

4 Oberflächen

4.1 Vulkanismus

Vorkommen:

- im aktuellen Alter bei allen Planeten Mantel und Kruste überwiegend fest
- heutiges aktives Vorkommen: Erde, Io, Venus
- Mars: zuletzt großflächig aktiv vor ~ 500 Mio yr (Olympus Mons noch vor \lesssim 100 Mio yr)
- Mond und Merkur: bis vor etwa 50–100 Mio yr

Prinzip:

- Schmelzpunkt sinkt, wenn Temperatur \uparrow , Druck \downarrow oder Zusammensetzung sich ändert
- Temperatur \uparrow z. B. durch aufsteigende Wärme durch Konvektion im Mantel (z. B. in Hotspots)
- Druck \downarrow z. B. in entspannten Bereichen an Plattengrenzen
- Schmelztemperatur verschieden für verschiedene Zusammensetzung (z. B. Wasserbeimischung)
- Solidustemperatur: unterhalb alles fest
- Liquidustemperatur: oberhalb alles flüssig, dazwischen halb und halb
- Ausbruch wenn: Kruste dünn genug, sodass ausgedehntes, leichteres Magma aufsteigen kann
- flüssige Substanzen (H_2O , O_2) bei hohem Druck (große Tiefe) gelöst, bei geringem Druck (geringer Tiefe) ausgasend \rightarrow Explosion
- Schildvulkane: dünnflüssige, basaltische (basisch, SiO_2 -arm) Lava (bzw. vorher Magma)
- Schichtvulkane: zähflüssige rhyolitische (sauer, SiO_2 -reich) Lava

4.2 Plattentektonik

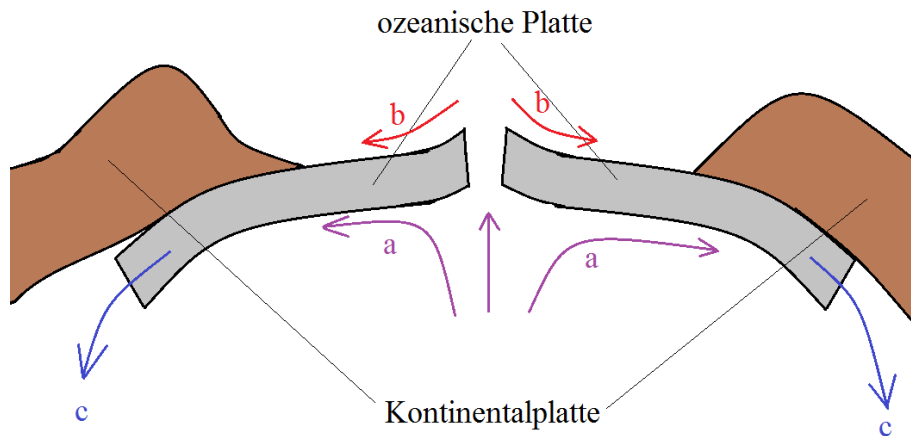
Vorkommen und Merkmale:

- Oberflächenmerkmale: Faltengebirge und tiefe Gräben an den Plattenkanten
- nur auf der Erde nachgewiesene Aktivität
- Hinweise auf frühere Aktivität bei Mars, eventuell Titan, Europa
- typische Geschwindigkeit einige $\frac{\text{cm}}{\text{yr}}$ (aus GPS/Laser-Ranging, VLBA (Radiointerferometrie), Sedimentdicken am Meeresboden)

Mechanismus:

- \rightarrow nur Kruste der Erde dünn/weich und mobil genug
- Vermutung: Wasser in der Lithosphäre als Schmiermittel und zum Aufweichen

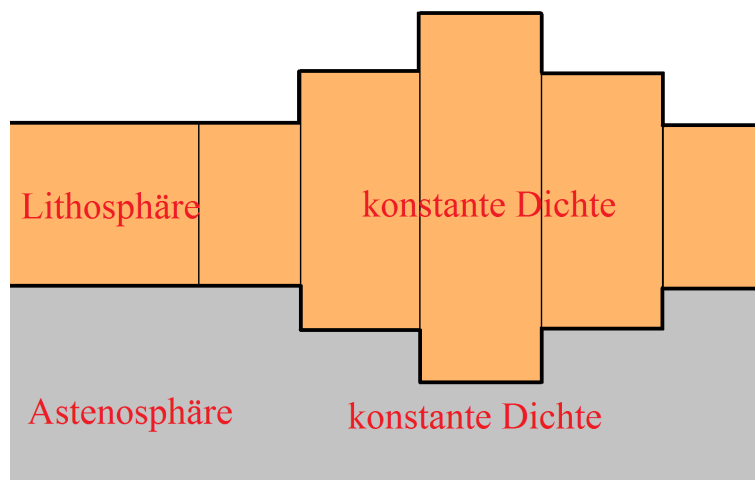
- Motoren: (a) Reibung (an konvektivem Mantel), (b) Druck (durch Hangabtrieb) und (c) „Zug“ (durch mangelnden Auftrieb wegen höherer Dichte)



Einschub Isostasie oder: Warum sinken Berge nicht ein?

Vereinfachende Modelle, die Extreme darstellen:

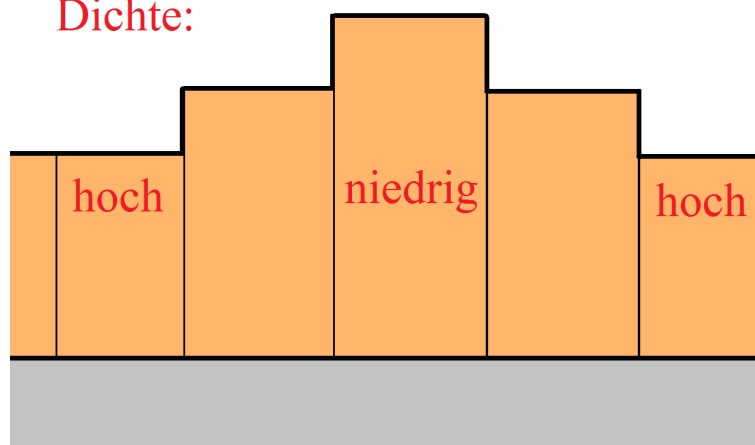
- Modell 1 (Airy): z. B. Faltengebirge



$\rho_{\text{Astensphäre}} > \rho_{\text{Lithosphäre}} \leadsto \text{Auftrieb}$

- Modell 2 (Pratt): z.B. ozeanische vs. kontinentale Kruste

Dichte:



4.3 Einschlagkrater

(a) Wirkung der Atmosphäre:

- Staudruck $p_{\text{Stau}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{Atmos}} \cdot v_{\text{imp}}^2$ (z. B. $\rho_{\text{Atmos}} = 1 \text{ kg m}^{-3}$, $v_{\text{imp}} = 10 \text{ km/s} \sim 50 \text{ MPa}$)
→ kann schnell Druckfestigkeit übersteigen
- Abbremsen signifikant, wenn Masse verdrängter Luft $\approx M_{\text{imp}}$:

$$m_{\text{Säule}} \stackrel{!}{=} M_{\text{imp}} = \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{imp}} R_{\text{imp}}^3$$

wobei

$$m_{\text{Säule}} = \frac{p_{\text{Boden}} \cdot A}{g},$$

$$A = \pi R_{\text{imp}}^2,$$

$$F_{\text{Luftdruck}} = p_{\text{Boden}} \cdot A$$

und somit

$$R_{\text{imp}} = \frac{3 p_{\text{Boden}}}{4 g \rho} \quad (4.1)$$

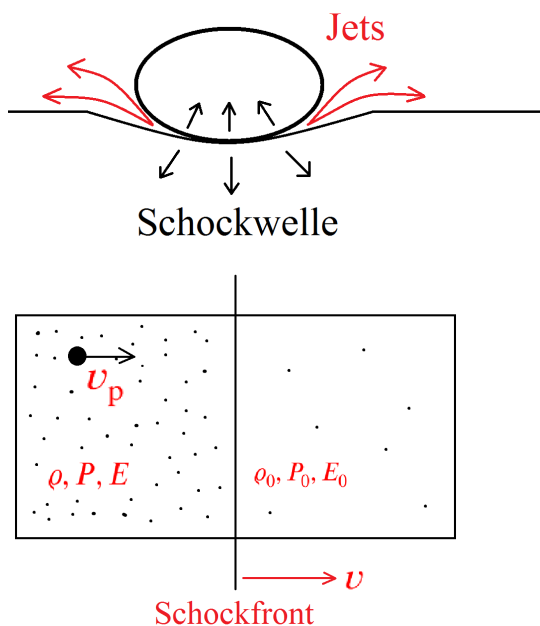
bzw. allgemeiner

$$R_{\text{imp}} = \frac{3 p_{\text{Boden}}}{4 g \rho \cdot \sin \theta} \quad (4.2)$$

für einen Einschlagwinkel θ zur Oberfläche.

(b) Kontakt und Kompression

(geringe Masse)



- Schockwelle beschrieben durch Hugoniotgleichung(en):
 - Massen(dichte)erhaltung: $\rho_0 \cdot v = \rho (v - v_p)$
 - Energie(dichte)erhaltung: $E - E_0 = \frac{1}{2} (p + p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)$

- Impuls(dichte)erhaltung: $p - p_0 = \rho_0 \cdot v_p \cdot v$
- Druck hinter Schockfront:

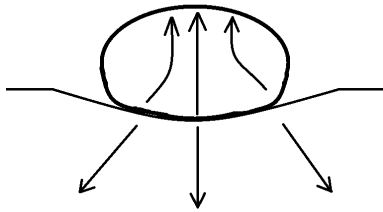
$$p = \begin{cases} v_{\text{imp}} \cdot c_s & \text{niedriges } v_{\text{imp}} \\ v_{\text{imp}}^2 & \text{hohes } v_{\text{imp}} \text{ (Überschall)} \end{cases}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$$

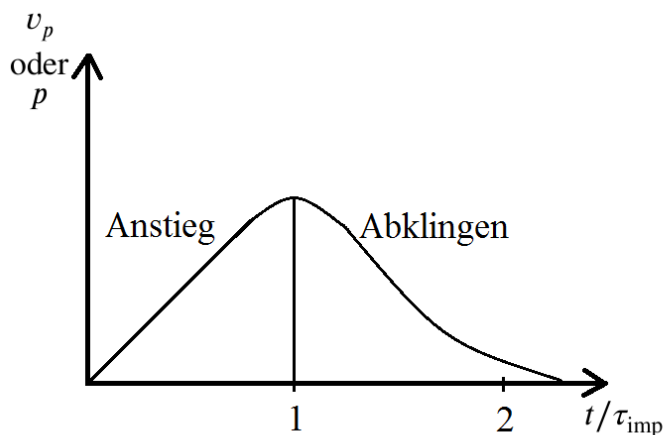
c_s ... Schallgeschwindigkeit (P-Wellen)

K ... Kompressionsmodul

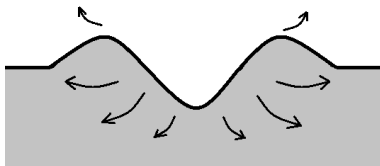
- Phase beendet, wenn Schockwelle Impaktor durchlaufen hat
- Dekompression auf Rückseite verdampft Projektil



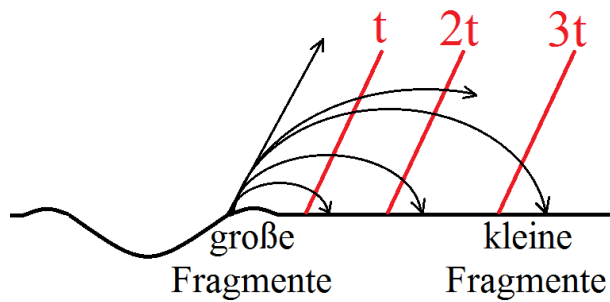
- typische Zeitskala: $\tau_{\text{imp}} = \frac{d_{\text{imp}}}{v_{\text{imp}}}$ (Bsp.: $d = 1 \text{ km}$, $v_{\text{imp}} = 10 \text{ km/s}$ → $\tau_{\text{imp}} = 0,1 \text{ s}$)



(c) Aushub und Auswurf



- Zielmaterial in Bewegung versetzt mit $v_p < c_s$
- Fluss weg vom Einschlagsort, Richtung Oberfläche, wo Druck geringer
- Phase kann Minuten dauern
- vergleichbar mit Tsunami nach Seebeben
- übrig bleibt „Übergangskrater“: Tiefe $\approx \frac{1}{5}$ Durchmesser, Randhöhe $\approx 4\%$ Durchmesser (aus Beobachtungen und Simulationen)
- Auswurf entlang Auswurfkegel:



NR:

$$x(t) = v_{ej} \cdot \cos \theta \cdot t$$

$$y(t) = v_{ej} \sin \theta \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 = x(t) \cdot \tan \theta - \frac{1}{2} g t^2$$

$$y(t) \stackrel{t=\text{const}}{=} x \cdot \tan \theta - \text{const} \rightarrow \text{Gerade (bzw. Kegel)}$$

- Fragmente mit $v_{ej} > v_{\text{Flucht}}$ können entkommen
 - typische Geschwindigkeit: $v_{ej} \sim 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $v_{ej} \lesssim v_s$
 - $V_{\text{Krater}} (\text{Volumen des Kraters}) \propto E_{\text{imp}} \rightarrow d_{\text{Krater}} \propto E^{\frac{1}{3}}$
 - außerdem: $E_{\text{imp}} \propto M_{\text{imp}} \propto V_{\text{imp}} \propto V_{\text{Krater}}$
- $d_{\text{Krater}} \propto d_{\text{imp}} (d_{\text{Krater}} \sim 10 d_{\text{imp}})$
- typische Energien: z. B. 30-Meter-Ni-Fe-Meteorid mit $10 \frac{\text{km}}{\text{s}}$:
 $E_{\text{imp}} \sim 10^{16} \text{ J} \cong 10^6 \text{ t TNT} (\cong 7,7 \text{ M}_{\text{Richter}})$

(d) Kraterkollaps und -modifikation

- Gravitation schnell rücktreibend, vor allem solange Material noch in Bewegung
- Material schwappt zur Kratermitte, dort ggf. Zentralbergbildung bzw. zentrale Ringe
- Übergang einfacher → komplexer Krater bei $d_{\text{Krater}} \propto \frac{1}{g}$
- Größen für den Mond:

 Simpel: $d \lesssim 18 \text{ km}$

 Zentralberg: bis $d \approx 100 \text{ km}$

 Mittelringbecken: bis $d \gtrsim 300 \text{ km}$

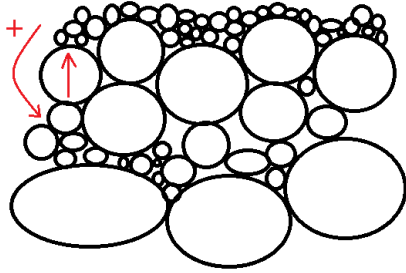
 Zentralberghöhen: $h_{\text{ZB}} [\text{km}] = 6 \cdot 10^{-4} d^2 [\text{km}]$

- typische Zeitskalen: $\tau \sim \sqrt{\frac{d_{\text{Krater}}}{g}}$, also Minuten bis Stunden

(e) Impact gardening („Einschlaggärtnern“)

- jeder Einschlag gräbt ein bestimmtes Bodenvolumen um
 - Volumenaushubrate: $\dot{V} = \int \dot{N}(R) \cdot V_{\text{Krater}}(R) dR$, $[\dot{V}] = \frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit} \cdot \text{Oberfläche}}$
 - Impaktrate: $\dot{N} = \dot{N}_0 \left(\frac{R}{R_0}\right)^\nu$, $[\dot{N}] = \frac{\text{Teilchen}}{\text{Zeit} \cdot \text{Oberfläche} \cdot \text{Größenintervall}}$
 - Volumenaushub pro Krater: $V_{\text{Krater}}(R) = V_{\text{imp}} \cdot \gamma$
 - Ausbeute: $\gamma \approx 10^2 \dots 3$
 - Impaktorvolumen: $V_{\text{imp}} = \frac{4\pi}{3} R^3$
- $\dot{V} = \int N_0 \cdot \left(\frac{R}{R_0}\right)^\nu \cdot \gamma \cdot V_{\text{imp}}(R) dR = \frac{4\pi\gamma N_0}{3(4+\nu)} \cdot R_0^4 \cdot \left[\left(\frac{R_{\text{max}}}{R_0}\right)^{4+\nu} - \left(\frac{R_{\text{min}}}{R_0}\right)^{4+\nu} \right]$

- große Einschläge (R_{\max}) dominieren für $\nu > -4$, kleine Einschläge für $\nu < -4$
 - typisch: $-2,5 > \nu > -3,5$
- große Einschläge dominieren Volumenaushub, aber kleinere treten regelmäßiger auf
- Tiefenwirkung: $[\dot{V}] = \frac{\text{Volumen}}{\text{Zeit} \cdot \text{Oberfläche}} = \frac{\text{Tiefe}}{\text{Zeit}}$
 - zertrümmertes Gestein: Regolith („Gesteinsdecke“), 6–12 m Dicke auf dem Mond
 - Material: Gestein aus Kruste (und Mantel), \curvearrowright überwiegend Silikate (für erdähnliche Planeten), dazu Glas (aus Schmelze)
 - Brazilian Nuts Effect:



große Steine steigen beim Rütteln nach oben

- aus Kraterzählung Größenverteilung der Impaktoren bestimmbar
- nach Datierung auch zeitliche Entwicklung ableitbar

(e) Risiken für verschiedene Impaktorgrößen:

- 1... 10 km: Verdunklung durch staubige Atmosphäre; Hunger;
 - 10... 100 km: global Brände durch erhitzte Atmosphäre; chemische Umwandlungen;
 - 100... 1000 km: signifikante Mengen Wasser verdampft; Atmosphäre auf > 1000 K;
 - 1000+ km: Kruste aufgeschmolzen; Leben ausgelöscht; flüchtige Elemente verschwunden; ggf. Bildung eines Mondes aus Fragmenten;
- aber: selbst ein Impaktor mit $R = R_{\oplus}$ könnte die Erde nicht völlig zerstören, sondern würde eher zu einem Massenzuwachs führen