). Die Verwundbarkeit baut sich wie Druck in einem Kessel über Jahrzehnte auf („pressure“); die Naturgefahr ist nur der Auslöser, der die Katastrophe freisetzt. Umgekehrt heißt das: Wer das Risiko dauerhaft senken will („release“), muss nicht nur Häuser verstärken, sondern die Ursachen der Verwundbarkeit angehen.

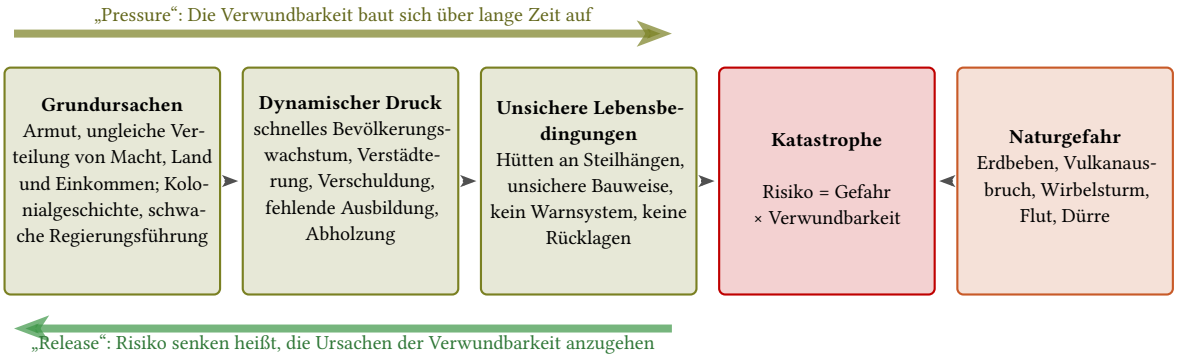


Abbildung 26: Pressure-and-Release-Modell (vereinfacht nach Blaikie u. a.): Die Katastrophe entsteht dort, wo eine aufgebaute Verwundbarkeit auf eine Naturgefahr trifft.

8.6 Risikomanagement

Der Umgang mit Naturgefahren wird oft als Kreislauf dargestellt (Abbildung 27). Vor dem Ereignis stehen **Vorbeugung** (Prävention: erdbebensicheres Bauen, Gefahrenkarten, Raumplanung, Schutzbauten) und **Vorbereitung** (Frühwarnsysteme, Evakuierungspläne, Übungen, Notvorräte). Nach dem Ereignis folgen **Bewältigung** (Rettung, medizinische Versorgung, Notunterkünfte, Trinkwasser) und **Wiederaufbau**, der im besten Fall besser baut als vorher und aus dem Ereignis lernt. Man unterscheidet **bauliche (technische) Maßnahmen** wie Schutzmauern oder Erdbebendämpfer von **nicht-baulichen Maßnahmen** wie Bildung, Warnung, Versicherung und Raumplanung. Bauliche Maßnahmen sind teuer und können ein trügerisches Sicherheitsgefühl erzeugen; nicht-bauliche sind oft billiger und wirksamer, erfordern aber Vertrauen und einen langen Atem.

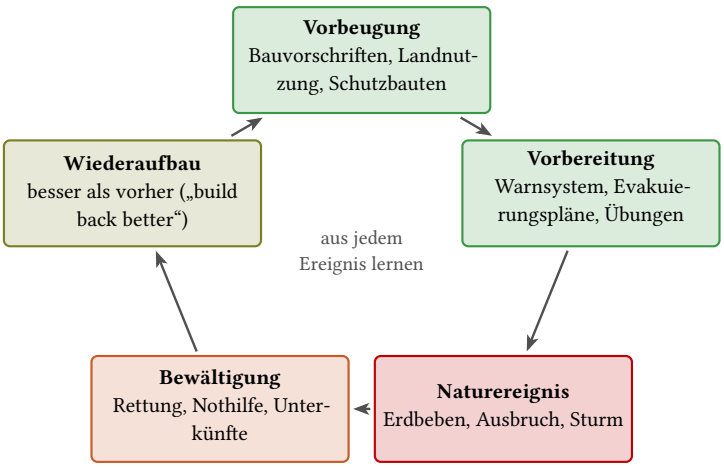


Abbildung 27: Kreislauf des Katastrophenmanagements.

International bündelt das **Sendai-Rahmenwerk für Katastrophenvorsorge** der Vereinten Nationen (2015–2030) diese Ziele: weniger Todesopfer, weniger Betroffene und geringere Schäden durch bessere Vorsorge, Frühwarnsysteme für alle und einen Wiederaufbau, der die Verwundbarkeit senkt.

8.7 Warum leben Menschen in Gefahrenräumen?

Am Fuß des Vesuvs leben rund 600 000 Menschen in der sogenannten Roten Zone. Warum ziehen sie nicht weg? Gefahrenräume bieten oft **Gunstfaktoren**: Vulkanische Böden sind fruchtbar, Küsten und Flussebenen sind verkehrsgünstig und ernähren viele Menschen, Vulkane liefern Erdwärme und locken Touristen, Bergbaugebiete bieten Arbeit. Dazu kommen Gewohnheit, Heimatverbundenheit und eine **Risikowahrnehmung**, die seltene Ereignisse unterschätzt: Wer seit Generationen keinen Ausbruch erlebt hat, hält ihn für unwahrscheinlich. Vor allem aber haben viele Menschen keine Wahl, weil ihnen das Geld für einen sicheren Wohnort fehlt. Auch das ist Verwundbarkeit.

Merksatz

Risiko entsteht, wenn eine **Naturgefahr** (Hazard) auf **exponierte** Menschen und Werte mit hoher **Verwundbarkeit** (Vulnerabilität) trifft. Die Vulnerabilität setzt sich aus Anfälligkeit, Bewältigungs- und Anpassungskapazität zusammen und hängt eng mit dem Entwicklungsstand, aber auch mit Regierungsführung, sozialer Lage und Bildung zusammen. **Resilienz** (Widerstandsfähigkeit) ist die Fähigkeit, ein Ereignis abzufedern, sich zu erholen und daraus zu lernen.

Fachbegriffe

Hazard: Naturgefahr; mögliches schadenbringendes Naturereignis, beschrieben durch Art, Stärke und Eintrittswahrscheinlichkeit.
Risiko: zu erwartender Schaden in einem Raum; ergibt sich aus Naturgefahr, Exposition und Verwundbarkeit.
Verwundbarkeit (Vulnerabilität): Anfälligkeit einer Gesellschaft oder Gruppe für Schäden und ihre fehlende Fähigkeit, ein Ereignis zu bewältigen und sich anzupassen.
Widerstandsfähigkeit (Resilienz): Fähigkeit, ein Ereignis abzufedern, wichtige Funktionen zu erhalten, sich rasch zu erholen und daraus zu lernen.

Üben: **noctua** ↗

9 Verwundbarkeit im Vergleich: Fallbeispiele

BP 3.5.2.1 (7), 3.5.2.1 (2) Abi 2027

Die folgenden Fallbeispiele stammen aus Ländern sehr unterschiedlichen Entwicklungsstands. Sie zeigen, wie dieselbe Art von Naturgefahr je nach Verwundbarkeit ganz verschieden ausgeht, und sie liefern das Material, um die Begriffe aus Kapitel 8 anzuwenden. Der Facherlass verlangt, dass man den Transfer auf vergleichbare Räume leisten kann; es kommt also auf die Analyse an, nicht auf das Auswendiglernen von Zahlen.

Ereignis	Magnitude	Tote (etwa)	HDI 2023	HDI-Rang
Haiti, 12. Januar 2010	7,0	220 000 bis 316 000 laut Regierung; unabhängige Schätzungen niedriger	0,554	166
Chile, 27. Februar 2010	8,8	gut 500	0,878	45
Japan, 11. März 2011	9,0	15 900 und 2500 Vermisste	0,925	23
Türkei, 6. Februar 2023	7,8 und 7,5	53 500	0,853	51
Syrien, 6. Februar 2023	7,8 und 7,5	6000 bis 8500	0,564	162

Tabelle 5: Vergleich starker Erdbeben. Daten: USGS, Polizeibehörde Japans (Stand 2026), türkisches Innenministerium; HDI aus UNDP 2025 (Werte für 2023, also nicht zum Zeitpunkt der Beben, aber in der Größenordnung vergleichbar).

9.1 Haiti und Chile 2010: gleiche Gefahr, verschiedene Verwundbarkeit

Haiti liegt an einer Transformstörung zwischen der Karibischen und der Nordamerikanischen Platte. Am 12. Januar 2010 riss sie nahe der Hauptstadt Port-au-Prince auf; das Beben der Magnitude 7,0 lag nur etwa 13 km tief und etwa 25 km vom Stadtzentrum entfernt. Die Regierung gab später 220 000 bis 316 000 Tote an; unabhängige Schätzungen liegen niedriger, doch in jedem Fall war es eine der tödlichsten Katastrophen der letzten Jahrzehnte. 1,5 Millionen Menschen wurden obdachlos, die Schäden entsprachen mehr als der gesamten Wirtschaftsleistung eines Jahres.

Die Ursachen lagen weniger im Beben als in der Gesellschaft:

- **Anfälligkeit:** Haiti war schon vor dem Beben das ärmste Land Amerikas. In Port-au-Prince lebten Hunderttausende in dicht gedrängten, ungeplanten Vierteln an Hängen. Viele Häuser waren aus Betonblöcken ohne Stahlbewehrung gebaut, mit schweren Betondecken, die beim Einsturz die Bewohner erschlugen.
- **Bewältigungskapazität:** Es gab keine Bauvorschriften, die durchgesetzt wurden, kaum Katastrophenschutz, schweres Räumgerät fehlte. Das Beben zerstörte den Präsidentenpalast, Ministerien, Krankenhäuser und das Hauptquartier der UN-Mission, also gerade die Einrichtungen, die die Hilfe hätten organisieren sollen.
- **Anpassungskapazität:** Jahrzehnte politischer Instabilität, Abhängigkeit von ausländischer Hilfe, Abholzung und wiederholte Wirbelstürme hatten Rücklagen und Institutionen ausgezehrt. Nach dem Beben brach eine Cholera-Epidemie aus, eingeschleppt durch UN-Soldaten, an der fast 10 000 Menschen starben. Der Wiederaufbau kam nur schleppend voran.

Chile liegt an der Subduktionszone der Nazca-Platte und gehört zu den am stärksten gefährdeten Ländern der Erde; hier ereignete sich 1960 das stärkste je gemessene Beben (Magnitude 9,5). Das Beben vom 27. Februar 2010 vor der Region Maule setzte etwa fünfhundertmal so viel Energie frei wie das Beben in Haiti. Es starben gut 500 Menschen, etwa die Hälfte durch den folgenden Tsunami. Chile hat aus seinen Beben gelernt: Strenge Bauvorschriften werden seit Jahrzehnten weiterentwickelt und weitgehend durchgesetzt, Hochhäuser sind auf Bewegung ausgelegt, die Bevölkerung kennt das Verhalten bei Beben. Doch auch Chile zeigte Schwächen: Die Tsunamiwarnung wurde fälschlich aufgehoben, und viele Opfer gab es in Küstenorten, in die die Welle kam, nachdem Menschen in ihre Häuser zurückgekehrt waren.

9.2 Japan 2011: Grenzen der Resilienz

Japan gilt als eines der am besten vorbereiteten Länder der Erde: erdbebensichere Bauweise, ein Frühwarnsystem, das Züge automatisch stoppt, Tsunamimauern an langen Küstenabschnitten, regelmäßige Übungen in Schulen. Am 11. März 2011 erschütterte ein Beben der Magnitude 9,0 vor der Küste der Region Tōhoku das Land. Die Gebäude hielten dem Beben weitgehend stand. Doch der Tsunami war höher, als die Planungen angenommen hatten: Die Wellen überspülten die Schutzmauern und liefen an einzelnen Stellen auf rund 40 m Höhe auf. Etwa 15 900 Menschen starben, rund 2500 werden noch vermisst; mehr als die Hälfte der Toten war 65 Jahre oder älter. Im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi fiel die Kühlung aus, es kam zu Kernschmelzen; Zehntausende mussten ihre Heimat für Jahre verlassen.

Japan zeigt zweierlei. Erstens wirkt Vorsorge: Ohne Bauvorschriften und Warnsystem wären viel mehr Menschen gestorben. Zweitens hat auch die beste Vorsorge Grenzen: Schutzbauten sind für ein bestimmtes Bemessungsereignis ausgelegt und erzeugen Vertrauen, das bei einem noch größeren Ereignis trügerisch wird. Die alternde Bevölkerung erhöhte die Verwundbarkeit, und die Verknüpfung von Naturgefahr und technischer Anlage schuf eine neue Art von Katastrophe. Beim Wiederaufbau setzte Japan deshalb auf mehrere Schutzlinien: höhere Mauern, aber auch Fluchtwege, erhöhte Fluchtorte und die Verlegung von Wohngebieten auf höher gelegenes Land.

9.3 Türkei und Syrien 2023: Regeln, die nicht durchgesetzt werden

Am 6. Februar 2023 riss die Ostanatolische Verwerfung, eine Transformstörung zwischen der Anatolischen und der Arabischen Platte, auf mehreren hundert Kilometern Länge; auf das Beben der Magnitude 7,8 folgte Stunden später ein zweites der Magnitude 7,5. In der Türkei starben über 53 000 Menschen, in Syrien schätzungsweise 6000 bis 8500. Die Türkei ist ein Land mit hohem Entwicklungsstand und hat seit dem Beben von İzmit 1999 strenge Bauvorschriften. Sie wurden aber vielerorts nicht eingehalten und kaum kontrolliert; mehrere Amnestien legalisierten nachträglich Gebäude, die gegen die Vorschriften errichtet worden waren. Zehntausende Gebäude stürzten ein. Im benachbarten Nordwesten Syriens traf das Beben Menschen, die nach über zehn Jahren Bürgerkrieg in beschädigten Häusern und Flüchtlingslagern lebten; Hilfe kam über die Grenze nur langsam an.

Das Beispiel zeigt: Der Entwicklungsstand allein entscheidet nicht. Ob Vorschriften durchgesetzt werden, ob Korruption verhindert wird und ob staatliche Strukturen funktionieren (**Regierungsführung**), ist ein eigener, oft entscheidender Teil der Verwundbarkeit.

9.4 Vulkane: Nevado del Ruiz 1985 und Pinatubo 1991

Am 13. November 1985 brach der Nevado del Ruiz in Kolumbien aus, ein vergletscherter Schichtvulkan über der Subduktionszone der Nazca-Platte. Der Ausbruch selbst war eher klein, doch die heißen Förderprodukte schmolzen einen Teil des Gletschers. Das Schmelzwasser riss Asche und Gestein mit sich und schoss als **Lahar** (vulkanischer Schlammstrom) durch die Täler. Zweieinhalb Stunden später begrub er die fast 50 km entfernte Stadt Armero; etwa 23 000 Menschen starben. Eine Gefahrenkarte, die genau diese Gefahr für Armero zeigte, lag seit Wochen vor. Doch die Behörden zögerten mit der Evakuierung, Warnungen erreichten die Bewohner nicht oder wurden beschwichtigt, ein Stromausfall unterbrach die Kommunikation.

Sechs Jahre später erwachte auf den Philippinen der Pinatubo, der seit etwa 500 Jahren geruht hatte. Philippinische und amerikanische Vulkanologen überwachten ihn mit Seismometern und Gasmessungen, erstellten eine Gefahrenkarte und ein Warnsystem in fünf Stufen und ließen Zehntausende Menschen rechtzeitig evakuieren. Der Ausbruch am 15. Juni 1991 war einer der größten des 20. Jahrhunderts. Etwa 850 Menschen starben, viele unter Dächern, die unter der regennassen Asche eines gleichzeitigen Taifuns einstürzten. Ohne die Warnung wären nach Schätzungen mindestens 5000 Menschen mehr gestorben.

Der Vergleich zeigt, dass die Gefahr am Pinatubo größer war, das Ergebnis aber besser, weil Überwachung, Warnung, Kommunikation und Vertrauen funktionierten. Beim Nevado del Ruiz war das Wissen vorhanden, aber es erreichte die Menschen nicht.

9.5 Baden-Württemberg: geringe Gefahr, hohe Exposition

Im Oberrheingraben ist die Erdbebengefahr im weltweiten Vergleich gering bis mäßig. Starke Beben wie das von Basel 1356 kommen vielleicht nur alle paar tausend Jahre vor. Die Exposition ist dagegen hoch: Im Graben liegen dicht besiedelte Städte, Chemie- und Pharmaindustrie, Kraftwerke und wichtige Verkehrswege. Viele ältere Gebäude wurden nicht erdbebengerecht gebaut, und kaum jemand rechnet mit einem Beben. Ein Beben wie 1356 würde deshalb heute nach Schätzungen von Versicherern Schäden in Milliardenhöhe verursachen.

Dass auch der Mensch selbst Gefahren auslöst, zeigen zwei Beispiele aus der Region. In Basel löste 2006 ein Geothermieprojekt, bei dem Wasser in 5 km Tiefe gepresst wurde, ein Beben der Magnitude 3,4 aus; das Projekt wurde eingestellt. In Staufen im Breisgau trafen Bohrungen für Erdwärmesonden 2007 eine Schicht aus Anhydrit, die durch eindringendes Wasser zu Gips aufquillt; seitdem hebt sich die Altstadt, Hunderte Häuser haben Risse. Im Anthropozän ist die Grenze zwischen Natur- und Menschengefahr fließend.

Merksatz

Die Fallbeispiele zeigen: Die Zahl der Todesopfer hängt weniger von der Stärke des Ereignisses ab als von der Verwundbarkeit. Entscheidend sind Bauweise und ihre Kontrolle, Frühwarnung und Kommunikation, Armut und soziale Lage, Regierungsführung und das Lernen aus früheren Ereignissen. Auch resiliente Gesellschaften haben Grenzen, wenn ein Ereignis die Bemessung übersteigt.

Fachbegriffe

Lahar: vulkanischer Schlammstrom aus Wasser (Schmelzwasser, Regen) und vulkanischem Material, der weit vom Vulkan entfernt Schäden anrichten kann.

Risiko, Hazard, Verwundbarkeit, Resilienz: siehe Kapitel 8; hier angewandt auf Räume unterschiedlichen Entwicklungsstands.

Üben: **noctua** ↗

