

GEOPHYSIK (E. Kissling)

I. Seismologie

Erdbeben:

- pro Jahr ca. **1 Million** Erdbeben
- mehr als **90%** sind *tektonische Erdbeben*; weniger als **10%** werden von Vulkanismus und Einstürzen ausgelöst
- Primäreffekte von tektonischen Erdbeben: Verschiebungen an einem Bruch:
 - *Aufschiebungen/Abschiebungen* (= schräg/parallel zur Vertikalen)
 - horizontale Verschiebungen (= *dextrale/sinistrale Blattverschiebung*)
- Mechanismus: langsame Bewegungen (ca. **5 cm/a**) beidseits einer Bruchzone → Spannung steigt im Boden → Überwindung der Bruchfestigkeit des Bodens → Versetzung von ca. **3.5 km/s** → weniger gespannter Zustand
- Herd/*Hypozentrum* = Bruchstelle; *Epizentrum* = Punkt auf Erdoberfläche vertikal über Herd
- Bewegungen am Bruch bewirken *Dilatation* (= Ausdehnung) oder *Kompression* in Gebieten um den Herd herum
- *Stereogramm* stellt *Herdlösung* her, aus dem Kompressions-/Dilatationsgebiete und Bewegungsrichtungen am Bruch interpretiert werden können
- Sekundäreffekte:
 - Grossbrände
 - Erdrutsche
 - seism. Wasserwellen (= *Tsunamis*)

seismische Wellen:

- freigesetzte elastische Energie breitet sich als *seismische Wellen* vom Erdbebenherd aus
- *Seismometer* = empfindliches Instrument, mit dem seism. Signale aufgenommen werden können; mechanische/optische/elektrische Aufnahmen; Aufzeichnungen = *Seismogramm*
- Raumwellen:
 - *P-Welle* = Bewegung hin und her parallel zur Wellenausbreitungsrichtung, jeder Punkt erfährt eine Folge von Kompression und Dilatation, schnellste Welle, erstes Ereignis auf Seismogramm (= *Primärwelle*)
 - *S-Welle* = Bewegung senkrecht zur Wellenausbreitungsrichtung, jeder Punkt erfährt Scherbewegungen auf und ab, Zerlegung in orthogonale Komponenten in vertikaler (= SV) und horizontaler (= SH) Ebene möglich, langsamer als P-Welle (= Transversal-/Scher-/*Sekundärwelle*)
- Oberflächenwellen:
 - *Love-Welle* = Überlagerung von horizontal polarisierten Transversalwellen (= SH), gleiche Geschwindigkeit wie S-Welle
 - *Rayleigh-Welle* = Bewegung auf elliptischen Bahnen in vertikaler Ebene parallel zur Ausbreitungsrichtung, Kombination aus P- und SV-Welle, langsamer als S-Welle

Erdbebengrösse:

- Intensität: Auswirkungen an einem Ort; *Skalen* = **12-stufig**, beschreiben Ausmass der Sekundäreffekte
 - *Medvedev-Sponheuer-Karnik-Skala* (= MSK) in Europa
 - *Modifizierte Mercalli-Skala* (= MMS) in Amerika
- Magnitude: Mass für Erdbebengrösse, hängt ab von Energie des Vorgangs im Erdbebenherd, von max. Amplitude (= Auslenkung) der auf Seismogramm aufgenommenen Oberflächenwellen bestimmt; Skala nach oben/unten offen, aber Aufzeichnungen schwächer als **-2** kaum möglich und keine Registrierung von **9** oder mehr; Berechnung der *Energie E*

Seismizität:

- Lokalisierung des Epizentrums: Entfernung des Epizentrums aus Laufzeitunterschied der P- und S-Wellen an seism. Station berechenbar
- globale Verteilung: ca. **1% intraplate Erdbeben** (= nicht am Plattenrand); 3 aktive Zonen:
 - A = *zirkum-pazifische* (**75-80%** der Energie)
 - B = *Mittelmeer-transasiatische* (**15-20%** der Energie)
 - C = *ozeanische Rücken und Schwellen* (**3-7%** der Energie)
- Lithosphärenplatten:
 - *Hauptplatten* = Afrika, Antarktis, Australien-Indien, Eurasien, Nazca, Nordamerika, Pazifik, Südamerika
 - *kleinere Platten* = Arabien, Cocos, Karibik, Philippinen, Scozia
- Tiefenverteilung: (mitteltiefe und tiefe Erdbeben nur an Subduktionszonen, um **45°** geneigte und **20 km** mächtige *Benioff-Zone* von seism. Aktivität in Mittelmeer-transasiatischen und zirkum-pazifischen Zonen, max. bekannte Tiefe: **720 km**)
 - *Flachherdbeben* (**0-70 km**) = an allen seism. Zonen, Freisetzung von **85%** der seism. Energie, an ozeanischen Rücken und Schwellen nur solche
 - *mitteltiefe Erdbeben* (**70-300 km**) = Freisetzung von ca. **12%** der seism. Energie;
 - *Tiefherdbeben* (**300-720 km**) = Freisetzung von ca. **3%** der seism. Energie
- Richtung der rel. Bewegung zw. Platten an *Transform Faults* bestimmt, nicht an Rücken

Reflexion/Refraktion von Raumwellen:

- an Grenze zw. versch. Medien mit untersch. P-/S-Wellen wird ein Teil der einfallenden seism. Energie zurück reflektiert, ein Teil wird übertragen
- *reflektierter Strahl* bildet mit Normalenrichtung zur Grenzfläche gleichen Winkel wie einfallender Strahl; *refraktierter Strahl* wird an Grenzfläche gebrochen nach dem *Brechungsgesetz* von Snellius: $\sin_{\text{einfall}}/\sin_{\text{brech}} = v_{\text{einfall}}/v_{\text{brech}}$
- *Reflexionsseismik* = wichtig bei Suche nach Erdölvorkommen; *Refraktionsseismik* = Auskunft über vertikale Geschwindigkeitsstruktur der tieferen Bereiche der Erdkruste
- bei Oberflächenwellen: Unterscheidung zw. *Phasengeschw.* (= Fortpflanzung einer konst. Phase = Amplitudenmin./-max.) und *Gruppengeschw.* (= Fortpflanzung eines Wellenpakets)
 - *Dispersion* = Abhängigkeit der Gruppengeschw. von der Wellenlänge der Oberflächenwelle
 - *Eindringtiefe* = abhängig (= ca. $\frac{1}{4}$) von Wellenlänge

Aufbau des Erdkörpers:

- Erdkruste (= obere Schicht) und Erdmantel (= unter Erdkruste liegendes Medium):
 - *Mohorovicic-Diskontinuität* (= Moho) = seism. Grenze zw. Erdkruste und -mantel, P-Wellen-Geschw. steigt scharf von ca. **7 km/s** der unteren Erdkruste auf ca. **8 km/s** im oberen Erdmantel, Moho-Tiefe = Krustenmächtigkeit (= durchschnittlich **33 km**; **5-10 km** unter Ozeanen, **30-60 km** unter Kontinenten)
 - *Conrad-Diskontinuität* = seism. Grenze innerhalb Kontinentalkruste, trennt granitische Oberkruste (P-Wellen-Geschw. = ca. **6 km/s**) von gabbroiden Unterkruste (P-Wellen-Geschw. = ca. **7 km/s**), Tiefe = ca. **20 km**
- Lithosphäre = feste Schicht aus Erdkruste und oberem Teil des Erdmantels, Mächtigkeit erreicht unter Ozean **70-100 km**, unter Kontinent **100-150 km**; Astenosphäre = weiche Schicht des oberen Erdmantels (Material partiell geschmolzen), P-Wellen und v.a. S-Wellen haben erniedrigte Geschw., Tiefenbereich = 100-250 km, *Plattentektonik* durch plastisches Verhalten
- Erdmantel: mit zunehmender Tiefe auch meist kontinuierliche Zunahme der Dichte und der seism. Geschw., bei ca. **400 km** und **650 km** ziemlich scharf wegen *Phasenumwandlung* der Minerale; P-Wellen-Geschw. an Basis des Erdmantels (= **2'900 km**): ca. **13 km/s**
- Erdkern: flüssiger äußerer (= keine S-Wellen) und fester innerer

II. Schwere und Figur der Erde

Schwere:

- *Schwere* = Schwerebeschleunigung = Beschleunigung einer freien Masse an der Erdoberfläche; wird von *Gravitationsbeschleunigung* der Erde und der *Zentrifugalbeschleunigung* der Erdrotation bestimmt; *Lotrichtung* definiert Richtung; mittlerer Betrag = 9.81 m/s²
- *Äquipotentialfläche* = darauf ist Potential der Kraft konstant bei Bewegung senkrecht zur Richtung der Kraft; *Figur der Erde* = Äquipotentialfläche der Schwere, auf der das Potential demjenigen des mittl. Meeresspiegels gleich ist; Lotrichtung überall senkrecht zur Erdfigur
- Gravitationsgesetz von Newton:
 - *Anziehung* F zw. 2 Massen m und M , in einer Entfernung r voneinander entfernt: $F = -GmM / r^2$ (*Gravitationskonstante* $G = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)
 - *Gravitationsbeschleunigung* $b_G = -GE / R^2$ (Erdmasse $E = \text{ca. } 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, mittl. Erdradius $R = 6371 \text{ km}$) = Anziehungskraft der Erde auf 1 kg Masse; min. am Äquator, max. am Pol
- 2 Annäherungen an die Erdfigur:
 - durch Erdrotation: *Zentrifugalbeschleunigung* $b_z = \Omega^2 d = \Omega^2 R \cos \Phi = 2\pi R \cos \Phi / T$ (Erdrotations-Periode $T = 1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$; Winkelgeschwindigkeit $\Omega = 2\pi / T$; geograph. Breite Φ); max. am Äquator, min. am Pol
 - *Rotationsellipsoid* (= an Polen abgeplattet) durch Nachgiebigkeit der Erde: *Normalschwereformel* $g_N = g_E \cdot (1 + \beta_1 \sin^2 \lambda + \beta_2 \sin^2 2\lambda)$

Figur der Erde:

- theoretische Äquipotentialfläche der Schwere = *Erdellipsoid* \neq *Geoid* = wirkliche Äquipotentialfläche der Schwere = Birnenform mit Abweichungen (= *Geoidundulationen*) von 10-30 m

Schwereanomalien:

- durch inhomogene Massenverteilung erwirkte *Schwereanomalie* = gemessene und korrigierte Schwere – theoretische Schwere
 - Korrekturen:
 - *topographische Korrektur* dg_T : Gesamteffekt der umliegenden Berge/Täler berechnen und addieren
 - *Bouguer-Platten-Korrektur*: Schwereerhöhung durch Gesteinsschicht mit Mächtigkeit h und spezif. Dichte ρ : $dg_P = 0.04193 \cdot \rho \cdot h$ subtrahieren, falls Messpunkt über Ellipsoid
 - *Frei-Luft-Korrektur* für Höhe h : $dg_F = +0.3086 \cdot h$ addieren, wenn Messpunkt über Ellipsoid
 - *Breitenkorrektur* dg_E durch Normalschwereformel dg_N berechnet
 - Restbetrag nach Korrekturen = *Bouguer Schwereanomalie* $dg_B = g_{\text{gemessen}} + (dg_T - dg_P + dg_F) - g_N$;
- Interpretationen:
- Untergrund = homogen \rightarrow Null (= *Gleichgewicht*)
 - Untergrund = Massendefizit \rightarrow negativ (= *Hebung*)
 - Untergrund = Massenüberschuss \rightarrow positiv (= *Senkung*)

III. Isostasie

- Prinzip: zusätzliche Masse an Erdoberfläche wird von fehlender Masse in Tiefe kompensiert
- Folgen: Aufhebung von früher tiefgedrückter Erdkruste; neg. Bouguer Schwereanomalien wegen „leichten“ Gebirgswurzelzonen
- *isostatische Kompensation* mit Hilfe des *Prinzips von Archimedes*: Topographie in vertikale Säulen geteilt; 2 Modellvorstellungen:
 - *Modell von Pratt (1855)*: topograph. Höhen beruhen auf Dichteunterschiede der Gesteine; Säulen unter Bergen haben konst. Tiefgang
 - *Modell von Airy (1855)*: Gebirgsmaterial hat einheitliche Dichte; höheres Herausragen der Berge durch tieferes Eintauchen der Säulen kompensiert

IV. Geothermik

- *Erdwärme* = grösste Energiequelle der Erde; entspricht ca. **1'000mal** der freigesetzten Erdbebenenergie
- Temp.verlauf im Erdinnern ziemlich schlecht bekannt; Vermutung: Temp. im Erdkern = **5'000-6'000°C**
- Wärmetransport in der Erde durch:
 - Konvektion im flüssigen äusseren Kern
 - Wärmeleitung in Erdmantel/-kruste
- Wärmeenergie, die pro s jede Flächeneinheit der Erdoberfläche durchfliesst = Wärmefluss $q = Q + k(dT/dz)$ (Proportionalitätskonst. k = Wärmeleitfähigkeit; Q = Beitrag von Wärmequellen in Erdkruste); Einheiten: mW/m² oder HFU (= **42 mW/m²**)
 - mittl. Wärmefluss = ca. **87 mW/m²**
 - für Ozeane: **101 mW/m²**
 - für Kontinente: **65 mW/m²**
- Sonnenenergie am äusseren Rand der Atmosphäre = **32'500 HFU**; wird grösstenteils reflektiert, absorbiert, wieder ausgestrahlt; nur einige Meter Eindringtiefe der Sonnenwärme in Krustengesteinen

Wärmefluss vom Innern:

- Wärmeproduktion durch Radioaktivität: wichtiger in kont. als in ozean. Kruste
- Abkühlung der Lithosphäre: wichtigster Anteil des ozean. Wärmeflusses
- Wärme aus tieferen Regionen der Erde: Mantelwärmefluss (im tieferen Erdmantel)
- kont. und ozean. Wärmefluss verglichen:
 - kontinentaler Wärmefluss: **20%** aus Abkühlung der Lithosphäre, **25%** aus Mantelwärmefluss, **55%** aus Radioaktivität
 - ozeanischer Wärmefluss: **85%** aus Abkühlung der Lithosphäre, **10%** aus Mantelwärmefluss, **5%** aus Radioaktivität
 - (junge) Ozeane haben im allg. höhere Wärmeflusswerte als (alte) Kontinente
- Folgen der Lithosphären-Abkühlung:
 - Wärmefluss durch ozean. Kruste nimmt ab
 - Lithosphärenmächtigkeit nimmt zu
 - ozean. Tiefe nimmt zu

V. Geomagnetismus

- Erdmagnetfeld:
 - Aussenfeld (= 1%) = Ionosphäre: Sonnenwind = Strom aus elektr. geladenen Teilchen aus Sonne; magn. Stürme wie Sonnenflecken
 - Innenfeld (= 99%): Dipolfeld (= 94%) = im flüssigen Kern durch Materiebewegungen erzeugt; Nicht-Dipolfeld (= 5%) = sieht wie System von Zellen/Wirbeln aus

VI. Gesteinsmagnetismus

- Gesteinsmagnetismus wegen geringem Anteil an ferromagn. Mineralien (z.B. Magnetit, Hämatit)
- ferromagn. Mineralien können remanente Magnetisierung (= entspricht der Richtung des Erdmagnetfeldes bei Gesteinsbildung; primär/sekundär) erwerben → Aussagen über Erdmagnetfeld in geolog. Vergangenheit
 - therm. rem. Magn. (= TRM): bei Abkühlung/Kristallisation wird Curie-Punkt unterschritten
 - detrit. rem. Magn. (= DRM): detrit. Mineralien aus Erosion von Gesteinen werden in Sedimenten verfestigt
 - post-depositions-rem. Magn. (= pDRM): v.a. primär; remanente Magnetisierung in Sedimenten nach Ablagerung erworben
 - chem. rem. Magn. (= CRM): sekundär; chem. Änderung der Mineralien im Gestein durch Diagenese/Verwitterung

VII. Paläomagnetismus

- *Paläomagnetismus* befasst sich mit Geschichte des Erdmagnetfeldes in geolog. Vergangenheit
- scheinbare Polwanderung: Berechnung der *Polentfernung* p vom Messpunkt: $\tan l = 2 \tan \beta = \frac{2}{\tan p}$; Darstellung mit *Polwanderungskurve* für jeden Kontinent (durch Bewegungen der Kontinente rel. zur Drehachse und rel. zueinander) → Superkontinent *Pangäa*
- Polaritätsumkehrungen: Pole des Erdmagnetfeldes wechseln alle **4'000-5'000 a** ihre Polarität → *Ablagerungsrate* eines Sediments bestimmbar, Entstehung des spiegelsymm. ozeanischen Streifenmusters beim *Sea-Floor-Spreading* (= langsam im Nordatlantik: **1-2 cm/a**, rel. schnell im Pazifik: **5-10 cm/a**)

VIII. Plattentektonik

- *Lithosphäre* = Erdkruste + oberer Teil des Erdmantels = feste, harte Kugelschale; ca. **100 km** tief; 7 grosse, 5 kleinere Lithosphärenplatten mit Bewegungsgeschw. von **1-10 cm/a**
- *Asthenosphäre* = unter Lithosphäre; weicher
- 3 Arten von Plattenrändern:
 - *konstruktive Plattenränder* an ozean. Rücken und Schwellen: Auseinanderbewegung der Platten; Lithosphäre wird durch Aufsteigen von Magma stets neu gebildet; nur Flachherdbeben; hohe Wärmeflusswerte (bis ca. **300 mW/m² = 8 HFU**), aber auch Wärmeabtransport durch hydrothermale Ströme in Klüften; pos. Bouguer Schwereanomalien nehmen ab (bis ca. 200 mgal); Datierung der ozean. Krust durch Streifenmuster der ozeanischen magnetischen Anomalien
 - *destruktive Plattenränder* an Subduktionszonen: ozean. Lithosphärenplatte taucht unter benachbarte ozean./kont. Lithosphärenplatte; sehr niedrige Wärmeflusswerte; Erdbeben bei Reibung, v.a. im obersten Teil der subduzierenden Platte (= ca. 20 km mächtige Benioff-Zone); neg. Bouguer Schwereanomalien über Tiefseeegraben, pos. Bouguer Schwereanomalien hinter Subduktionszone
 - *konservative Plattenränder* an transformierenden Verwerfungen (= *Transform Faults* ≠ Horizontalverschiebungen): Versetzungen von konstruktiven/destruktiven Plattenrändern; Seismizität über ganze Bruchzone verteilt