

Klimatologie

Wetter: Gesamtzustand der Atmosphäre an bestimmtem Ort zum bestimmten Zeitpunkt (Momentanzustand der Atmosphäre)

Witterung: Längerer Zeitabschnitt (einige Tage - wenige Wochen) mit einheitlichem Grundcharakter der kurzfristigen Wetterentwicklung (über größeren Raum)

Klima:

- **Klassische Klimatologie:** Klima (eines Ortes) als mittlerer Zustand der Atmosphäre über längeren Zeitraum (z.B. Mittelwert aus 30-jährigen „Normalperioden“)

- **Synoptische Klimatologie:** Klima als Ergebnis der Abfolge typischer Witterungslagen während eines längeren Zeitraums in charakteristischer Häufigkeitsverteilung

- **Dynamische Klimatologie:** Klima als „klimatischer Zustand“ in problembezogenen Zeiteinheiten (einzelne Monate, Jahreszeiten, Jahre, Jahreszusammenfassungen) innerhalb des langperiodischen Teils des atmosphärischen Variabilitätspektrums: Keine Fixierung auf Zeitintervalle

Räumliche Differenzierungen:

- **Makroklima:** von großräumlichen Bewegungsvorgängen in Atmosphäre (Allgemeine Zirkulation) bestimmt

- **Mesoklima:** von Geländeformen und Beschaffenheit der EOF geprägt (Bsp.: Stadtklima)

- **Mikroklima:** von kleinräumigen Wirkungen der EOF geprägt („Klima der bodennahen Luftsicht“)

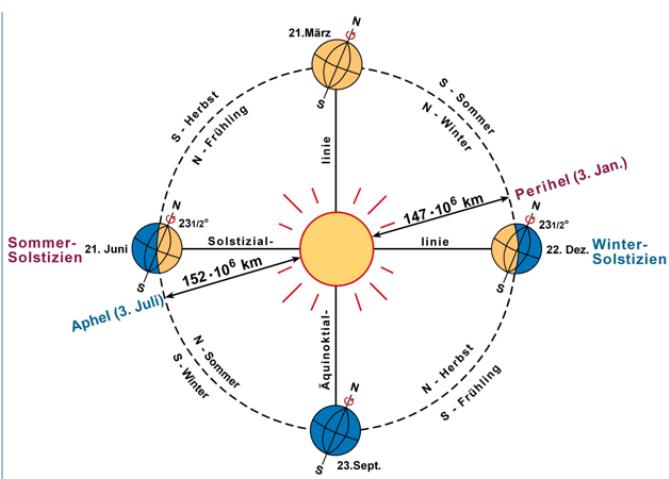
Dimension	Erstreckung	Bsp.	Lebensdauer
micro-scale	lokal (Einfluss von EOF und Vegetationsbedeckung)	bodennahe Turbulenzen	Minuten
meso-scale	einige 10km	Unwetter-Zelle	einige Stunden
synoptic-scale	einige 1000km	Druckgebiete	einige Tage
planetary-scale	5000 – 10000km	großräumige Wellen	einige Wochen

Klimaelement: Physikalisch messbare Erscheinung in Atmosphäre (z.B. Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag ...)

Klimafaktor: eine das Klima beeinflussende Größe (z.B. geographische Breitenlage, Kontinentalität, Relief, EOF-beschaffenheit (Vegetation, Boden))

Hauptkomponenten:

- Atmosphäre → Interne Wechselwirkungen (El Nino: Wechselwirkung Ozean Atmosphäre)
- Reliefsphäre
- Hydrosphäre
- Biosphäre → Externe Einflüsse (Anthropogen, Veränderung der Insolation, ...)
- Kryosphäre

1. Astronomische Grundlagen

- **Perihel:** Sonnennächster Punkt (03.01.)
- **Aphel:** Sonnenfernster Punkt (03.07.)
- **Äquinoktien:** Tag - und Nachtgleiche (21.03. und 23.09.)
- **Erdrotation:** → Beleuchtungstageszeiten (Tag und Nacht)
- **Erdrevolution und Ekliptikschiefe:** Beleuchtungsjahreszeiten und Solarklimatisierung der EOF
- **Exzentrizität:** Erdumlaufbahn schwankt von kreis- zu ellipsenförmig (Periode: 95000 a)
- **Präzessionsbewegung:** Aphel und Perihel schwanken (p:20000 a)
- **Obliquität:** Änderung der Schiefe der Ekliptik (p: 41000 a), derzeit 23,5 Grad: nördlicher und südlicher Wendekreis, 90-23,5: 66,5: Polarkreise
- **Solstitium:** Sonnenwende, Sonne erreicht höchsten/tiefstenPunkt (21.06. und 22.12.)
- **Milankovic Zyklus:** Exzentrizität, Präzession, Obliquität

- **Arid:** in 0-2 Monaten NS > Verdunstung

- **Semi-arid:** in 3- 5 Monaten NS > Verdunstung

- **Semi-humid:** in 6-9 Monaten NS > Verdunstung

- **humid:** in 10- 12 Monaten NS > Verdunstung

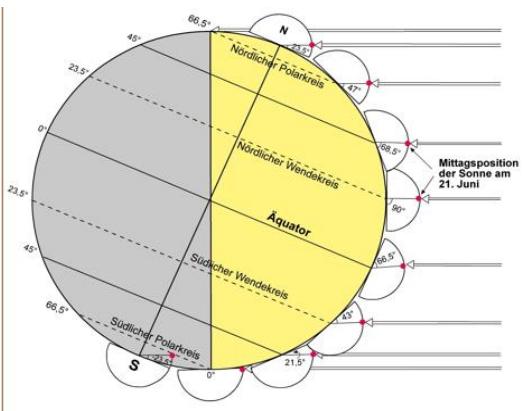
2. Zusammensetzung und Aufbau der Atmosphäre

„**Solarkonstante**“: (senkrechter, durchschnittlicher Strahlungseinfall an Obergrenze der Erdatmosphäre)

$$S_0 \approx 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Gesamtstrahlung abhängig von:

- Strahlungsintensität: $s = S_0 \times \sin\alpha$ (Einfallsinkel)
- Dauer der Bestrahlung (Tageslänge)

Sonneneinstrahlung der Welt:

- Polarkreis: 1 Mal pro Jahr Polarnacht/-tag

- Pol: Halbes Jahr lang Polartag/-nacht

Solare Beleuchtungszonen der Erde

Solarklimatische Zonierung:

Solarklimatische Tropen	Gebiet zwischen den Wendekreisen	1-2 maliger Zenitstand der Sonne pro Jahr
Solarklimatische Mittelbreiten	Gebiet zw. Wendekreisen und Polarkreisen	weder Zenitstand noch Polartag/Polarlicht
Solarklimatisches Polargebiet	Gebiet polwärts der Polarkreise	Polartag und Polarlicht

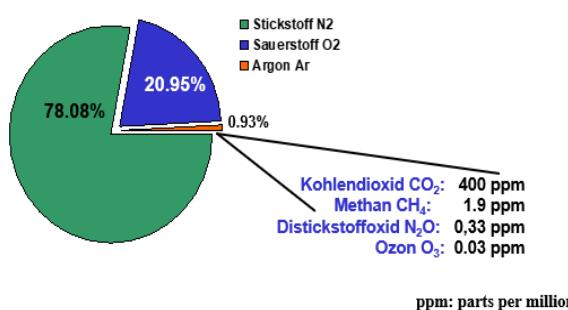
- Sonne wandert zwischen den Wendekreisen

Wetter in hohen Mittelbreiten:

- Hochsommer, Hochwinter, ausgeprägte Übergangsjahreszeiten
- Hochsommer mit sehr langen Tagen und hoher Mittagssonne
- Hochwinter mit sehr kurzen Tagen und niedriger Mittagssonne

Wetter in niederen Mittelbreiten:

- Hochwinter fehlt
- Winter: relativ lange Tage und gemäßigt niedrige Mittagssonne
- Sommer mit sehr hoher Mittagssonne, aber relativ langer Nacht

Atmosphäre Zusammensetzung:

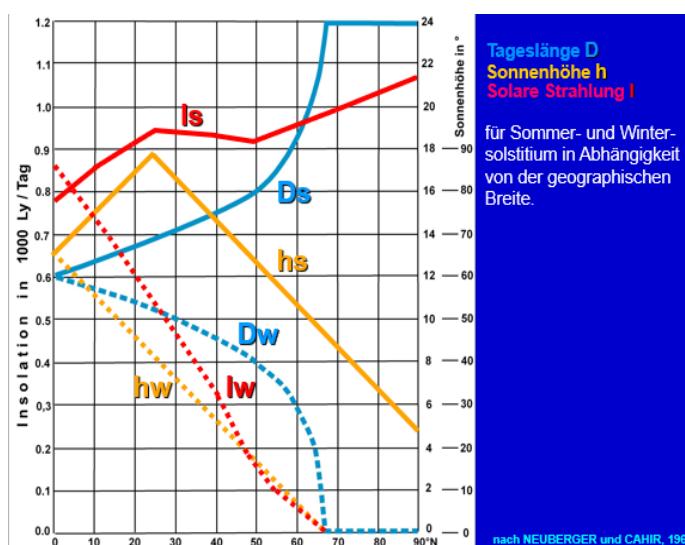
- Aerosole: Luftgetragene feste oder flüssige Teilchen (z.B. Feinstaub)

- Ozon in 20-30km Höhe: 10 ppm

- Wasserdampf (wirkt ähnlich wie CO₂)

- CO₂ in den letzten 250 Jahren von 260 ppm auf über 400 ppm gestiegen

→ Spurengase: Großer Einfluss auf Strahlungshaushalt und Treibhauseffekt

**Berechnung von solarer Strahlung:****Solare Strahlung I:**

Polwärtiger Anstieg: Gering durch ITC (hohe Rückstrahlung), dann Anstieg zum subtropischen Hochdruckgürtel (Wendekreise) hin, Abnahme bei Mittelbreiten (höhere Wolkenbildung und geringerer Sonnenwinkel, Anstieg der Strahlung durch Anstieg der Tageslänge)

Tageslänge D:

Polartag/-nacht ab 65 Grad, Äquator: 12/12: Tageszeitenklima: dazwischen Zu- und Abnahme

Sonnenhöhe H: Maximum: 23,5 Grad: Sommersolstitium (Zenitstand der Sonne), Sonne steht polwärts flacher: Grund für polwärtige Abnahme: „Schieflage“ der Erde

- **Peplosphäre** (Reibungsschicht, bounder layer): bis ca. 2-3 km über EOF
- Merksatz: **Trixi staunte, als ich meine Thermosflasche exte.**
- Radius der Atmosphäre: ca. 1000 km
- Nur EOF erwärmt sich durch Strahlung
- Pausen benannt nach Unterem
- Luftausdehnen: kältere
- Luftzusammendrücken: wärmer
- je weiter oben desto weniger Luft liegt auf: Druck sinkt: kälter
- Hohe Temperatur in **Stratopause**: Ozonschicht absorbiert UV-Strahlung
- Niedrige Temperatur in **Mesopause**: Ozonschicht weiter weg + Druck sinkt
- Hohe Temperatur in **Thermosphäre**: schnelle Atome (hohe Temperatur) + energiereiche Strahlung (z.B. Gamma) absorbiert

3. Strahlungs- und Energiehaushalt

Selektive Absorption: Absorptionsbanden: (Strahlungsextinktion)

Ozon:	0.2 – 0.31	(0.28 – 0.32: UV-B)	
	bei 9.6		
H ₂ O:	2.5 – 3.0	5 - 8	> 14
CO ₂ :	bei 2.5	bei 4.2	bei 15
CH ₄ :	bei 3.0	bei 7.5	
N ₂ O:	bei 4.5	bei 7.5	

- Absorptionsbanden:

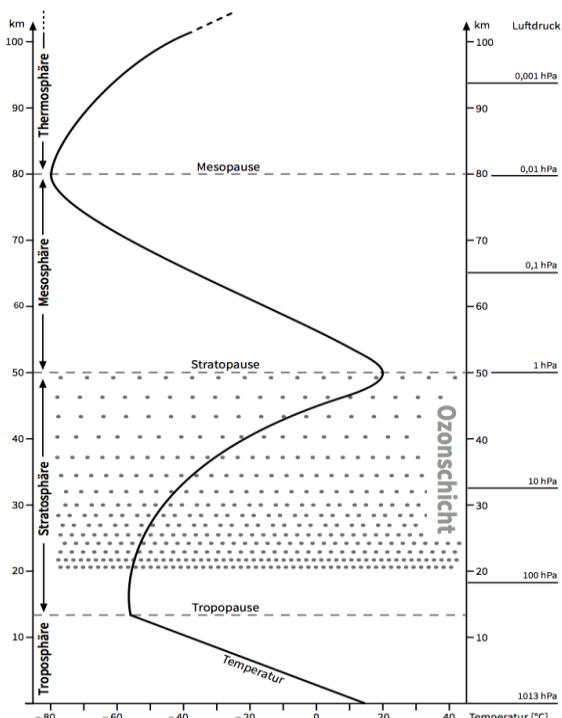
Wellenlängen, in denen Gase auf sie treffende Strahlung absorbieren (v.a. Ozon, CO₂, Wasserdampf)

- Sonnenstrahlung: 0,1 - 5,0

- Erdausstrahlung: 3,0 - 60

- Sichtbares Licht: 0,38- 0,76

(rot: lange Wellenlänge: wenig Energie, blau: kurze Wellenlänge, viel Energie)



Atmosphärisches Fenster:

Spektralbereiche, innerhalb derer Atmosphäre für solare Ein-/ terrestrische Ausstrahlung durchlässig ist (Wellenlängen, die in Atmosphäre eindringen): Strahlungsabsorption durch Wasserdampf, CO₂ und Ozon besonders gering

Diffuse Reflexion nach Rayleigh in „reiner“ Luft (streuende Teilchen):

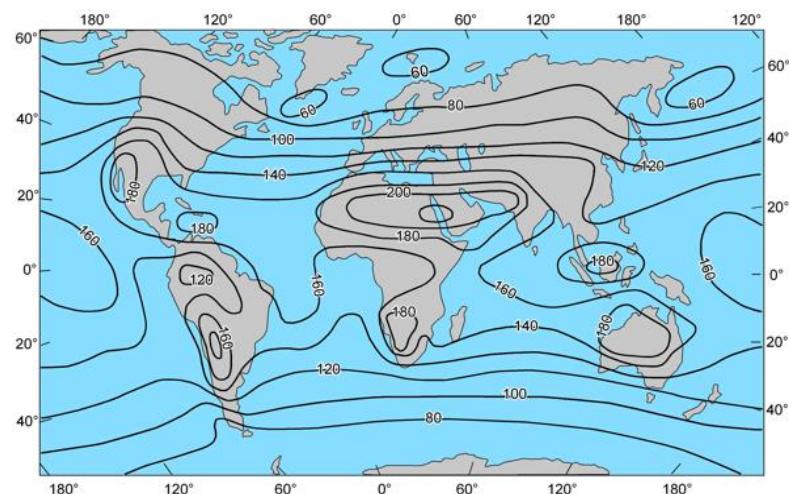
$$Str = \frac{k}{\lambda^4}$$

Str: molekularer Streuungskoeffizient
 Lambda: Wellenlänge
 k: Proportionalitätskonstante

- Diffuse Reflexion für blauen Himmel und Morgen-/Abendrot verantwortlich
- kurzwellige Strahlung stärker gestreut als langwellige: abhängig von Weglänge durch Atmosphäre
- weiße Wolken: **Mie-Streuung** an Tropfen oder Aerosolteilen: alle Wellenlängen gleich gestreut
- Je kürzer Welle, desto größer diffuse Reflexion
- Diffuse Himmelsstrahlung: Streuung/Reflexion/Absorption an verschiedenen Teilen der Atmosphäre

Globalstrahlung: Summe aus direkter Sonneneinstrahlung S und diffusem Himmelslicht H

- kcal/m²/a
- Wendekreis: wenig Vegetation: wenig Verdunstung: wenig Bewölkung: hohe direkte Einstrahlung
- Äquator: hohe Vegetation: „: wenig direkte Einstrahlung
- Zunehmende Breite: Abnahme der Globalstrahlung (Einstrahlungswinkel sinkt)
- keine breitenkreisparallele Abnahme
- Kontinente: wenig Feuchtigkeit: siehe Wendekreis
- Ozeane: viel Feuchtigkeit: siehe Äquator



Albedo:

- Verhältnis reflektierter zu einfallender Strahlung (30% Albedo: 30% reflektiert, 70% absorbiert)
- hohe Albedo: hohe Reflexion
- Niedrige Albedo: Hohe Absorption
- Planetarische A. (30%) = Atmosphärische A. (an Wolken z.B.) + A. der EOF
- Saisonale Variabilität: Winter → Sommer: Erwärmung der EOF: Schnee schmilzt: Albedo sinkt: mehr Aufnahme von Strahlung: Erwärmung der EOF → Selbstverstärkender Prozess

Wirkung absorbierter Energie je nach:**Thermische Ausgleichswirkung von Wasserkörpern**

	spezifische Wärme [J*g^-1*K^-1]	Wärmeleitfähigkeit [J*s^-1*m^-1*K^-1]
Luft	1.0	0.02
Wasser	4.18	0.60
Eis	2.1	2.10
Holz	1.3	0.10 – 0.20
Humus	1.7	1.30
Sand (trocken)	0.8	0.35
Sandstein	0.7	1.60 – 2.10
Granit	0.8	2.10 – 2.90
Beton	0.9	1.00 – 1.30

- Land erwärmt/kühlt stärker ab als Wasser (Viel Energie zum Erwärmen von Wasserkörpern)
- Geringer Oberflächenwärmegewinn:
- Große spezifische Wärme
- Verteilung der Absorptionsenergie auf relativ großes Volumen
 - Eindringtiefe der Einstrahlung
 - turbulente Durchmischung (des Aggregatzustandes)
- Geringe Abkühlung:
- Vergleichsweise geringe (temperaturabhängige) Ausstrahlung von Wärme
- Allmählich Zufuhr gespeicherter Energie (Wasser: guter Wärmespeicher)

Stefan-Boltzmann-Gesetz: (Abgegebene Strahlung hängt von Temperatur ab)

$$E = \sigma * \varepsilon * T^4$$

E: Ausstrahlung
T: abs. Temperatur des ausstrahlenden Körpers
σ: Stefan-Boltzmann-Konstante
ε: Emissionsvermögen (= Absorptionskoeffizient)

- Emissionsvermögen: Höhe der Albedo (Rückstrahlung) eines Körpers
- E steigt mit T an
- Jeder Körper mit bestimmter Temperatur sendet Strahlung aus (Hellstes sendet am meisten Strahlung aus, je heißer, desto mehr Strahlung)

Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\max} * T = \text{const.}$$

λ_{max}: Wellenlänge maximaler Energie
T: abs. Temperatur des ausstrahlenden Körpers

- λ_{max} = b/T (b: Wiensche Verschiebungskonstante)

Strahlungsbilanz Q:

$$Q = (S + H) * (1 - a) - E + G_A$$

S: Direkte Sonnenstrahlung
H: Diffuse Himmelsstrahlung
a: Albedo
E: Terrestrische Ausstrahlung
G_A: Atmosphärische Gegenstrahlung

- S + H: Globalstrahlung
- E wird an Atmosphärenbestandteilen absorbiert und re-emittiert → G_A: (Treibhauseffekt)
- E - G_A: Effektive terrestrische Ausstrahlung (direkt zurück ins All)
- (1-a): Teil der absorbiert wird
- nicht ausgeglichen: erst durch Wärmeströme

Bowen-Verhältnis:

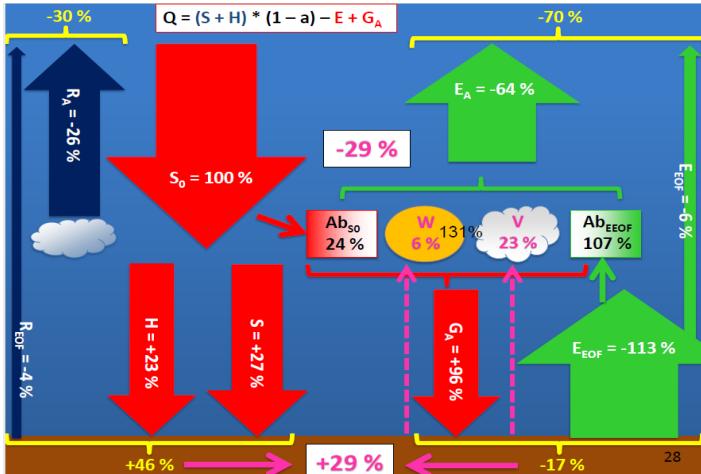
$$\beta = \frac{F}{L}$$

Verhältnis von sensibler Wärme (F) zu latenter Wärme (L): wie viel Wärme jeweils für Erwärmung und Verdunstung aufgewendet wurde

Bowen-Verhältnis (Bo) für diverse Oberflächen:

- hoch bei Trockengebieten
- niedrig bei Ozeanen
- Bo > 1 = Erwärmung überwiegt
- 0 < Bo < 1 = Verdunstung überwiegt
- Nachts kann über unversiegelten Oberflächen das Bo auch negativ werden

Oberfläche	Bo
Mittel Ozeane	0,14
Mittel Festland	0,84
globales Mittel	0,2
humide Gebiete und bewässerte Landwirtschaftsflächen	
Grasland	0,2
Wälder	0,5
Städte	1,0
semiaride Gebiete	1,5
Wüsten	5
	10



-AbEOF: 107 % Absorption durch bestimmte Spurengase

-EA: 64 % Ausstrahlung der absorbierten Energie ins All

-GA: 96 % Atmosphärische Gegenstrahlung der absorbierten Energie (Stefan- B.: Viel Energie = viel Ausstrahlung)
→ Insgesamt: -17 % an der EOF

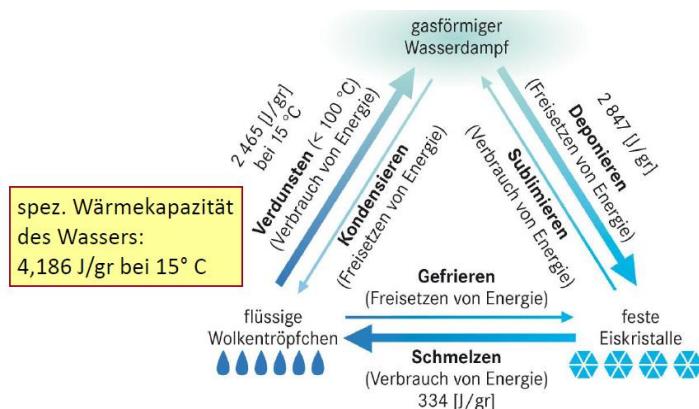
$96 + 64 - 131 = -29$: Atmosphäre strahlt mehr Energie aus als vorhanden: Energiedefizit

→ EOF: +46 % -17 % = 29%:

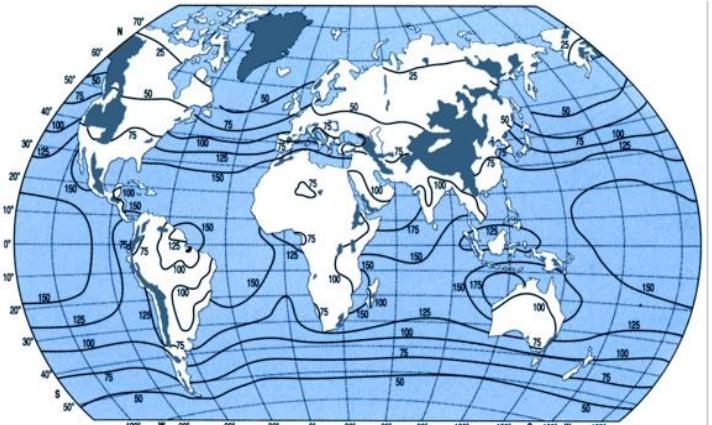
Energieausgleich von EOF und Atmosphäre durch:

- **W:** 6 % sensibler Wärmestrom: Aufheizung der Atmosphäre durch ausgestrahlte Wärme (Temperaturanstieg)
Beispiel: Wenn der sensible Wärmestrom stärker ist, wird statt 20 beispielsweise 25 °C angezeigt
- **V:** 23 % latenter Wärmestrom: Energie, die bei der Verdunstung von Wasser (Sublimation) aufgenommen wird und bei Kondensation (Resublimation) frei wird (Energie im Wasserdampf „gespeichert“)

Aggregatzustände:



Strahlungsbilanz



Monatsmittelwerte der Strahlungsbilanz:

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
N90	-2,5	-2,6	-1,6	0,3	3,6	6,2	6,4	3,8	0,2	-2,4	-2,7	-2,7
60	-1,6	-0,8	0,5	2,4	5,6	7,9	7,3	5,5	2,8	0,0	-1,2	-1,7
50	-0,9	0,1	1,8	5,0	7,0	7,6	7,3	5,8	4,0	1,6	-0,4	-1,0
40	0,9	2,3	4,4	7,1	8,3	8,7	8,8	8,0	6,1	3,7	1,6	0,6
30	3,3	4,9	6,8	8,6	9,6	10,1	10,4	9,7	8,3	6,2	3,9	3,0
20	6,1	7,8	9,3	10,2	10,7	10,6	10,4	9,7	9,3	8,5	6,7	5,7
10	7,6	9,0	10,0	9,9	9,6	8,9	8,8	8,7	8,7	8,8	8,0	7,5
0	8,3	8,8	9,1	8,7	8,4	8,3	7,9	8,3	8,9	9,2	8,7	8,5
10	10,1	10,2	9,5	9,0	7,9	7,3	7,1	8,1	9,2	10,0	10,1	10,1
20	11,1	10,6	9,4	7,7	5,9	5,0	5,3	6,5	8,1	9,4	10,6	11,1
30	11,5	10,1	8,2	5,7	3,7	3,0	3,4	4,7	6,6	8,3	10,2	11,7
40	10,8	8,3	6,2	3,7	1,5	0,9	1,6	2,9	4,8	6,8	9,4	11,2
50	7,8	5,9	3,8	1,8	-0,4	-0,8	-0,3	0,7	2,9	5,1	7,5	8,4
60	7,0	5,0	2,9	1,0	-1,5	-2,3	-2,2	-1,1	1,2	4,0	7,0	7,5
S90	2,4	0,5	-0,4	-1,6	-1,9	-2,0	-2,0	-1,7	-1,3	-0,6	0,6	2,2

Energiebilanz:

$$Q + A = W + V + Sp + Ph$$

- Q:** Strahlungsbilanz
A: Anthropogener Wärmestrom
W: Fühlbarer Wärmestrom
V: Latenter Wärmestrom
Sp: Speicherterm
Ph: Photosynthese

- 1 % der Energie fließt in Vegetation, Großteil reflektiert / in Form von Wasserdampf gespeichert
- Speicherterm = Im Boden/Meer gespeicherte Energie (Bodenschichten)

- kleine Strahlungsbilanz: große terrestrische Ausstrahlung
- größte jahreszeitliche Unterschiede in den Mittelbreiten

Anthropogene Modifikationen des Strahlungs- und Energiehaushalts:

- **Stratosphärischer Ozonabbau** (durch FCKW, Halone u.a.)
Auswirkungen auf: Absorption des einfallenden Sonnenlichts durch Ozonabbau (dadurch Auswirkung auf die Erdstrahlung)
- **Erhöhung der Aerosolkonzentration** (z.B. Sulfat-Aerosole, ...)
Auswirkungen auf: Erhöhung der Reflexion der Atmosphäre, Erhöhung der Absorption von einkommender Einstrahlung, Veränderung der Einstrahlung (der diffusen und der direkten)
- **Landnutzung des Menschen** (z.B. Abholzung von Waldregionen, Landwirtschaftsnutzung durch künstliche Bewässerung, ...)
Auswirkung auf: Reflexion der Erdoberfläche, Ausstrahlung der Erdoberfläche, latenter Wärmestrom, sensibler Wärmestrom
- **Städtische Baukörper**
Auswirkungen auf: Reflexion und Emission der Erdoberfläche, latenter Wärmestrom, sensibler Wärmestrom, Speicherterm
- **Freisetzung strahlungswirksamer Spurengase**
Auswirkungen auf: Absorption durch Spurengase, Gegenstrahlung der absorbierten Energie

Treibhauseffekt:

- Einfallende Strahlung (kurzwellig) gelangt zum großen Teil ungehindert an EOF
- Emittierte Strahlung von EOF (langwellig) wird zum größten Teil von atmosphärischen Spuren-gasen absorbiert und gelangt als atmosphärische Gegenstrahlung wieder in bodennahen Bereich
- Treibhauseffekt lässt sich unterteilen in:
 - Natürlich bedingt
 - Anthropogen verstärkt
- Natürlicher Treibhauseffekt: Erde um 30°C wärmer (anthropogener Treibhauseffekt: 0.7-1.01 °C)
- Klimawirksame Gase: H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CH₄

4. Lufttemperatur

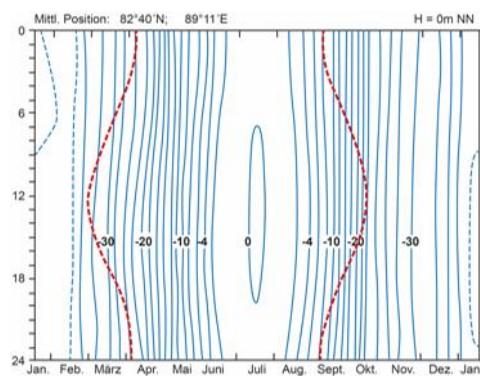
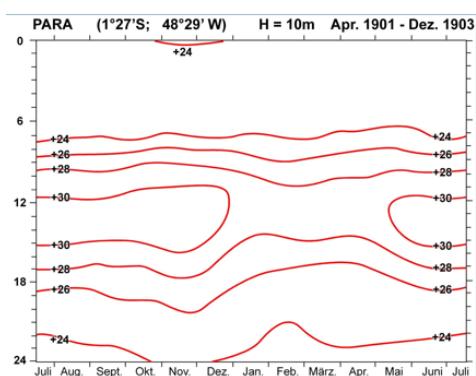
- Maß für Wärmezustand der Luft (Kelvin: -273 Grad Celsius = 0K, K = Grad C + 273)
- Maß für Gesamtheit der molekularen Bewegungsenergie

Messvoraussetzungen:

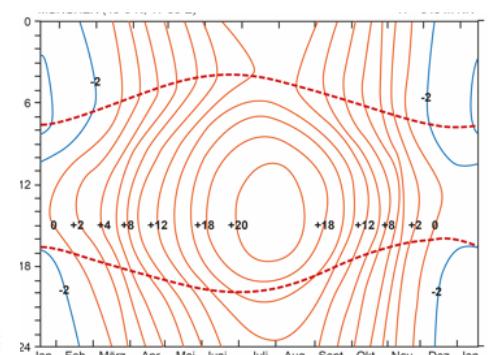
- Außerhalb der bodennahen Luftschicht
- Strahlungsschutz (Schatten)
- Ventilation

Thermoisoplethen-Diagramme:

- Isoplethen: graphische Abbildung eines Wertefeldes
- Klimadiagramm (für Temperaturwerte) (Anzeigen der Tages- und Jahresdurchschnittstemperaturen)

Aquatoriales Klima (Brasilien, Tageszeitenklima)

Subozeanisches Klima der feuchten Mittelbreiten
(München, Jahreszeitenklima)



- Kleine Kreise: am wärmsten

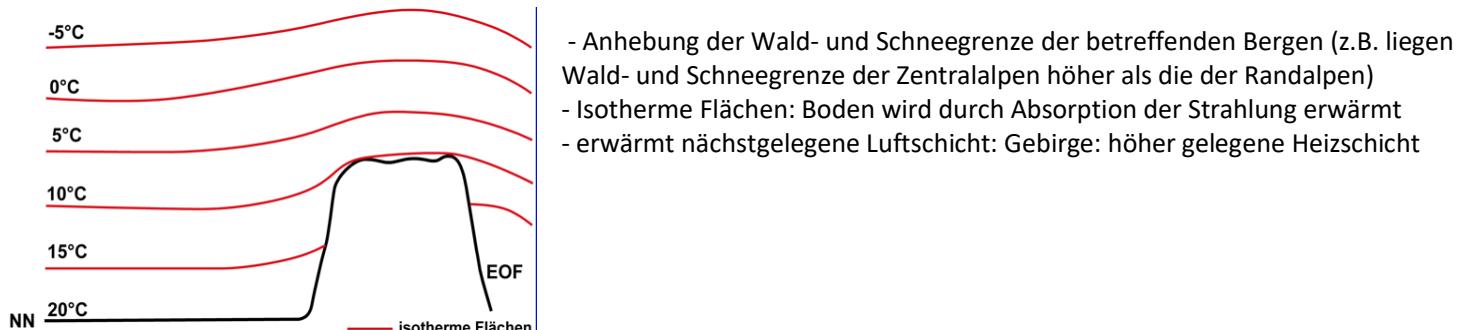
- Gestrichelte Linie: Sonnenauf-/untergang

Polares Klima (Nordpolarmeer, Jahreszeitenklima)

Hypsometrischer Temperaturgradient

- Maß für vertikale Temperaturabnahme
- Meist zwischen 0.5 und 0.8 °C pro 100m
- Ursache: Atmosphäre wird primär von Unterlage aus (EOF) aufgeheizt

Effekt der hochgelegenen Heizfläche („Massenerhebungseffekt“):



5. Luftdruck

- Kraft, die die Atmosphäre oberhalb eines bestimmten Niveaus pro Fläche ausübt
- 1 hPa = 100 Pa = 100 N*m^-2
- Durchschnittlicher Bodenluftdruck im Meeressniveau (SLP: sea level pressure): 1013 hPa
- In ca. 5,5 km Höhe über NN: 500 hPa

Psychrometrische Differenz:

- Differenz zwischen Trocken- und Feuchttemperatur
- Warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen
- Ab 100% relativer Luftfeuchtigkeit: Kondensation (Kondensationsniveau)

Barometrische Höhenformel: (Hydrostatische Grundgleichung)

- Luftdruck nimmt in kalter Atmosphäre mit zunehmender Höhe schneller ab als in warmer
- Je höher Ausgangsluftdruck, desto größer vertikale Luftdruckabnahme: (Druckabnahme bodennah schneller)
- Bestimmung des Drucks in vorgegebenen Höhen
- Bestimmung der Höhendifferenz zwischen zwei Druckniveaus
- Bei gleichem Druck am Boden:
- Durch Kaltluft in höheren Schichten: relativ tiefer Druck in Bodennähe (mit zunehmender Höhe nimmt Druck proportional ab)
- Höhentief (Ein in den höheren Luftschichten liegendes Tiefdruckgebiet)
- Durch die Warmluft herrscht in der Höhe ein relativ hoher Druck vor
- Höhenhoch (äquivalent zum Höhentief)

Zustandsgleichung idealer Gase (Boyle – Mariotte – Gay – Lussac):

Volumen eines Gases ändert sich bei 1°C Temperaturänderung um 1/273 seines Volumens beim Ausgangsgrad von 0°C

$$p \cdot V = T \cdot R$$

p:	Druck
V:	Volumen
T:	absolute Temperatur
R:	Gaskonstante

6. Luftfeuchtigkeit

- Anteil des Wasserdampfes am Luftgemisch
- **Sättigungsdampfdruck** (temperaturabhängig): Maximale Menge an Wasser, die Luftpaket aufnehmen kann (temperaturabhängig)
- **Taupunkttemperatur**: Temperatur, bei der (in sich hebender Luft) Kondensation einsetzt
- **Kondensationsniveau**: zugehörige Höhe
- **Evapotranspiration**: Gesamtverdunstung:
- **Evaporation**: Verdunstung freier Wasserflächen oder unbewachsener OF
- **Transpiration**: Verdunstung durch Lebewesen (Pflanzen)
- **Interzeption**: Verdunstung pflanzlicher OF

Dampfdruck e: Partialdruck des Wasserdampfs [hPa]

Taupunkttemperatur t: Temperatur, bei der der tatsächliche Dampfdruck (e) dem Sättigungsdampfdruck (E) entspricht

Sättigungsdefizit: E - e

relative Luftfeuchtigkeit: (e/E) * 100 [%]

absolute Luftfeuchtigkeit: Wasserdampfmasse pro Luftvolumen [g/m³]

spezifische Feuchte: Wasserdampfmasse pro Masse feuchter Luft [g/kg]

Mischungsverhältnis: Wasserdampfmasse pro Masse trockener Luft [g/kg]

Feuchttemperatur: Temperatur an befeuchtetem Fühler

- **Absolute Feuchte:** Gewicht des Wasserdampfs pro Kubikmeter Luft (Luftdruckabnahme: Verteilung auf größeres Volumen und umgekehrt)
- **Relative Feuchte:** Verhältnis wirklich vorhandener zu maximal möglicher Dampfdruck
- **Spezifische Feuchte:** Gewicht des Wasserdampfs pro kg feuchte Luft

7. Verdunstung

Verdunstungsberechnung:

abhängig von:

- Verfügbarer Strahlungsenergie
- Wassertemperatur
- Lufttemperatur
- Sättigungsdefizit
- Windgeschwindigkeit
- Erdoberflächenbeschaffenheit
- Vertikalem Temperatur- und Druckgradient
- Verdunstung = Niederschlag – Abfluss

Verdunstungsformel (nach HAUDE)

$$V = k * (E - e) = k * E * \left(1 - \frac{RF}{100}\right)$$

8. Humidität und Aridität

- Humidität:

Grad an Feuchtigkeit (mehr Niederschlag als Verdunstung)

- Aridität:

Grad an Trockenheit (weniger Niederschlag als Verdunstung)

Luftbewegungen

weltweit auftretende Strahlungsunterschiede der Solarstrahlung (Hohe Einstrahlung am Äquator und geringe Einstrahlung an den Polen): globaler Austauschprozess der Luftbewegungen

- Meridional: N/S: Längenkreisparallel
- Zonal: W/O: Breitenkreisparallel

9. Horizontale Luftbewegungen (Horizontale Luftdruckgradienten lösen Luftbewegungen aus)

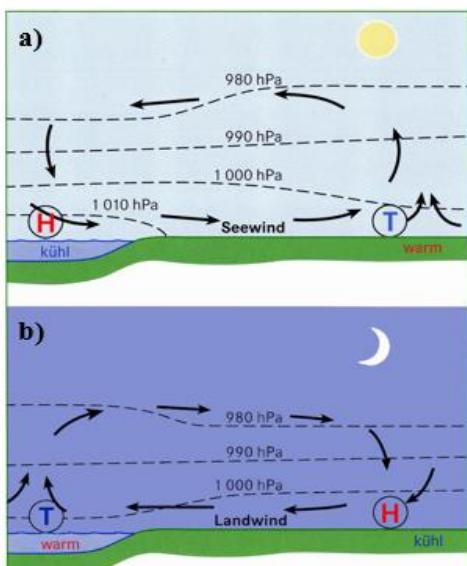
Kleinräumige Luftbewegungen (Regional entstehende Luftbewegungen): Thermische Druckgebilde

- Einfluss der Erdrotation unberücksichtigt
- Ursache: direkte thermische Ausgleichszirkulation
- Äquator: Höhe Hochdruckgebiet: bodennahes Tiefdruckgebiet (erwärmte Luftmassen steigen auf)
- Pol: Höhe Tiefdruckgebiet: bodennahes Hochdruckgebiet (kalter Boden: bodennahe Luftsichten kalt: Absinken von Luft)

Land-See-Windsystem:

- Tagesperiodisch

- Vertikalstreckung ca. 0.5 - 2 km, Horizontalstreckung bis ca. 30 - 100 km



Tags heizt sich (thermische Konvektion: Abgabe von thermischer Energie vom Untergrund an bodennahe Luftsichten) Luft über Land stärker auf (thermische Ausgleichswirkung von Wasserkörpern): Ausdehnung und Aufstieg der bodennahen Luftsichten
 → Hochdruckgebiet über Land + Tiefdruckgebiet über Meer
 → Nachströmen von Luft aus seewärtigen Regionen

Nacht: Wasser speichert Wärme länger („“)
 → Luft steigt auf (bodennahes Tief)
 → Nachströmen von Luft vom Land
 → umgekehrte Verhältnisse

Urbane Flurwinde:

- Thermische Ausgleichsbewegung
- Stadt erwärmt sich schneller als Umland (höherer Speicherterm)
- Hochdruckgebiet in Höhe über Stadt (wärmer), bodennahes Hoch im Umland und Tief in der Stadt
- urbane Flurwinde (ganztägig): lufthygienisch, vom Land in die Stadt

Berg-Tal-Wind:

- Gebirge: hochgelegene Heizfläche: tagsüber stärkere Luftdruckabnahme: Hangauf-/ Talwind
- Nachts: Umkehrung: kalter Fallwind

Großräumige Luftbewegungen:**Einfluss der Erdrotation:**

- **Mitführungsgeschwindigkeit:** (Geschwindigkeit, das Objekt auf Erde erfährt, Luftpaket nimmt beim Transport Ausgangsgeschwindigkeit mit)

→ Abhängig von geographischer Breite.

- Äquator: 1670 km/h
- 60° Breite: 835 km/h
- Pole: 0 km/h

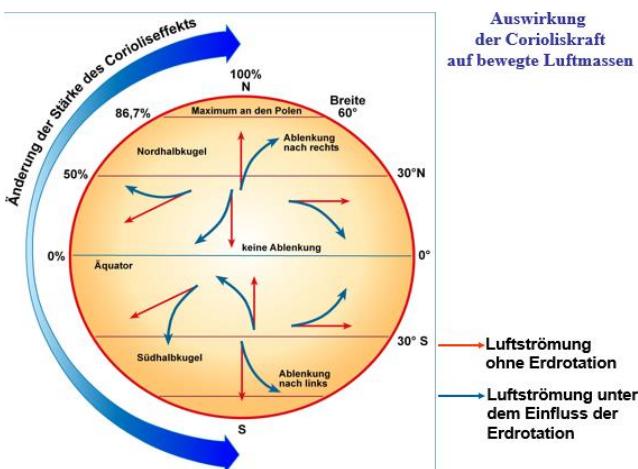
$$V_\phi = \frac{2\pi * R * \cos\phi}{1d} = \omega * R * \cos\phi$$

R: Erdradius
φ: geograph. Breite

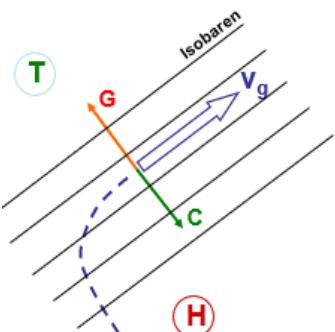
- **Winkelgeschwindigkeit:**

$$\omega = \frac{2\pi}{1d}$$

- **Coriolisbeschleunigung:** Ablenkende Kraft der Erdrotation in Folge von Massenträgheit gegenüber unterschiedlichen Mitführungsgeschwindigkeiten

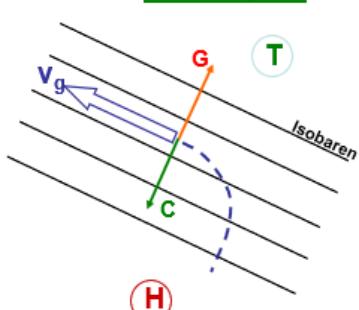


- Breitenabhängigkeit (am Äquator: 0, nimmt zu den Polen hin zu)
- nimmt mit der Eigengeschwindigkeit zu
- wirkt erst über große Entfernungen ($c=2w \times \sin \phi \times v$)

Geostrophischer Wind:**Nordhemisphäre**

G: Druckgradientenkraft

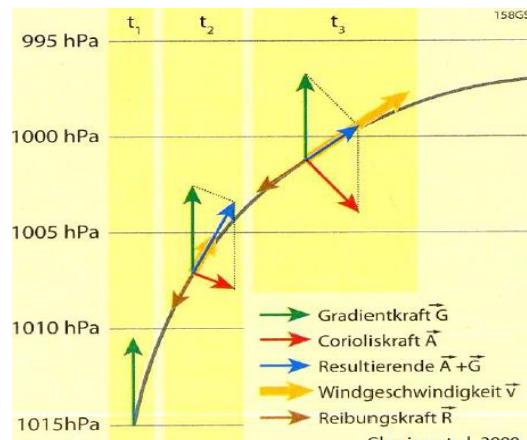
C: Corioliskraft

Südhemisphäre

- Zonale Luftbewegung: Verstärkte Zentrifugalbeschleunigung bei Westwinden, abgeschwächte bei Ostwinden
- je größer G (kleine Luftdichte/ geographische Breite), desto größer Geschwindigkeit
- C senkrecht zur Bewegungsrichtung
- reibungsfrei: ab ca. 1500 m Höhe
- Entstehung: Luftdruckgradient: Ausgleichsströmung vom H zum T: G hebt Luftpaket und beschleunigt es nach Norden: C wirkt und nimmt zu: Luftpaket wird ständig schneller bis $C = G$: C lenkt Luftpaket so lange ab, bis es isobarenparallel weht (90 Grad Kurve): kein Druckausgleich

Geotriptischer Wind:

- Reibungseinfluss wirkt Bewegungsrichtung entgegen
- Reibungskraft (Je größer, desto mehr Ablenkung): steigt mit Geschwindigkeit:
- Corioliskraft (abhängig von Eigengeschwindigkeit) kann nie so groß werden, dass es zu einem isobarenparallelen Wind kommt (90 Grad Kurve wird nie erreicht)
- G überwiegt:
- Ablenkung zum tiefen Druck ($30 - 45^\circ$) → teilweise Druckausgleich



Geostrophisch zyklostrophischer Wind

- Ohne Reibungseinfluss, bei gekrümmten Isobaren:
 - Isobarenparallel, zusätzlicher Einfluss der Fliehkraft
- Kein Druckausgleich

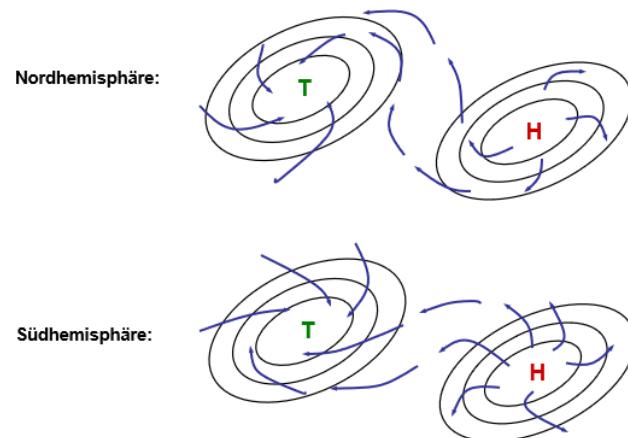
10. Vertikale Luftbewegungen:

Vertikalaufbau der reibungsbeeinflussten unteren Troposphäre:

freie Atmosphäre	isobarenparallele Strömung
Mixed Layer Ekman-Schicht	allmähliche Winddrehung und Windstärke-Zunahme
Surface Layer Prandtl-Schicht	Schubspannung dominiert
Canopy-Layer	durch Objekte eingeschlossene Lufthülle



Großräumige Luftbewegungen im bodennahen Luftdruckfeld:



Ablenkung durch Corioliskraft: Ausströmen vom H ins T
 Nordhemisphäre: gegen den Uhrzeigersinn
 Südhemisphäre: im Uhrzeigersinn

Adiabatische Zustandsänderungen:

- Volumenänderung eines Luftpaketes ohne Wärmeaustausch mit Umgebung
- Vertikale Aufwärtsbewegung: Expansion und Abkühlung der gehobenen Luft
- Grad der Abkühlung in Abhängigkeit von Aggregatzustandsänderungen des Wassers (Kondensation + Freisetzung latenter Wärme)

Ohne Aggregatzustandsänderungen: trockenadiabatisch: (1 Grad/100m)

Trockenadiabatischer vertikaler Temperaturgradient: $e < E$

= Temperaturänderung auf-/absteigender Luft ohne Verdunstung/Verdampfung

- Abkühlung beim aufsteigen

- Erwärmung beim Absinken

Mit Aggregatzustandsänderungen: feuchtadiabatisch: (0,5 Grad/100m)

- Feuchtadiabatischer vertikaler Temperaturgradient: $e = E$

= Änderung der Temperatur aufsteigender Luft, in der Wasserdampf kondensiert (Bei Kondensation wird Energie frei: wirkt Abkühlung entgegen)

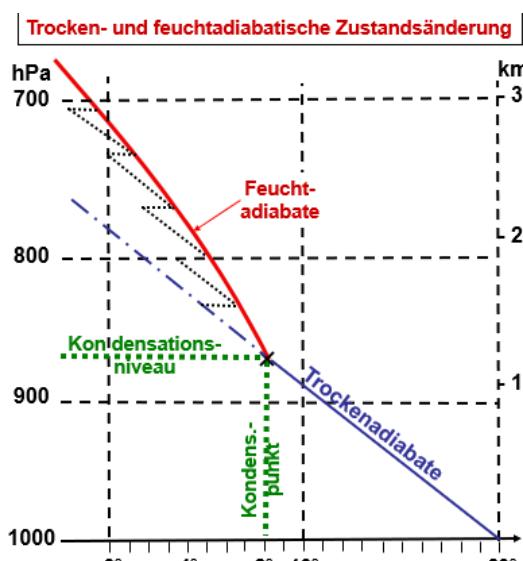
- Hohe Lufttemperatur: (warmer Klimate, untere Troposphärenschichten): feuchtadiabatischer Temperaturgradient < als trockenadiabatischer

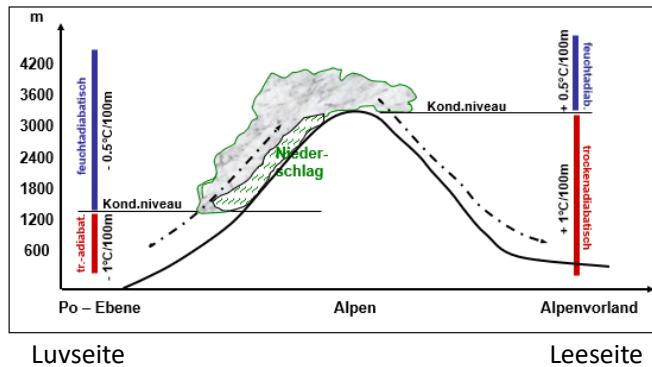
- Niedrige Lufttemperatur: (Kalte Klimate, höhere Troposphärenschichten): feuchtadiabatischer Temperaturgradient gleicht sich dem trockenadiabatischen immer mehr an

- Druck sinkt: Volumen steigt: kältere Luft → ausgedehnte Luft kühl ab

- Druck steigt: Volumen sinkt: Luft erwärmt sich → komprimierte Luft erwärmt sich

- Feuchtadiabate: sukzessive Prozesse: immer wieder schubweise Kondensation (Energie schubweise freigegeben)

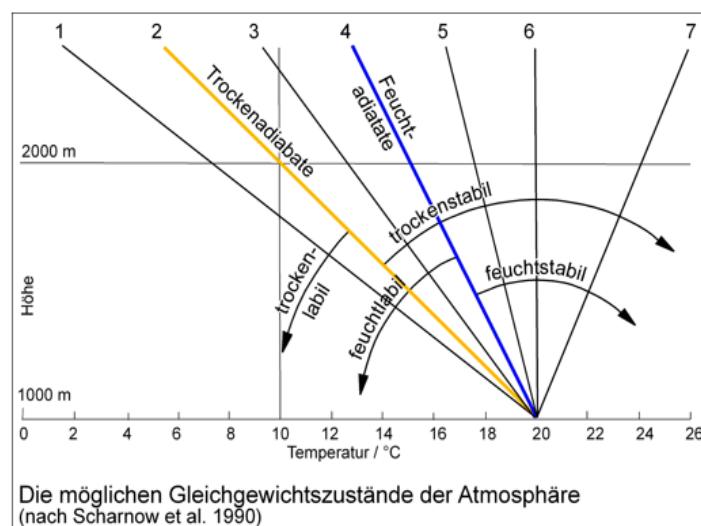




- orographisch erzwungener Aufstieg
- Luvseite: mit sinkender Temperatur kann weniger Wasser gehalten werden: Steigungsregen und Wolkenbildung: Verlust an Feuchtigkeit
- Leeseite: feuchtadiabatisch kürzer, da schon Wasser abgegeben wurde, wärmer und trockener: Kondensationswärme bei Regen freigesetzt

Gleichgewichtszustände der Atmosphäre:

- **Stabile Schichtung:** Luftpaket wird beim Aufsteigen kälter und dichter/ schwerer als Umgebungsluft und sinkt wieder zurück in Ausgangsposition (Beim Aufsteigen kälter und beim Absteigen wärmer): Adiabate verlaufen oben links + unten rechts
- **Labile Schichtung:** Luftpaket kann beschleunigt immer weiter aufsteigen (z.B. beim Aufsteigen wärmer und beim Absteigen kälter als Umgebungsluft): Adiabate verlaufen oben rechts und unten links



- Aufstieg Feucht- oder trockenadiabatisch?
- Linien: Temperatur der Umgebungsluft
- Vergleich der Lufttemperatur: → Labil oder stabil
- **Trockenstabil:** ungesättigte Luft kühlt beim Aufstieg trockenadiabatisch ab (trockenadiabatischer Gradient flacher als Temperaturgradient): gehobenes Luftpaket wird kühler als Umgebung: sinkt
- **Trockenlabil:** Luftpaket kann adiabatisch aufsteigen: wärmer als Umgebung, keine Kondensation sonst:
- **Feuchtstabil:** gesättigte Luft kühlt beim Aufstieg feuchtadiabatisch ab (feuchtadiabatischer Gradient steiler als Temperaturgradient): Luftpaket wärmer als Umgebung: steigt
- **Feuchtstabil:** Temperaturabnahme mit Höhe kleiner als feuchtadiabatischer Temperaturgradient: Luftpaket kann nicht aufsteigen: kühlt mit zunehmender Höhe schneller ab als Umgebung

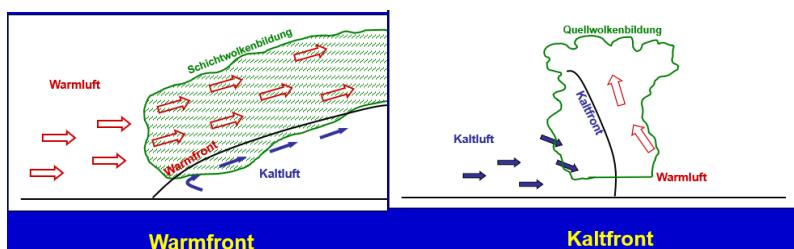
Gleichzeitig mögliche Gleichgewichtszustände:

- trockenstabil und feuchtstabil
- trockenlabil und feucht-labil

Ursachen für vertikale Luftbewegungen:

- Orographisch erzwungene Anhebung
- Verwirbelung mit einer (horizontalen) Strömung („Dynamische Turbulenz“)
(etwa durch Konfluenz oder Diffuzenz/horizontale oder vertikale Scherung)
- Konfluenz: Zusammenlaufen von Stromlinien zu einem atmosphärischen Strömungsfeld, ohne Aussagen über eine Konvergenz zu treffen
- Diffuzenz: Beschreibung der Auffächerung von Stromlinien in einem atmosphärischen Strömungsfeld, ohne Aussagen über eine Divergenz zu treffen
- horizontale/vertikale (Wind-)Scherung: die räumliche Änderung der Windgeschwindigkeit senkrecht zur Richtung
- Katabatischer Kaltluftabfluss (bei großen Eisflächen (z.B. auf Grönland, Antarktis)): abfallende Vertikalbewegung
- Advektion (warmer Luft schiebt sich über kalte Luft) unterschiedlich temperierter Luftmassen

- Erzwungener Aufstieg
- Labile Schichtung
- Aufgleitbewegung: Einbruchsprozess: →



Massengewinn bzw. Massenverlust im horizontalen Strömungsfeld:

Ausgelöst durch:

- Labile Schichtung
 - Aufheizung von der Unterlage: thermische Konvektion
 - Kaltluftadvektion in Höhe
- Kaltfront-Einbruch: erzwungene Konvektion
- Vergenzen im horizontalen Strömungsfeld
 - Konvergenz in unterer Troposphäre
 - Divergenz in oberer Troposphäre (Massenverlust in den höheren Schichten)

Durch ausgeprägte Labilität/Stabilität hervorgerufen:

- **Gewitter** (ausgeprägte Labilität, Kombination möglich):

- Luftmassengewitter („Wärmegewitter“) durch starke thermische Konvektion ausgelöst

- Frontalbewegen: Kaltfront schiebt sich unter Warmfront: intensiver Auftrieb

- Orographische Gewitter: Aufwärtskomponente zusätzlich verstärkt durch Berge

- **Inversion** (ausgeprägte Stabilität, Temperaturzunahme mit Höhe statt -abnahme, warme Luft gleitet auf kalte auf: Luftpaket kann nicht aufsteigen, Auflösung durch Erwärmung unterer Landmassen)

- Strahlungsinversion:

Abkühlung bodennaher Luftschichten durch Ausstrahlung + Wolkenarmut ohne Abkühlung höherer Atmosphärenschichten (Fehlen der terrestrischen Ausstrahlung): oben wärmere Luft

- Aufgleitinversionen:

Warmluftmasse gleitet auf eine Kaltluftmasse (z.B. Zyklone)

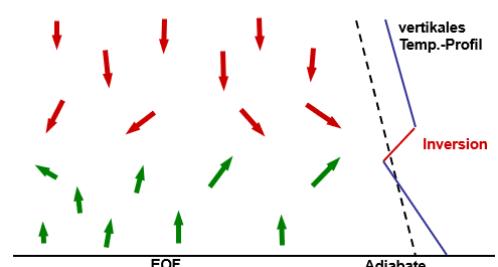
dynamische Absinkinversion:

- Dynamische Absinkinversion:

Absinken von Luftmassen (durch Kondensation (adiabatische Erwärmung)

Teil ihrer Energie verloren) verhindert Aufsteigen von kälteren Luftmassen (Passatinversion)

Beide Adiabate (rot und grüne) tauschen sich nicht aus, sondern prallen auf- und aneinander ab.



11. Wolken

Ansammlung winziger, sichtbarer, schwebender Wasser- und Eisteilchen

Wolkenklassifikationen:

- Nach Wolkenstockwerken: Höhenlage der Wolkenstockwerke in km:

Luftdruck	Polargebiete 300 hPa			Mittelbreiten 200 hPa			Tropen 100 hPa				
	hohe Wolken	3-8	5-13	6-18	mittelhohe Wolken	2-4	2-7	2-8	tiefe Wolken	0-2	0-2

- Nach physikalischer Zusammensetzung (Wasser-, Eis-, Mischwolken)

- Nach Genese (Entstehungsprozess): Konvektionswolken (Quellwolken), Aufgleitwolken (Schichtwolken), Ausstrahlungswolken (Nebel, Hochnebel)

Wolkengattungen:

hohe Wolken	mittelhohe Wolken	tiefe Wolken	Wolken	großer vert. Erstreckung
Cirrus Cirrocumulus Cirrostratus	Altocumulus Altostratus	Stratocumulus Stratus	Cumulus Cumulonimbus Nimbostratus	

- **cumulus**: Quellwolken (vorwiegend vertikale Erstreckung; auch „Haufenwolken“)

- **stratus**: Schichtwolken (starke horizontale Erstreckung)

- **Cumulonimbus, Nimbostratus**: in Mittelbreiten hauptsächlich für Niederschlagsbildung verantwortlich

12. Niederschlag (bei Überwindung der Vertikalen Aufwärtsbewegung der Wolkenluft)

Niederschlagsbildung:

- **Bowen- Ludlam- Prozess: Koagulation** (= miteinander verbinden; **Wasserwolken**; in Tropen relevant): Anwachsen von Aerosolen (z. B. Wassertropfen Anwachsen + verbinden: Ausfall ab bestimmter Größe)
- **Bergeron- Findeisen- Prozess: Sublimationswachstum (Mischwolken: Eis- und Wasserpartikel):**
 - Kristallisieren unterkühlter Wassertröpfchen an Eiskristallen (Re- sublimation)
 - Ab bestimmter Größe (ca. 1mm):
 - **Vergraupelung**: Zusammenstoß + Gefrieren unterkühlter Wassertröpfchen an Schneekristallen
 - **Schneeflockenbildung**: Koppelung von Schneekristallen durch unterkühlte Wassertröpfchen (Kleben als Bindung)
 - Ausfallen: evtl. Schmelz-/ Zerstäubungsprozesse (Durchgang wärmerer Atmosphärenschichten)
- **Niederschlagsbildung in Eiswolken** (nur in höchsten Wolkenstockwerken): Schnelles Wachstum von Eiskristallen: Resublimation von Wasserdampf und Koagulation der Eiskristalle: Ausfallen (Strecke oft zu weit: Verdunstung: Fallstreifen: Virga: Niederschlag in Mischwolken unterstützend („seeding cloud“))

Haupt-Niederschlagstypen:

(Land-)Regen

- Gebunden an großräumige Aufgleitvorgänge
- Fällt aus Schichtwolken (Vornehmlich Nimbostratuswolken)
- Gekennzeichnet durch: Große flächenhafte Erstreckung, Lange Dauer, Gleichmäßigkeit, Geringe Intensität

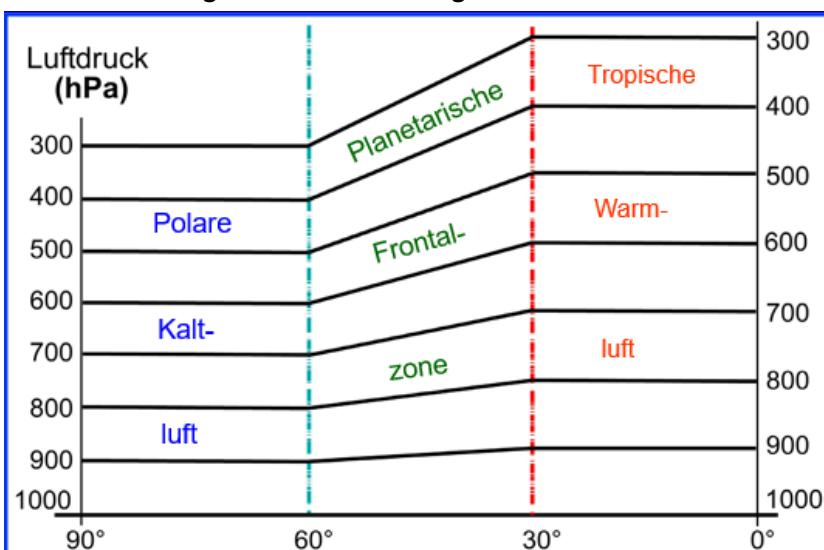
Schauer(-niederschlag):

- Gebunden an labile Schichtung und konvektive Bewegungen
- Fällt aus Quellwolken
- Gekennzeichnet durch: Begrenzte räumliche Ausdehnung, kurze Dauer, kurzfristige Schwankungen, rel. große Intensität

Allgemeine Zirkulation der Atmosphäre

Mittlerer atmosphärischer Bewegungsmechanismus zum großräumigen Austausch von Masse, Wärme und Bewegungsenergie

Großräumige Luftdruckverteilung:



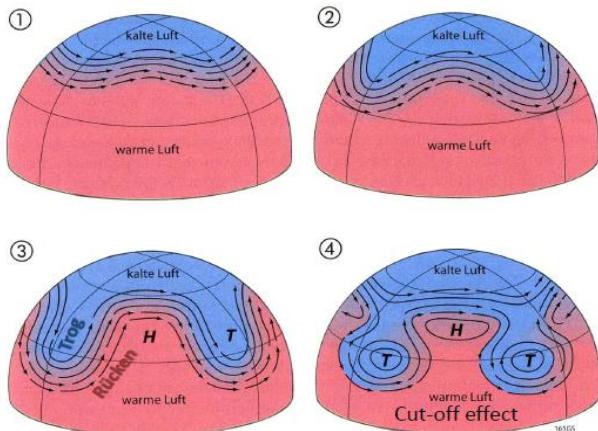
- **Tropen**: warme Luft hat in gleicher Höhe den höheren Druck (mehr Volumen: warme Luft dehnt sich aus)
- **Pol**: Isobaren liegen in kalter Luft näher zusammen → Temperatur- und Luftdruckunterschiede
- Tropen/ Subtropen: Energieüberfluss
- Polare/ subpolare Gebiete: Energiedefizit → **Polwärts gerichteter Energietransport** (zwischen 30 und 50 Grad am intensivsten)
- Einfluss der Corioliskraft: NHK: Rechtsablenkung: weht nach Osten → Westwind zwischen subtropischem Hockdruckgürtel und subpolarer Tiefdruckrinne

Polarfront- Jetstream:

Hochtroposphärische Starkwindzone: extremer Druck + Geschwindigkeit (in Höhe nehmen Westwinde zu)

Außertropische Westwinddrift:

Reine Zonalzirkulation: kein meridionaler Druck- und Temperaturausgleich: Wellenzirkulation: tropische Warmluft in Wellen Richtung Pol und umgekehrt (sobald Temperaturgradient in 500 hPa > 6 Grad/ 100m)

Zirkulationsformen:**1. Zonale Zirkulation:**

Kein wirksamer Austausch von Warm-/Kaltluft.

2. Gemischte Zirkulation:

meridionale Gebirge (Rocky Mountains) induzieren:
selbstverstärkende Instabilität

3. Meridionale Zirkulation:

Vordringen von polaren Kaltlufttrögen in Richtung Äquator

4. Zelluläre Zirkulation:

Cut-off-effect (Ausbildung von Zyklonen/Antizyklen):

Abschnürung der Tröge/Rücken: isolierte Warm-/Kaltlufttropfen

- SHK: stärker zonal ausgeprägte Zirkulation

- NHK: stärker longitudinal ausgeprägte Zirkulation (Land-Meer Anteil: Land wirkt als Hindernis)

Höhenwetterkarten

Isohypsen (Linien gleicher Höhenlage) einer konstanten Druckfläche (z.B.: 500-hPa-Niveau)

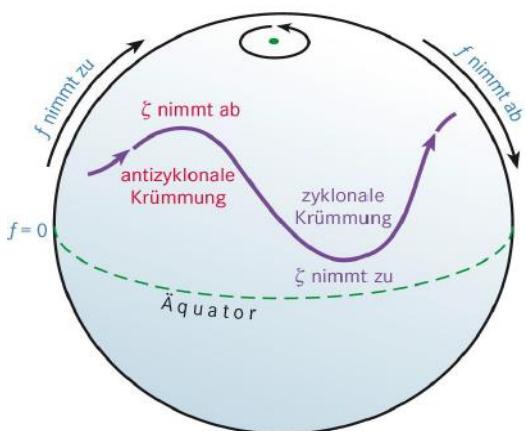
Ausbreitung von Rossby-Wellen (lange Wellen) in Höhenströmung:

Erhaltung der absoluten Vorticity (Wirbelgröße, Maß für die Rotation einer Strömung):

Corioliskraft + relative vorticity = const., $b = 2w \times \sin\phi \times v$: Coriolisbeschleunigung

Relative Vorticity: beschreibt horizontale Drehbewegungen und vertikale Rotationsachsen (positiv für zyklonale, negativ für antizyklonale Rotation, Krümmungs- und Scherungsterm)

Corioliskraft (f) und die relative Vorticity (rV) in Wechselwirkung:



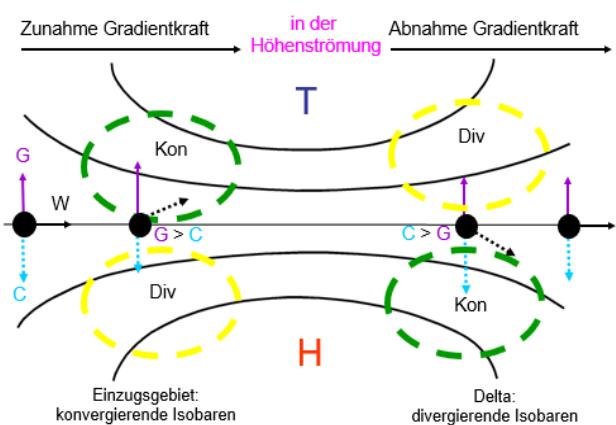
- rV nimmt zu: f nimmt ab
- f nimmt zu: rV nimmt ab
- rV negativ: Corioliskraft positiv: antizyklonale Rotation (nach rechts)
- rV positiv: Corioliskraft negativ: zyklonale Rotation (nach links)
- Rossby Wellen bevorzugt über z.B. meridional verlaufenden Gebirgen (Rocky Mountains): Vertikale Einengung: Geschwindigkeit steigt: Corioliskraft steigt: Ablenkung nach rechts: Auslöser für Wellen
- Bewegung eines Luftpakets: ab gewisser Geschwindigkeit Ablenkung durch Corioliskraft nach rechts: rV sinkt
- Richtung Äquator nimmt die Corioliskraft ab: rV nimmt zu
- Corioliskraft nimmt Richtung Pol wieder zu usw.

Entstehung dynamischer Druckgebiete (konstant):

Beschleunigung und Abbremsung in Höhenströmung (Massenträgheit: Körper passen sich nicht sofort an veränderte Außenbedingungen (Beschleunigung /Abbremsung) an): ageostrophische Massenverlagerung

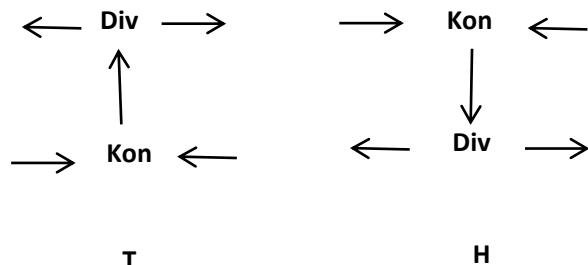
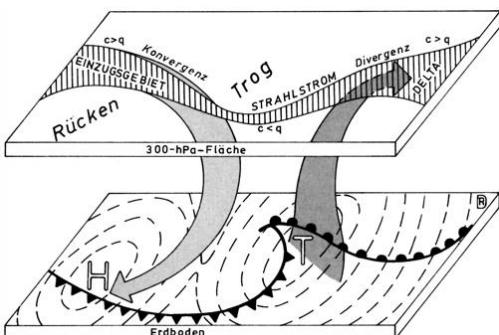
Divergenztheorie (Ryd-Scherhag):

- Je höher G, desto größer Geschwindigkeit
- G steigt an, Isobaren näher zusammen: Geschwindigkeit steigt: C steigt (zeitlich versetzt)
- Auslenkung nach Norden
- G sinkt, da H und T sich entfernen: Geschwindigkeit sinkt: C auch
- Auslenkung nach Süden
- C: Corioliskraft, G: Gradientenkraft
- Konvergenz: horizontales Zusammenströmen von Luftmassen (Massengewinn von Luft)
- Divergenz: horizontales Auseinander-/Abströmen von Luftmassen (Massenverlust von Luft)
- Divergenz in Höhe: dynamisches Tief (Zyklone): Tiefdruck in Höhe und bodennah
- Konvergenz in Höhe: dynamisches Hoch (Antizyklone): Hochdruck in Höhe und bodennah



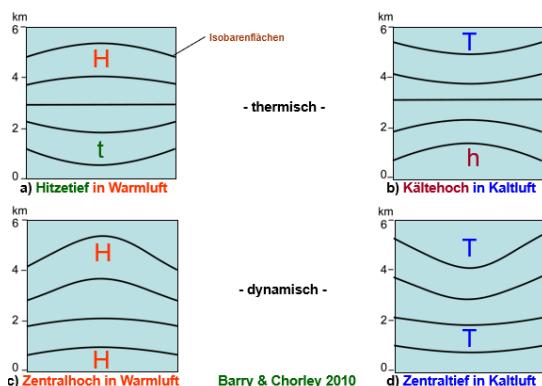
Grund für warme Luft am Boden:

- EOF erwärmt sich und gibt Wärme an bodennahe Luftsichten ab
- in Höhe: geringerer Luftdruck: Volumen steigt: Temperatur sinkt

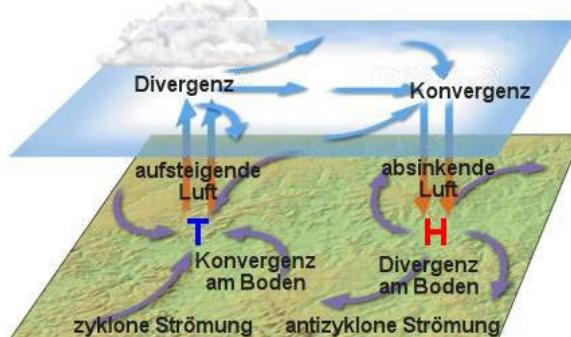
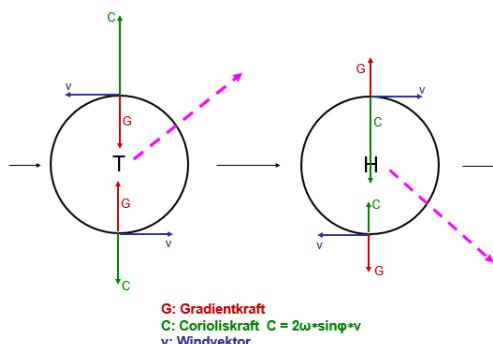
Strömungsdivergenz/-konvergenz im Bereich des Strahlstrom-Maximums:**Charakteristika in Hoch- und Tiefdruckgebieten:**

	HOCH	TIEF
Rotation	antizyklonal	zyklonal
bodennahe Strömung	divergentes Ausströmen	konvergentes Einströmen
Vertikalbewegung	absinkend	aufsteigend
Bewölkung	gering	stark
aber auch möglich:	Nebelbildung	wolkenarme Hitzetiefs
bei dyn. Druckgebilden	Höhenkonvergenz	Höhendifferenz

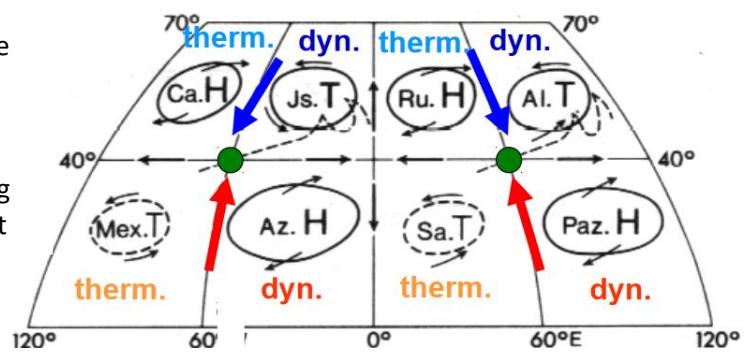
- Einfluss der Konvergenz und Divergenz auf Hoch-/Tiefdruckgebiete:
Tiefdruckgebiete: Luftmassen strömen horizontal zusammen (Konvergenz)
Tiefdruckgebiete treffen auf Hochdruckgebiete: im Übergangsbereich: horizontales Auseinanderströmen von Luftmassen
- kalte Luft hat höheres spezifisches Gewicht als warme Luft
- Luftdruck sinkt mit Höhe

Unterschiedliche Druckgebilde in verschiedenen Luftmassen:

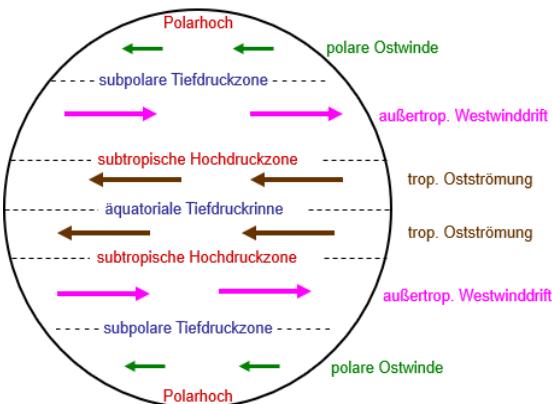
Tropopause wirkt wie Deckel

**Ausscheren von Druckgebieten aus der Westdrift:**

- Frontogenetische Punkte:
Wellenstörung:
Frontalzyklone
- Pfeile: Ablenkung durch Corioliskraft

Aktionszentren im Luftdruckfeld der NHK:

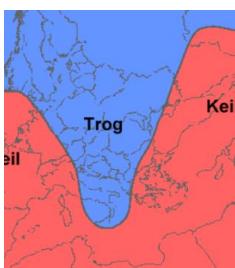
- Kalter Kontinent: Hoch, warmer Kontinent: Tief
- Pfeile: H-> T, Corioliskraft: Rechtskurve (geostrophischer Wind)



- **Polare Ostwinde:** am Pol durch Kälte absinken und seitliches Abfließen, durch C Rechtsablenkung
- Jahreszeitliche Intensitätsschwankungen: stärkere Gradienten im jeweiligen Winter
- Jahreszeitliche Breitenverlagerungen: ausgeprägter in kontinentalen als in maritimen Bereichen
- Stetige und alternierende Klimate (alternierend: „wechselnd/e“)
- Wärmespeicherkapazität des Meeres: nur wenig ausgeprägte Breitenverlagerungen
- Planetarische Asymmetrie: stärkere Gradienten (z.B. starker ausgeprägter Windsysteme) auf SHK

Großräumiger Reliefeinfluss (Beispiel Rocky-Mountains/ Europa)

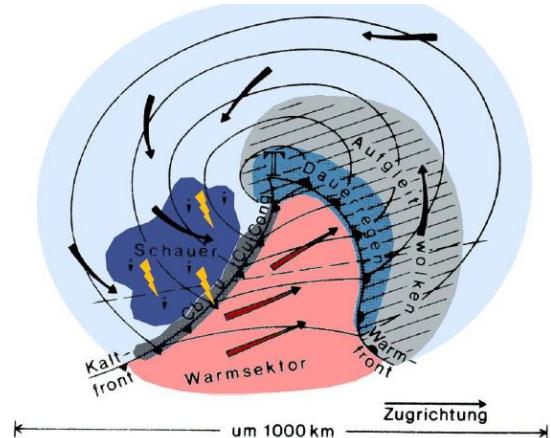
Induzieren Rossby-Wellen: nordostam. Höhentrog (Ausbeulung des Jetstream nach Süden mit polarer Kaltluft in Höhe)



- Delta des Höhentrogs: dynamische Hoch- und Tiefdruckgebiete: permanente Aktionszentren (z.B. Azoren-Hoch, Islandtief): stromabwärtige Zirkulationsdynamik (v.a. auf NHK)
- dynamische Druckgebiete: Durch vorherrschende Druckverhältnisse ausgebildete Druckgebiete
- thermische Druckgebiete: Kanada-Hoch, Russland-Hoch, Mexico-Tief, Sahara-Tief
- frontogenetische Punkte: Aufeinandertreffen von kalter und warmer Luft aus Aktionszentren (z.B. Island-Tief, Azoren-Hoch, Aleuten-Tief, Pazifik-Hoch)
- Tropf: schlechtes Wetter
- Rücken: gutes Wetter

Vorüberziehen eines dynamischen Tiefdruckgebietes (Zyklone):

1. **Wellenstörung** an frontogenetischen Punkten: Kalt- und Warmfront, Tiefdruckgebiet an Grenze entsteht (wirkt wie Sog)
2. **Frontalzyklone:**
 - Wellenstörung dehnt sich aus
 - Warmsektor wird langsam vom Kaltsektor (schneller: dichter und schwerer) eingeschlossen:
 - Aufgleiten: langanhaltender Landregen + flache Bewölkung an Vorderseite des Warmsektors: Warmfront (flacher: langsamerer Aufstieg), intensive Schauer + Gewitter an Rückseite (steiler: schnellerer Aufstieg, „Sog“ in den Kaltsektor), Wetterberuhigung im Warmsektor,
 - Hochdruckrücken an Ostseite durch Aufgleiten der Warmluft
 - Tiefdrucktrog an Westseite durch Unterschieben der Kaltluft
3. **Okklusion:** Vermischen + Ausgleich von Temperatur + Druck



- Zyklonenzugbahnen (West → Ost): Vb:
 - Starkniederschläge (Hochwasser)
 - Intensivieren beim Übersteigen der Alpen (Lee-Zyklogenese): Zunehmende Reibung: Verstärkung des Austauschs
 - Genua: Zyklone wird durch Wasser angereichert (mehr Energie durch latente Wärme)
- Zyklonenfriedhof Osteuropa

Nicht-frontale Druckgebilde:

- Hochdruckgebiete:
- Dynamische:
 - x zentrale/ steuernde (blockierende Antizykloone: Abschnürung eines H: blockieren und Umleitung der Zyklone)
 - x sekundäre/ wandernde (Zwischenhoch)
- Thermische Kältehochs
 - Tiefdruckgebiete:
- Dynamische:

x zentrale/ steuernde (Zentraltief, Kaltlufttropfen)

x orographisch induzierte (Lee-Depression)

- Thermische Hitzetiefs

Luftmassen Europas:

Kontinental/ maritim, Polar-/ Tropikluft, Arktis/ Sahara

Bedeutsamste Zirkulationsschwankungen:

Eurasisches Muster:

zwischen Nordsee und nördlichem Teil des kaspischen Meeres beschreibt die Schwankungen der meridionalen Komponente

Nord-Pazifische Oszillation:

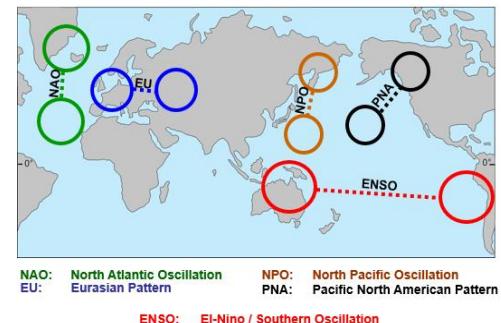
Gegenstück zur NAO

Pazifisch-Nordamerikanisches Muster

El-Nino – Südliche Oszillation (global bedeutsamstes): Luftdruckdifferenz

zwischen südostasiatischem Tiefdruckgebiet und südostpazifischem

Hochdruckgebiet

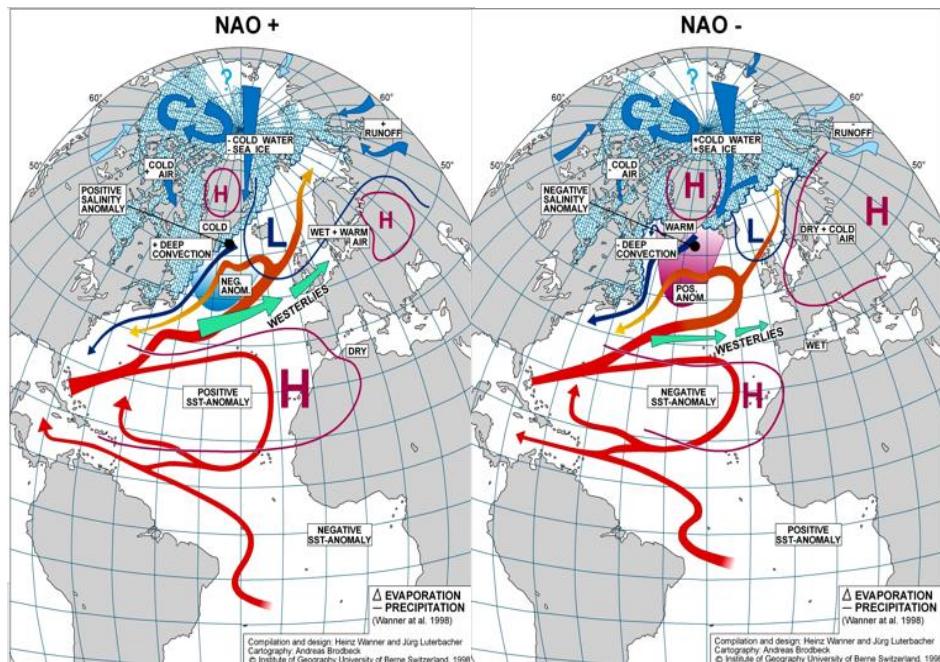


Nordatlantischer Europäischer Raum

Nordatlantische Oszillation (NAO):

misst Schwankungen des Druckgefälles zwischen Azoren-Hoch und Island-Tief (als Index dargestellt)

Auswirkungen der NAO:



- **positive Phase:** starkes Azoren-Hoch und Island-Tief → über Nordatlantik starke Westwindzirkulation, milde Winter, reichlich Niederschläge über Europa, im Mittelmeerraum Trockenheit und relativ kalte Winter: Kältehoch nach Osteuropa von Westwinddrift abgedrängt

- **negative Phase:** geschwächtes Azoren-Hoch und Island-Tief → Westströmung geschwächt: gibt Raum für russisches Kältehoch: kalt und trocken (kontinental), Zyklonen im Mittelmeerraum statt in Mitteleuropa

Strömungen:

- **Polarfront-Jetstream:** Hochtroposphärische Starkwindzone aufgrund des verschärften Druckgefälles im Bereich der Polarfront
- Im Übergangsbereich von außertropischer zu tropischer Zirkulation:
Subtropen-Jetstream: hochtroposphärische Starkwindzone im Bereich der subtropischen Hochdruckzellen
- Zwischen subtropischen Hochdruckzellen beider Hemisphären und der äquatorialen Tiefdruckrinne wird unter Reibungseinfluss (in der Peplosphäre) aus geostrophischem Wind der tropischen Ostströmung **geotriptischer Wind** mit äquatorwärtiger Komponente
- **NE-Passat der Nordhemisphäre, SE-Passat der Südhemisphäre**
- Zwischen Passatströmungen:

Innertropische Konvergenzzone ITC:

- Konvergieren (Zusammenströmen) der Passate

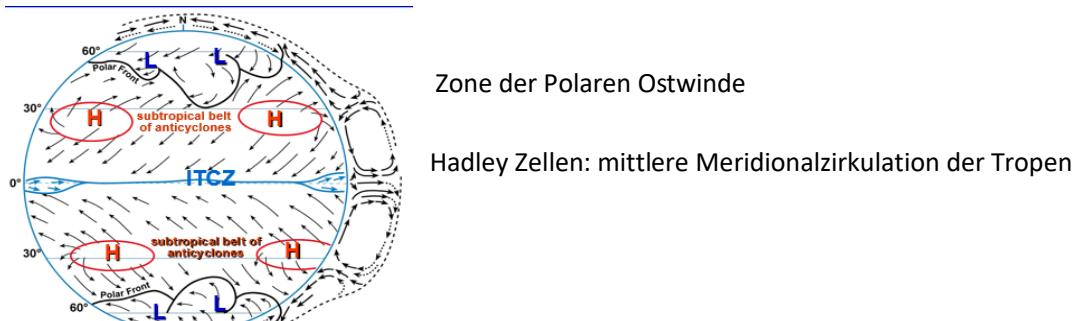
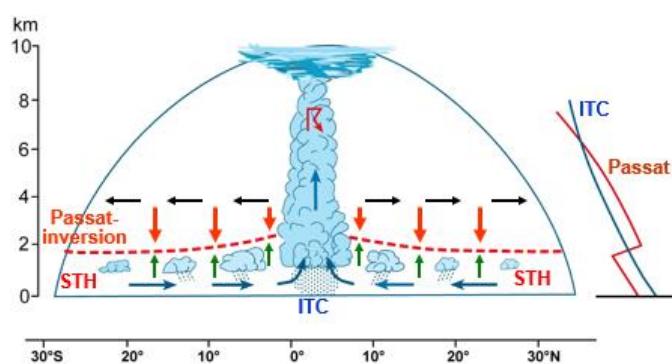
- nördlicher und südlicher Ast

- jahreszeitliche Verlagerung (abhängig vom Zenitstand der Sonne)

- Druckgefälle zu randtropischen kontinentalen Hitzetiefs

Hemisphärenunterschiede der außertropischen Zirkulation:

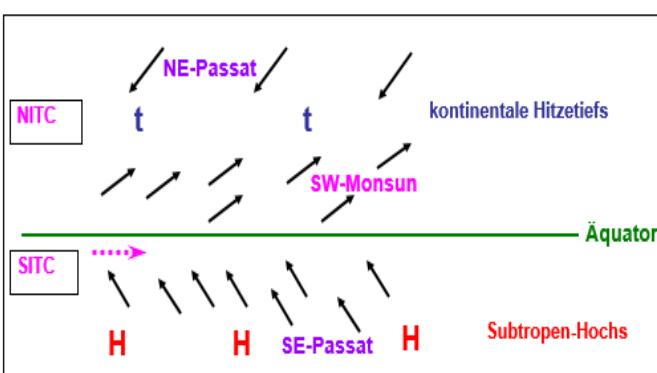
- NHK: Landhalbkugel: stehende lange Wellen/ Aktionszentren ausgeprägter (Zirkulationsformen auf SHK mehr zonal: geringere Ablenkung durch Landmassen)
- Wirbelintensität größer auf SHK (Kältepol Antarktis: höhere Druckgradienten)

Atmosphärische Zirkulation:**Hadley Zelle:**

- Hohe Sonneneinstrahlung: Aufsteigen von Luftmassen (bodennah: äquatoriale Tiefdruckrinne) in der ITC, Bewölkung + Zenitalregen
- seitliches Abströmen der Luftmassen in Höhe, Abkühlen und Absinken im Bereich der Wendekreise: subtropischer Hochdruckgürtel (Luftmassengewinn, Trockengebiete)
- Zurückströmen zur äquatorialen Tiefdruckrinne als Druckausgleich am Boden: Passatwinde (Ablenkung Richtung Osten aufgrund der Corioliskraft: SE-/NE-Passat)
- Dynamische Absinkinversion: Passatinversion (vertikales Aufsteigen wird dadurch eingeschränkt)

Jahreszeitliche Verlagerungen/ Wechsel der Luftdruck- und Windgürtel:**Tropische Monsunzirkulation**

- Monsun: beständiger Wind, der im Jahresverlauf seine Richtung um mindestens 120 Grad ändert
- Verschiebung der ITC durch verschiedene Einstrahlung
- Beim Übertritt wechselt Ablenkungsrichtung der Corioliskraft



NITC: nördlicher Ast der ITC; Konfluenz zw. NE-Passat u. innertrop. Westwinden

SITC: südlicher Ast der ITC; Konfluenz zw. SE-Passat u. innertrop. Westwinden

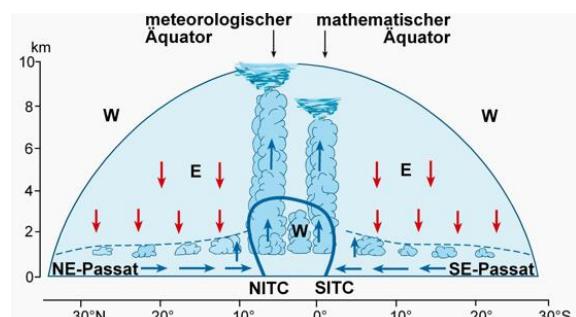
Nordsommer (Südwestmonsun):

- Erwärmung indischer Kontinent: Kontinentales Hitzetief über Südasien
- ITC Verlagerung nach Norden bis über Himalaya
- Südostpassate (südlicher subtropischer Hochdruckgürtel nach Norden): über Äquator: Südwestwinde
- über Indien Feuchtigkeitsaufnahme und Niederschläge + orographisches Hindernis Himalaya (Stauseffekt): Sommermonsun
- Sommerhalbjahr: SE-Passat → SW-Monsun

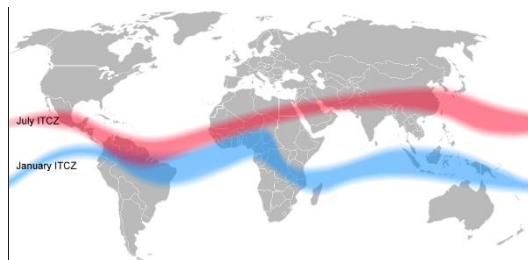
Südsommer (Nordostmonsun):

- Abkühlung indischer Kontinent: Kältehoch (absinkende Luft): SITC
- Nordostwinde (NE-Passat) wehen über Indien/ Indik zum Äquator/ ITCmi
- Wintermonsun: kühl und trocken - Winterhalbjahr: NE-Passat + NS

- mathematischer Äquator ist nicht gleich meteorologischer Äquator
- Aufstieg über Wärmequellen (kontinentale Hitzetiefs)
- Abstieg über Kältesenken (ozeanische Kaltwassergebiete)
- entgegengerichtete Horizontalkomponenten:
- bodennah: Monsune, Passate
- Höhenströmung (Ausläufer der außertropischen Westwinddrift)

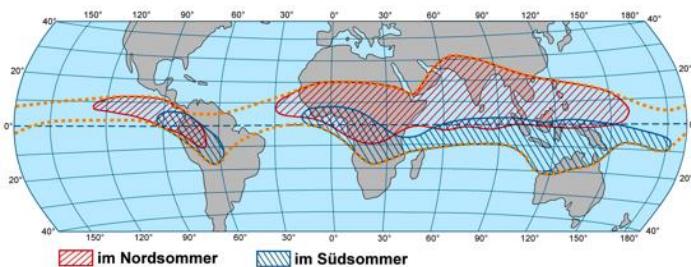


Ausdehnung der ITC: (Rot für den Nordsommer, Blau für den Nordwinter)

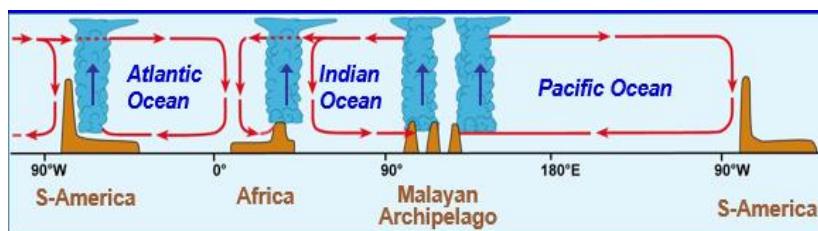


Verschiebung durch Insolation und dadurch Temperaturunterschied

Ausdehnung der Tropischen Windzone:



Walker Zirkulation:



- strömt bodennah westwärts, an Tropopause ostwärts zurück
- Über Landmassen andersrum
- Passat treibt warmes OF-Wasser vor Ostküsten und legt vor Westküsten kaltes Tiefenwasser frei
- C spielt keine Rolle: äquatornah

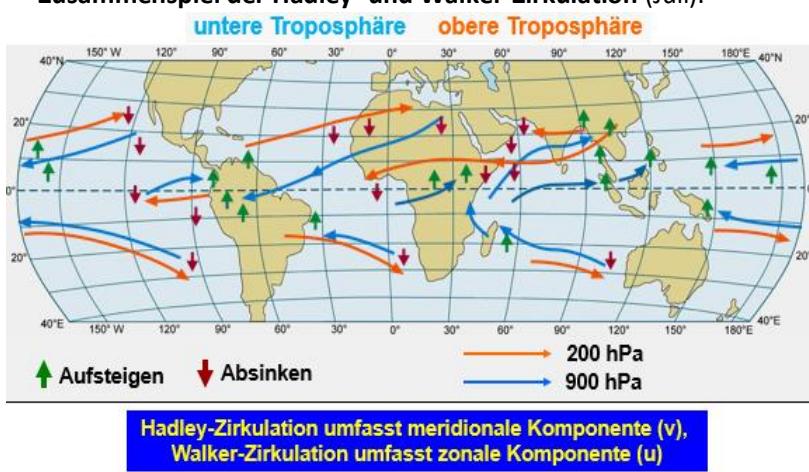
Zenitalregen:

- Tropische Niederschlagsmaxima (1-2 Monate nach dem Zenitstand der Sonne)
- **Genetisch:** keine Niederschläge aus thermischer Konvektion, sondern im Zusammenhang mit Konvektionsmaxima im Wirkungsbereich der saisonal wandernden ITC

Tropical Easterly Jet (TEJ) (Tropischer Oststrahlstrom)

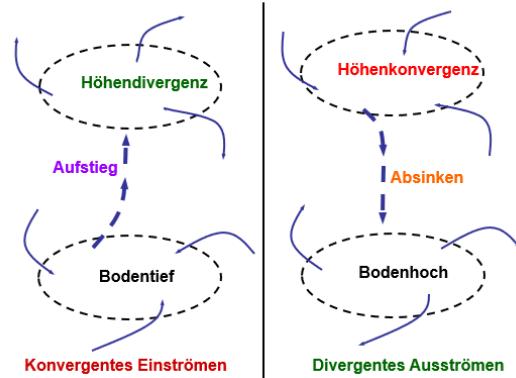
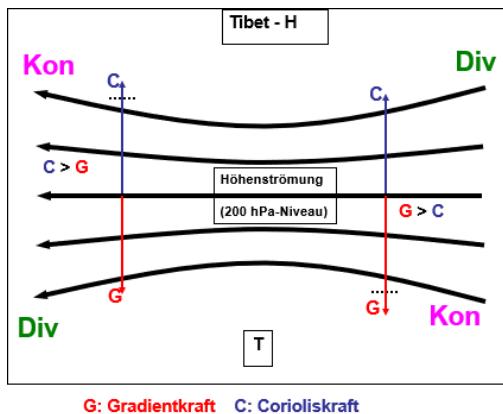
- Kon: absteigen von Luft: trocken
- Div: aufsteigen von Luft: Niederschlag und Bewölkung

Zusammenspiel der Hadley- und Walker-Zirkulation (Juli):



Sahara

Bangladesch



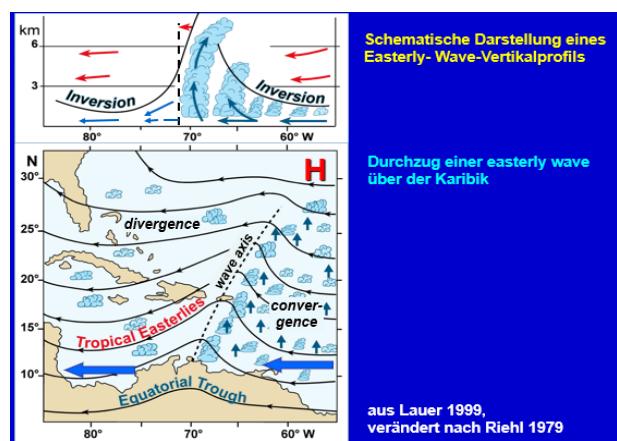
Zentralafrika

Sri Lanka

Tropische Störungen:

- Easterly waves
- Monsundepressionen z.B. Bengal Depressionen (Reicht bis in die mittlere Atmosphäre)
- Tropische Wirbelstürme z.B. Taifune, Hurricanes:

- Nur bei hohen SST ($\geq 27^\circ\text{C}$; Meeresoberflächentemperatur, sea surface temperature)
- Nicht zu kleiner Coriolisablenkung (erst ab 3° Breite): am Äquator keine Hurricanes
- Starke Höhendivergenz (oder markante Luftmassenunterschiede)
- Kleine vertikale Windscherung



- typisch im 700 hPa Niveau
- schwache Druckwellen
- 20 – 30 Längengrade
- tropische Ostströmung (wandert nach Westen)
- bodennahe Konvergenz vor Wellenachse (Quellbewölkung)
- Konvektionshemmung hinter Wellenachse (Divergenz)
- verstärkt oder schwächt Passatinversion
- östliche Wellenstörung in unterer Troposphäre
- Spezialfall: squall lines (besonders starke Regenfälle)

Erhaltung der potentiellen Vorticity:

$$(f + \zeta) / h = \text{const.}$$

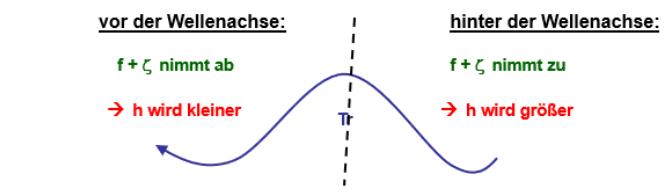
$f + \zeta$:

absolute Vorticity

h : Vertikalerstreckung des Luftkörpers

Grund für trockene Luft hinter Regenfront:

- verringerte Vertikalstreckung (h): Absinkbewegung: Wolkenbildung
- Konvektionshemmung durch bodennahe Divergenz



aber: nur die Basis-Variante von easterly waves!

Unterschiede von thermischen und dynamischen Hoch- und Tiefdruckgebieten:**- Thermisches Hochdruckgebiet:**

- Kalte Luft: größere Dichte als Warmluft (Beim Abkühlen zieht sich die Luft also zusammen, wodurch sie schwerer wird und absinkt) → Druck auf umliegende Luftsichten nimmt zu → Luftdruck steigt (im Vgl. zur Umgebungsluft)
- Bsp.: Hochdruckgebiet über Wasser beim Land- See- Windsystem, Polarhoch in atmosphärischer Zirkulation

- Thermisches Tiefdruckgebiet:

- Warme Luft: geringere Dichte als kalte Luft (Luft dehnt sich beim Erwärmen also aus, wird leichter und steigt damit in die Höhe) → Druck auf umliegende Luftsichten nimmt ab: Luftdruck fällt (im Vgl. zur Umgebungsluft)
- Bsp.: Tiefdruckgebiete der äquatorialen Tiefdruckrinne innerhalb der atmosphärischen Zirkulation

→ Thermische Druckgebilde: geringe vertikale Erstreckung

→ Entstehung: insulationsbedingte Temperatur- und dadurch Dichteunterschiede

→ Bodennahes H, in Höhe T und umgekehrt (Kältehoch und Hitzegefälle)

→ Hitzegefälle und Kältehoch

- Dynamische Druckgebiete:**- Entstehung**

- Beschleunigungen und Abbremsungen in Höhenströmung (Jetstream)

→ Massenträgheiten

→ Resultierende ageostrophische Massenverlagerungen (nicht isobarenparallele Massenverlagerung)

→ bildet Mäander (Rossby- Welle), in denen sich bei zyklonaler Drehrichtung Tiefdruckgebiete und bei antizyklonaler Richtung Hochdruckgebiete bilden

- Dynamische Hochdruckgebiete entstehen im Bereich des subtropischen Hochdruckgürtels (z.B. Azorenhoch), lösen sich von diesem ab und wandern dann nach Osten

- Auf NHK zirkuliert Luft im Uhrzeigersinn um das Hochdruckgebiet, auf der SHK dagegen

- Dynamische Tiefdruckgebiete entstehen im Bereich der Polarfront (z.B. Islandtief) und wandern dann nach Osten (wanderndes Tiefdruckgebiet/ Zyklone)

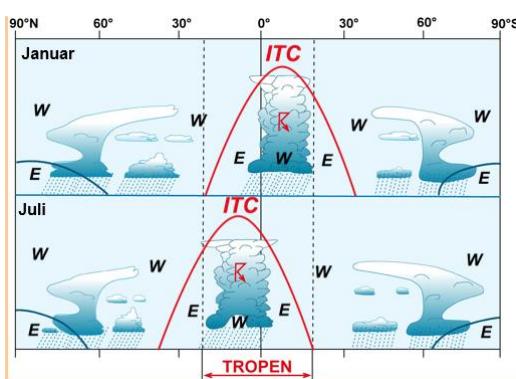
→ Zyklonen drehen sich auf NHK gegen den Uhrzeigersinn und auf SHK mit

→ Dynamische Druckgebilde: große vertikale Erstreckung: Hoch- bzw. Tiefdruck bodennah und in Höhe

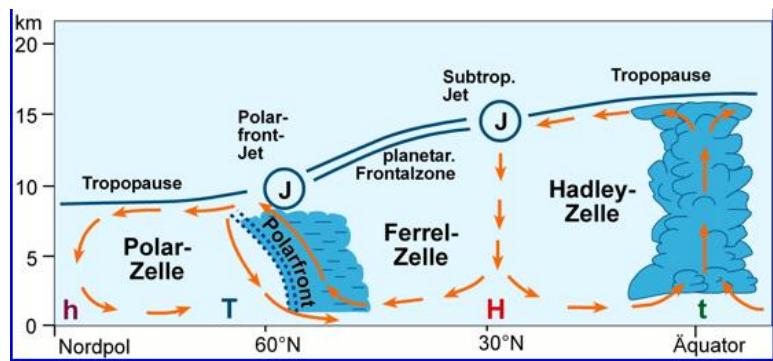
→ Entstehung durch Rossby- Wellen

→ Divergenz in Höhe: dynamisches Tief (Zyklone): Tiefdruck in Höhe und bodennah (Konvergenz bodennah)

→ Konvergenz in Höhe: dynamisches Hoch (Antizyklone): Hochdruck in Höhe und bodennah (Divergenz bodennah)

Zonale Windverhältnisse:**Zonale Windverhältnisse im Jahresgang:**

W = Westwind
E = Ostwind

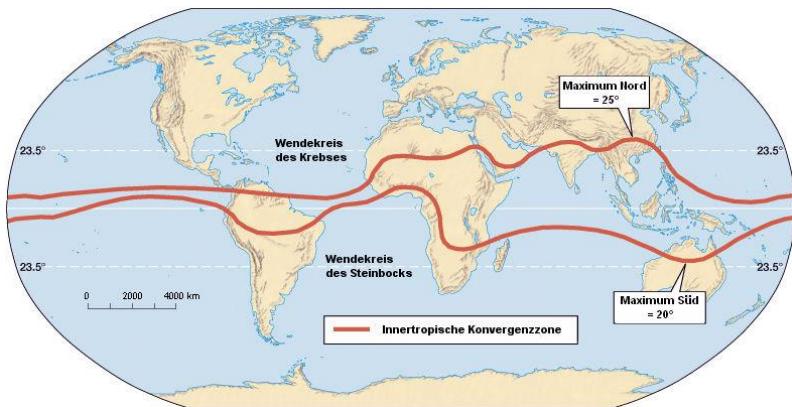
Planetarischen Zirkulation: (entlang eines Meridian)**Ferrell- Zelle:**

Luft will vom H ins T, zudem in warmer Luft höherer Luftdruck als in kalter in selber Höhe: Luft strömt nach Norden: C: Rechtsablenkung: Westwindzone

Polare Zelle:

Pol: Kalte Luft sinkt ab und fließt seitlich ab: weht nach Süden (erwärmst sich): Aufstieg: C wirkt: Rechtsablenkung: Polare Ostwinde

Luftdruckverteilung und Luftströmung im Mittel für die bodennahe Reibungsgrenze (Winter/ Sommer):



Grund für Verschiebung der ITC:

- Einstrahlungsbedingte Hitzetiefs über Kontinenten ziehen ITC jeweils mit nach Süden/ Norden
- Wasser erwärmt sich langsamer (spezifische Wärmekapazität: Extrem viel Energie zum Erhitzen)

NS Charakteristik

Bei bodennahem Hoch über Mitteleuropa + in der Stadt:

- absinkende Luftmassen durch Konvektion in Höhe: adiabatische Erwärmung: warme Luft kann mehr Wasser aufnehmen: kein Regen, Auflösung der Bewölkung, viel direkte Sonneneinstrahlung: klares, trockenes und schönes Wetter

- **Sommer:** Blockieren der Westwinde: Hitzewelle, NS kann nur in situ entstehen (Gewitter durch Konvektion)

→ Stadt: sehr warm: geringere Albedo als Umland (mehr Absorption) + hoher Speicherterm: Wärme wird gehalten

- **Winter:** meist Erweiterung des sibirischen Kältehochs: schönes Wetter (klarer Himmel, Sonnenschein usw. ! außer bei Inversion) + Kälte (terrestrische Ausstrahlung, v.a. nachts kalt), kein NS (für plötzliche Konvektion zu kalt, im Winter generell nur NS durch Advektion: Blockiert durch thermisches Kältehoch)

+ Inversionen: Boden verliert Wärme: bodennahe Schichten kalt, tagsüber absinkende warme Luft: Nebelbildung an Grenze durch Konvektion

→ durch geringere Insolation Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland wenig gravierend, möglich: minimal wärmer in Stadt aufgrund des Speicherterms (speichern von anthropogen erzeugter Wärme, z.B. Heizung)

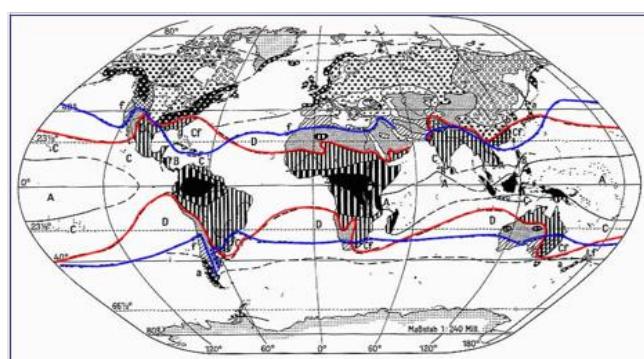
→ Keine Frontenbildung/ Ausbildung von Frontalzyklonen

Bei Westströmung:

Hoch und Tief (Azorenhoch und Islandtief): ausgeprägte Westwinde (C+ geostrophisch): milde, feuchte Atlantikluft, Regen (maritimes Klima)

Unterschiedliche Niederschlagsregimes:

Überschneidungen verschuldet durch z.B. durch Höhenlagen (Amerika Rocky Mountains, Asien Himalaya): immerfeuchte Gebiete, Trockenzenen (z.B. Sahara): kein Niederschlag



Polargrenze der tropischen Konvektionsniederschläge

Äquatorialgrenze der außertrop. Zyklonalniederschläge

Global bedeutsamste Zirkulationsschwankung: ENSO (El Niño/ Southern Oscillation)

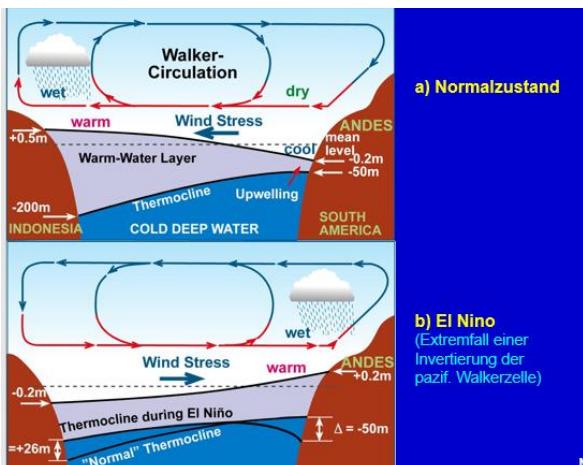
- Walker-Zirkulation in normalen Jahren: bodennahe Windzirkulation erfolgt entlang des Äquators von Ost nach West, Rückkehr in Höhe von West nach Ost

- Zirkulationsschwankung der pazifischen Walkerzelle: Schwankung des Luftdruckgefälles zwischen Ost- & Westpazifik

Auswirkungen:

- Erwärmung des Pazifiks um bis zu 5 Grad: globale Mitteltemperatur steigt
- Kaltes, nährstoffreiches Wasser gelangt nicht an OF
- Umstellung der atmosphärischen Zirkulation
- Variabilität des Monsuns/ der Hurricanes
- Trockenheit in Indonesien, Überschwemmungen in Südamerika

Die ENSO-Schwankung/ Walker Zirkulation:



- Westküste Südamerikas: kaltes Wasser steigt auf (upwelling): Kaltes OF-Wasser

- SE-Passate treiben Wasser Richtung Australien: Warmes Wasser (warmpool) steigt im Westpazifik auf: Regen

- Abschwächung der Hockdruckzelle im Ostpazifik (durch steigenden Luftdruck im Tiefdruckgebiet über Indonesien): Abschwächung der Walkerzirkulation

- Stark abgeschwächte, teils umgekehrte Passate

- warmpool schwapppt zurück nach Südamerika

- Kaltwasser upwelling wird verhindert

- Hohe Verdunstung des Warmwassers: Niederschläge an Westküste Südamerikas/ Dürre im Westpazifik

La Niña: Intensivierung des Normalzustandes

Klimaklassifikation

Genetische: (Flohn)

- Nach dynamischen Vorgängen in der Atmosphäre: Strahlungs- und Wärmehaushalt der EOF und atmosphärische Zirkulation (nach Winden geordnet)
- Ausgehend vom Zustandekommen der Klima (Ursache)
- vier stetige (ganzjährig zonale Strömungskomponente) und drei alternierende (jahreszeitlicher Wechsel der Strömungskomponente) Klima:

Innertropisches Klima

Ganzjährig innertropische Westwinde

Randtropisches Klima

Innertropische Westwinde im Sommer, tropische östliche Winde im Winter (Passate)

Subtropisches Trockenklima

Ganzjährig tropische östliche Winde (Passate)

Subtropisches Winterregenklima

Tropische östliche Winde (Passate) im Sommer, außertropische Westwinde im Winter

Feucht-gemäßigte Klima

Ganzjährig außertropische Westwinde

Subpolares Klima

Polare Ostwinde im Sommer, außertropische Westwinde im Winter

Hochpolares Klima

Ganzjährig polare Ostwinde

Effektive: (Köppen/Geiger)

A – Klima:	Palmengrenze tropische Regenklima	$t_{\min} > 18^{\circ}\text{C}$
B – Klima:	trockene Klima bei Sommerregen: bei Regen ohne Periode: bei Winterregen:	$R < 2T + 28$ $R < 2T + 14$ $R < 2T$
C – Klima:	warmgemäßigte Regenklima	$t_{\max} > 10^{\circ}\text{C}$ $-3^{\circ}\text{C} < t_{\min} < 18^{\circ}\text{C}$
D – Klima:	boreale Klima	$t_{\max} > 10^{\circ}\text{C}$ $t_{\min} < -3^{\circ}\text{C}$
E – Klima:	Baumgrenze kalte Klima	$0^{\circ}\text{C} < t_{\max} < 10^{\circ}\text{C}$
F – Klima:	Schneeklima	$t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$

- Temperatur und Niederschlag als Grundlage: messbare Klimaelemente
- Definition angelehnt an Vegetation
- t_{\max} : Mitteltemperatur des wärmsten Monats
- t_{\min} : Mitteltemperatur des kältesten Monats
- T: Jahresmitteltemperatur
- R: Mittelwerte des Jahresniederschlags
- Palmengrenze: kältester Monat im Mittel nicht unter 18 Grad
- Baumgrenze: mindestens ein Monat im Mittel wärmer als 10 Grad

2. Buchstabe: Abgrenzung nach dem Niederschlag:

f: immerfeucht
s: sommertrocken
w: wintertrocken

w: Wüstenklima
s: Steppenklima

3. Buchstabe: Abgrenzung nach der Temperatur:

nach Schwellenwerten für t_{\max} und t_{\min} (a, b, c, d)
bzw. für T (h, k)

Ökoklimatische Gliederung der Erde

- **Solare Bestrahlungszonen:** jährliche Tageslängen-Schwankung
 - Tropen: < 3 Stunden
 - Subtropen: zwischen 3 und 7 Stunden
 - Mittelbreiten: zwischen 7 und 24 Stunden
 - Polarzonen: einmalige bis halbjährige Mitternachtssonne
 - **Länge der thermischen Vegetationszeit:** pflanzenbestandstypische monatliche Temperatur-Schwellenwerten, oberhalb deren dominierende Pflanzenwelt deutlichen monatlichen Stoffgewinn erzielt:
 - Oligotherm: 0 - 2 Monate
 - Mikotherm: 3 - 4 Monate
 - Mesotherm: 5 - 6 Monate
 - Makrotherm: 7 - 9 Monate
 - Megatherm: 10 - 12 Monate
 - **Länge der hygrischen** (Niederschlag oder Luftfeuchtigkeit betreffend) **Vegetationszeit:** Verhältnis von Niederschlagsaufkommen und potentielle Landschaftsverdunstung:
(= Evapotranspiration des standörtlichen Systems Boden/Pflanze)
 - Perarid: 0 humide Monate
 - Arid: 1-2 humide Monate
 - Semiard: 3-4 humide Monate
 - Humid: 7-9 humide Monate
 - Perhumid: 10-12 humide Monate
 -

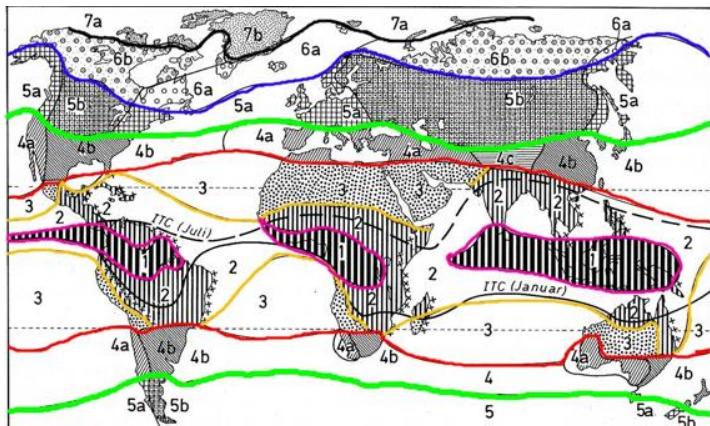
Kontinentalitätsgrad (nach IVANOW)

$$K = \frac{TA_j * TA_t * 0.25 * S}{0.36 * \varphi + 14}$$

- TA_j:** jährliche Temperaturamplitude
- TA_t:** tägliche Temperaturamplitude
- S:** Sättigungsdefizit
- φ:** geographische Breite

ozeanisch: < 100 %, kontinental: 100- 200 %, hochkontinental: > 200 %

Klimagenetische Klassifikation:



Klimawandel:

Anthropogene Ursachen:

- Rodung der Regenwälder (CO₂ Speicher, Rückgang latenter Wärmefluss: Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur, Änderung der Albedo)
 - Spurengase in der Atmosphäre
 - Verbrennung fossiler Energieträger

- Verbleihung fossiler
Naturliche Ursachen

- Naturliche Ursachen:**

 - Externe: Solare Aktivitätsschwankungen, astronomische Rahmenbedingungen (Milankovic Zyklen), Tektonik, Explosiver Vulkanismus (Aerosole)
 - Interne: Zusammensetzung der Atmosphäre, Wolkenbedeckung, Atmosphäre - Ozean- Wechselwirkung (z.B: El – Nino)

Rezenter Klimawandel:

- Kein Unterschied bzgl. des Niederschlags
 - Globaler Temperaturanstieg (→ Gletscherschmelze)

1. Innertropisches stetiges Konvergenzklima der äquatorialen Zone
 2. Wechselklima der äußeren Tropenzone
(z.B. Monsun- + Passatwindwechsel in Subtropen)
 3. Stetiges Passatklima der randtropisch-subtropischen Trockenzone
 4. Wechselklima der Subtropen-Zone
 - 4a. Winterregen-Subtropen
 - 4b. Sommerregen-Subtropen
 - 4c. Trockenes Kontinental-Klima
 5. Stetiges Klima der planetarischen Frontalzone in den Mittelbreiten
 - 5a. maritimer Typ
 - 5b. kontinentaler Typ
 6. Wechselklima der Subpolarzone
 - 6a. maritimer Typ
 - 6b. kontinentaler Typ
 7. Stetiges Klima der Polarzone
 - 7a. maritimer Typ

Hydrogeographie

1. Einführung in Wasserforschung

- **Hydrologie:** Lehre vom Wasser des festen Landes über, auf und unter der Erde hinsichtlich seiner raumzeitlichen Verteilung, seiner Zirkulation sowie seinen physikalischen, chemischen und biologischen verursachten Eigenschaften und Wirkungen
- **Ozeanographie:** Teil der Meereskunde, der sich mit physikalischen Verhältnissen in Ozeanen beschäftigt
- **Meeresbiologie:** beschäftigt sich mit Lebewesen im Meer

2. Wasser als Stoff

Wassermolekül:

- Zwei H und ein O: kovalente Bindung: Verbindung sehr stabil
- Zerstörung nur mit hohem Energieaufwand möglich (Analyse)
- Synthese mit exothermer Reaktion: Knallgas (energiereichster konventioneller Stoff: alternativer Energieträger?)
- Dipolmolekül (zwei unterschiedliche Ladungen auf beiden Seiten): Wasserstoffbrückenbindung

Eigenschaft	Dimension	Wert	
Erstarrungstemperatur	°C	0,00	- spezifische Wärme: (Wasser als Energieträger) benötigte Energie, um 1 g Wasser um 1 Grad zu erwärmen
größte Dichte	°C	3,98	- Schmelzwärme: benötigte Energie, um gleiche Masse an Eis mit 0 Grad zu Wasser mit 0 Grad zu machen: Phasenübergang (selbe Energie wie 20 Grad warmes Wasser zum Kochen zu bringen: Eis/ Schnee hält sich sehr lange)
Siedepunkt	°C	100,00	- Schmelzwärme: benötigte Energie, um gleiche Masse an Eis mit 0 Grad zu Wasser mit 0 Grad zu machen: Phasenübergang (selbe Energie wie 20 Grad warmes Wasser zum Kochen zu bringen: Eis/ Schnee hält sich sehr lange)
kritische Temperatur	°C	374,15	
kritischer Druck	10 ⁵ Pa	221,19	
max. Dichte	kg/m ³	1000,00	- Verdunstungswärme: Phasenübergang flüssig -> gasförmig: extrem viel Energie
spezifische Wärme	J/g	4,186	
Schmelzwärme	J/g	334,90	
Verdampfungswärme (100°C)	J/g	2257,10	
Verdunstungswärme (0°C)	J/g	2495,30	

Isotope:

- Veränderte Neutronenzahl: verändertes Molekulgewicht
- HD = Deuterium (schweres Wasser: 2 Neutronen im Kern): veränderter Siedepunkt (101 Grad): Verdampft später, kondensiert früher und regnet früher ab
- **Isotopenfraktionierung:** leichtes Wasser wird von schwerem getrennt
- Ozean: Verdampfen: leichtes Wasser verdampft zuerst: Nachweis über Menge der Verdunstung

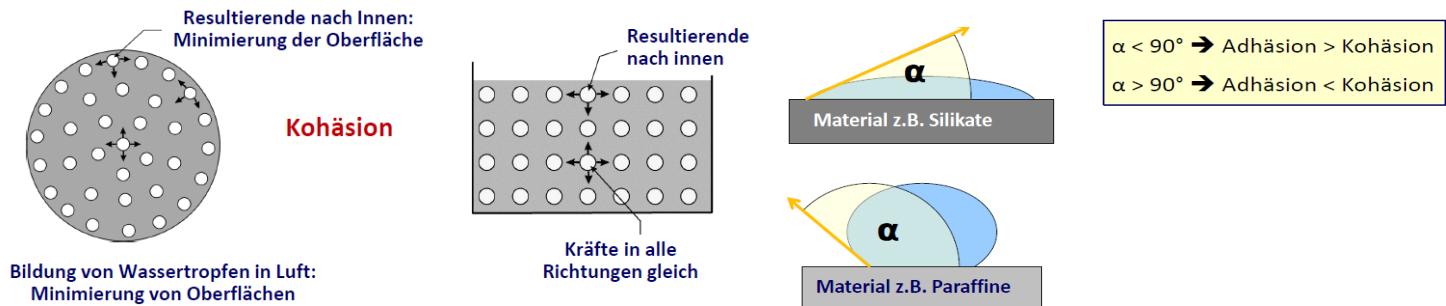
Wassergewicht (von natürlich vorkommenden Wasserisotopen):

Isotop	H ₂ ¹⁶ O	H ₂ ¹⁷ O	H ₂ ¹⁸ O	HD ¹⁶ O	HD ¹⁷ O	HD ¹⁸ O	- V-SMOW: Vienna Standard Mean Ocean Water: H ₂ ¹⁶ O („normales Wasser“)
rel. Anteil	99,730	0,037	0,204	0,029	0,00001	0,00006	

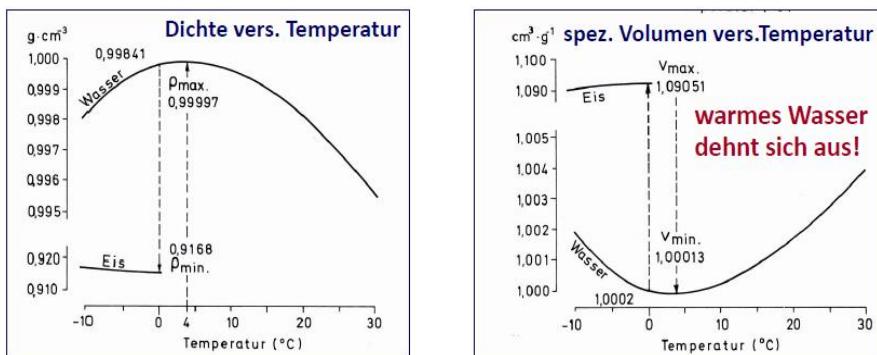
Eigenschaften, die sich aus Molekülform ergeben:

- Alle Aggregatzustände kommen unter Normalbedingungen vor
- Gas: unsichtbarer Wasserdampf
- Flüssig: Molekülketten bilden sich: Viskosität (Grad an Zähflüssigkeit von Flüssigkeiten)
- Eis: hexagonale kristalline Struktur
- Hohe Oberflächenspannung /Viskosität /Kapillarität: (Bsp. Glas kann höher als Rand gefüllt werden)

- Zusammenwirken von Kohäsion (gegenseitige Anziehung der gleichen Moleküle) und Adhäsion (Haftfähigkeit an Materialien, abhängig von Oberflächenstruktur): → Tröpfchenbildung

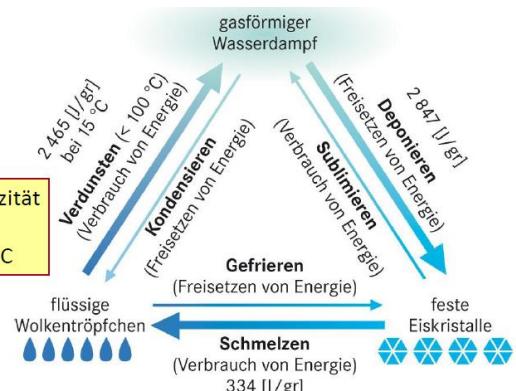


- Dichte'anomalie (höchste Dichte bei 4 °C):



- Hohe spezifische Wärme:** (Energie um 1g Wasser um 1 Grad Celsius zu erwärmen)
 - Wasser 4,2, Eis 2,1 und Gas 1,8 J/J
 - Bsp.: Wasser kocht schneller, wenn ein Deckel auf dem Topf ist
 - Wasser als Wärmespeicher: Maritimität/Kontinentalität
 - Wasser als Wärmetransporteur: Golfstrom, Heizung
- Hoher Energiebedarf bei Phasenübergängen** (Schnee bleibt auch bei Plusgraden noch liegen: hohe Schmelzwärme)

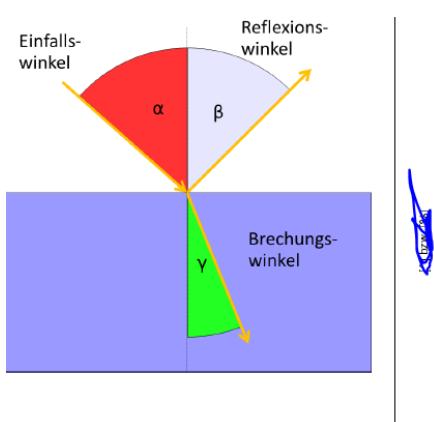
- 3,98: größte Masse auf kleinstem Raum
- unterhalb Abnahme: erste hexagonale Strukturen (nehmen mehr Raum ein): Volumensprung
- Oberhalb Abnahme: mehr Teilchenbewegung: mehr Raum
-
- Eis schwimmt oben
- Seen frieren von Oben her zu
- warmes Wasser schwimmt oben
- labile Schichtung des Wassers



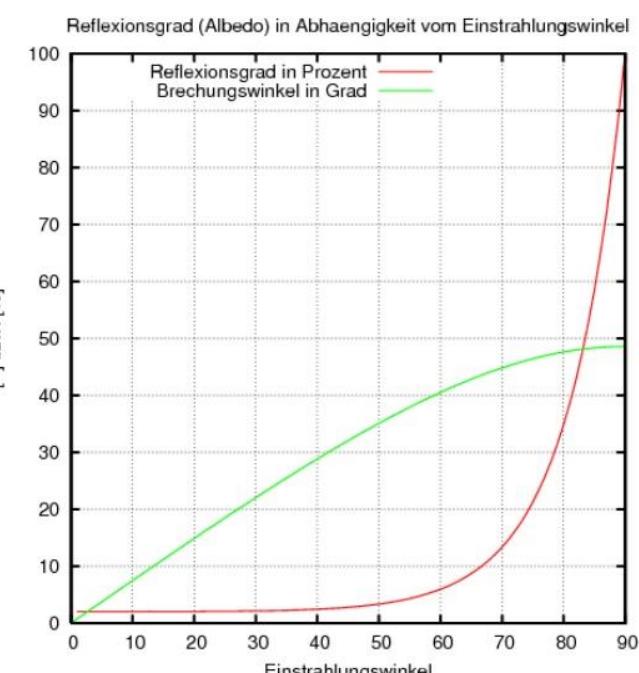
Spezifische optische Eigenschaften: (Brechung, Absorption)

Strahlungsabsorption durch Wasserdampf

Albedo von Wasser in Abhängigkeit vom Einfallswinkel:



- auch bei flacher Einstrahlung geht viel Energie in Gewässer (auch in hohen Breiten)





OH^- = Hydroxid-Anion
 H^+ = Wasserstoff-Kation
 H_3O^+ = Oxonium-Kation (protoniertes Wasser)

bei 22°C: 1l reines Wasser: 0,0000001 g H^+
 1l reines Wasser: 0,0000001 mol H^+

pH-Wert (potentia Hydrogenii) = $-\log [\text{H}^+ \text{ in mol/l}]$

z.B.: $\log_{10}(0,0000001) = -7 = \text{pH } 7 = 10^{-7} \text{ mol/l}$

pH	0 - 4	5 - 6	7	8 - 10	12 - 14
Reaktion	stark sauer	schwach sauer	neutral	schwach basisch	stark basisch

- Kaltes Wasser kann mehr CO₂/ O₂ aufnehmen
- nimmt mit steigender Temperatur ab

Bedeutung des Wassers im Erdsystem:

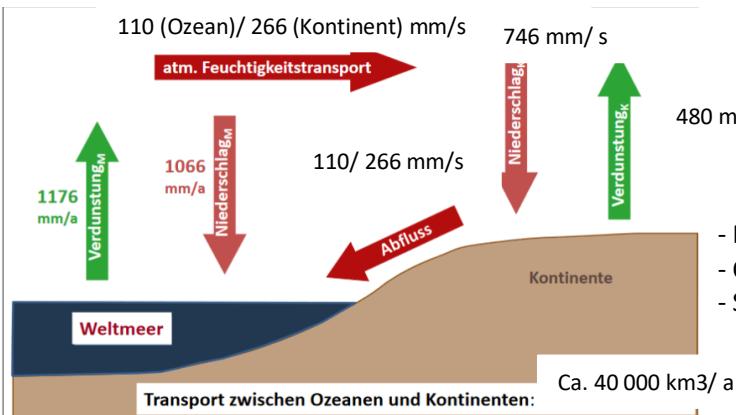
- Lösungsmittel (Technik, Mineralien aus dem Boden, ...)
- Baustoff und Lebensmittel für Organismen, Photosynthese, ...
- Lebensraum (Ozean, Seen, Flüsse, Grundwasser, ...)
- Transportmittel (Feststoff- + Lösungsfach, Verkehr, ...)
- Geomorphologischer Formungsfaktor (Küstenformen, Erosion, Eis, Verwitterung, ...)
- Energieträger (latente Wärme, Ozeanströme, Geothermie, ...)
- Regelgröße im Energiehaushalt (Albedo, Treibhauseffekt, ...)

3. Wasser auf der Erde und seine Verteilung

Bereich	Menge [km ³]	Anteil [%]	Schichtdicke [m]	Verweildauer Jahre, Tage
Meerwasser	$1348 * 10^6$	97,3 % des freien Wassers	2550	ca. 2500 a
Süßwasser	$36,1 * 10^6$	2,7 %	70	
Anteile Süßwasser:				
Eis	$27,8 * 10^6$	77 %	56	Dim 10^3 a
unterirdisch	$8,06 * 10^6$	22 %	15,7	1400 a
ungesättigt	$0,065 * 10^6$	0,8 %		1 a
Seen	$0,125 * 10^6$		0,24	17 d
Fließgerinne	$0,0012 * 10^6$		0,002	11 - 12 d
Q/a	$0,04 * 10^6$			
Atmosphäre	$0,013 * 10^6$		0,024	9 - 10 d
Umsatz/a	$0,4961 * 10^6$			

Die Verteilung des Wassers auf der Erde (nach Wilhelm 1997 erg. Korzun 1978)

Wasserkreislauf:



Allgemeine Wasserhaushaltsgleichung (Penck)

$$A = N - V - \Delta S$$

N = Niederschlag
 V = Verdunstung
 A = Abfluss
 S = Speicherterm

- Bestimmung von Aridität/ Humidität
- Ozean: höhere Verdunstung als NS: Abfluss als Ausgleich
- Speicher: Seen, Boden-/GW- Vorräte, Schnee/ Eis + Gletscher

- **Abflussverhältnis:** Anteil an NS, der abfließt (hoch in Antarktis, niedrig in Australien)

- **Verdunstungsverhältnis:** Anteil an NS, der verdunstet (hoch in Australien, niedrig in Antarktis)

→ addiert = 1, Abflussverhältnis hoch: Verdunstungsverhältnis niedrig und umgekehrt

Regionale Verteilung des Wasserkreislaufs:

- Europa: V/N: 0,57, A/N: 0,43 (Asien, Nordamerika ähnlich)
- Südamerika: viel Niederschlag, Abfluss und Verdunstung ähnliche Verhältnisse
- Afrika/ Australien: hohe Verdunstung, geringer Abfluss: trockener Kontinent V/N: 0,94, A/N: 0,06
- Antarktis: Wenig Niederschlag und Verdunstung, hoher Abfluss

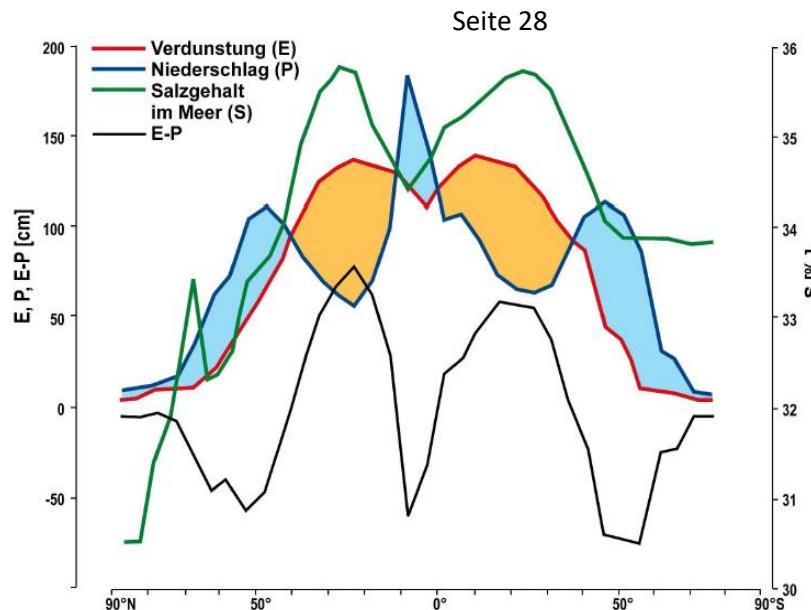
Physische Geographie I

Niederschlagsverteilung der Welt: (Meridianprofil)

- E-P: potentielle Verdunstung
- dynamisches System, abhängig von Sonneneinstrahlung
- orange: Sättigungsdefizit, blau: übersättigt
- SHK: NS/ Fläche größer, da weniger Fläche (weniger Land)

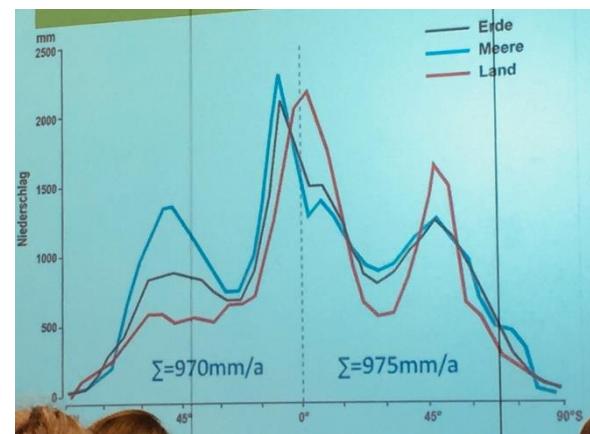
Verdunstung:

- Maxima im Bereich der Wendekreise: viel direkte Sonneneinstrahlung durch wenig Bewölkung, Luft ist nicht gesättigt und kann mehr Wasser aufnehmen
- Äquator: durch Bewölkung (Konvektion) geringere Verdunstung (weniger direkte Sonneneinstrahlung) + Luft sehr gesättigt (kann weniger aufnehmen)
- sinkt zu den Polen hin
- 90 Grad: wenig Wasser zum Verdunsten (geringe Niederschläge) und geringe Temperatur (geringer Einfallswinkel)



Niederschlag:

- Höchster Niederschlag in niederen Breiten (innere Tropen): hohe Sonneneinstrahlung: Konvektion: Luft schnell übersättigt
- mit höheren Breiten sinkt Niederschlag
- Minimum im Bereich der Wendekreise: trockene Passatwinde haben sich schon in der ITC abgeregnet
- kleines Maximum in den mittleren Breiten: Zyklonen bringen Wasser vom Atlantik mit
- Niederschlag aus Verdunstung: recycling
- Meere: zweites Maximum auf NHK extremer: Luft mit Wasser aus Atlantik regnet sich v.a. über Atlantik ab, spätestens über Osteuropa (Zyklonenfriedhof): geringer Landniederschlag
- Land: zweites Maximum auf SHK extremer: SHK: mehr Wassermassen → Luft hat mehr Wasser aufgenommen (stärker gesättigt), abregnent z.B. vor Anden



Salzgehalt:

- Höchster Salzgehalt: subtropischer Atlantik (Wendekreise): Hochdruck: wenig Wolken, starke Einstrahlung, wenig NS (wenig Verdünnung)
- lokales Minimum am Äquator: durch viel NS wird der Salzgehalt verdünnt
- Hemisphärenunterschiede: SHK weniger Landmassen: weniger Flüsse können in Ozeane münden (weniger Verdünnung)
- Salzgehalt steigt mit Verdunstung: direkt an OF-Wasser gebunden, abhängig von Verdünnung
- kleines Maximum auf NHK: Golfstrom
- extremer Abfall auf NHK: große Flüsse entwässern in Ozeane
- geringer Abfall auf SHK: weniger Landmassen, die in Ozean entwässern (verdünnen) + mehr Ozeanfläche zur Meereisbildung: Süßwasser wird entzogen

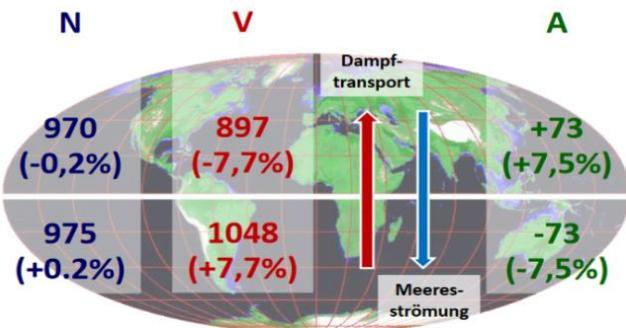
Brückner: globale Wasserhaushaltsgleichung

$$NM = VM - Dml + Dlm = VM - (Dml - Dlm) = VM - AL$$

$$NL = VL + Dml - Dlm = VL + (Dml - Dlm) = VL + AL$$

- Verdunstung Meer (VM)
- Niederschlag Meer (NM)
- Wasserdampf vom Meer zu Land (Dml)
- Verdunstung Land (VL)
- Niederschlag Land (NL)
- Wasserdampf Land zum Meer (Dlm)
- Abfluss vom Land (AL)

$$N = V + A \text{ oder } N - V = A$$



- NHK: mehr Land: weniger Verdunstung
- SHK: mehr Wasserfläche
- Ausgleich durch Dampftransport und Meereströmung

Wasserbilanz vor 18000 a: Meeresspiegel 120 m tiefer: Eis (weniger Abfluss, negative Ozeanbilanz)

Wasserkreislauf (qualitativ): Veränderung des Wassers im Kreislauf

Physikalische Veränderungen:

- Zustandsänderungen
- Energetischer Zustand
- Isotopische Zusammensetzung

Chemische Veränderungen:

- Verwitterungs- und Lösungsprozesse
- Stoffeinträge aus Landwirtschaft, Industrie, Verkehr, durch Erosion

Große Daten:

- Globaler Wasserumsatz: 496.000 km^3
- durch Verdunstung über Atmosphäre mit 13.000 km^3 Inhalt
- dafür 75 W/m^2 nötig (entspricht 45% der kurzweligen Strahlungsbilanz)
- 22.000 fache der globalen Primärproduktion
- Latenter Wärmefluss von hoher Bedeutung für globalen Wärmeaustausch

Änderung der isotopischen Zusammensetzung des Wassers im Kreislauf: Isotopenfraktionierung

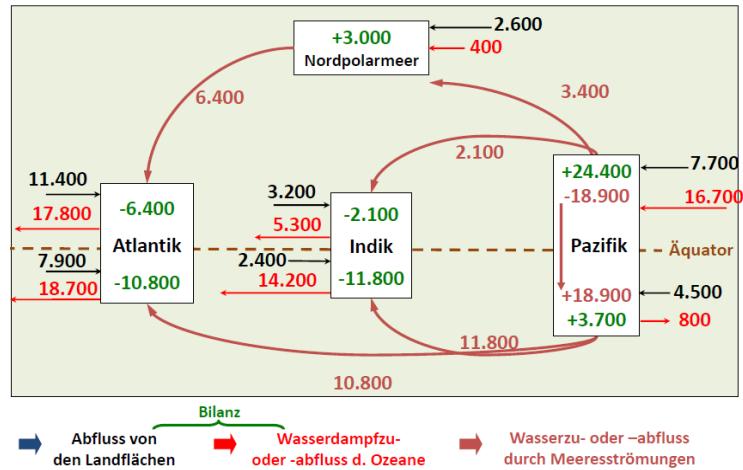
- Moleküle mit schweren Isotopen sind schwerer: mehr Energie / höhere Temperatur für Phasenübergang (Schmelzen/ Gefrieren, Sublimation/ Deposition und Verdunsten / Kondensieren)
- Schwere Isotopenspezies reichern sich in kondensierter Phase relativ an
- Fraktionierungseffekte bei niedriger Temperatur größer!
- Fraktionierungseffekt bei HD (schwerer Wasserstoff) größer als bei ^{18}O
- Breitenkreisparallel

- Fraktionierung: stufenweise Zerlegung eines Stoffes unter bestimmten äußeren Bedingungen

- Breiteneffekt: Abnahme am Gehalt schwerer Isotope im Niederschlag je größer Distanz zum Äquator (weniger Energie zur Verdunstung zur Verfügung), äquatornah mehr Verdunstung, viel leichtes Wasser verdampft und schweres bleibt übrig: höherer Anteil: über Verhältnis kann Verdunstungsmenge bestimmt werden

- Kontinentaleffekt: Abnahme an schweren Isotopenspezies im Niederschlag mit zunehmender Entfernung vom Meer („distance to coast“ Effekt, im Winter deutlich stärker als im Sommer (bei niedrigeren Temperaturen Effekt stärker ausgeprägt), Europa: Abnahme Irland -> Ural), schweres regnet zuerst ab (kondensiert zuerst), leichtes über Land

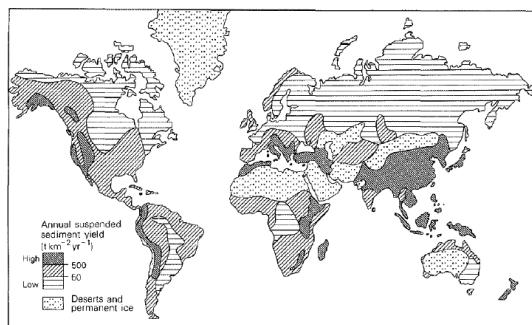
- Höheneffekt: Abnahme am Gehalt schwerer Isotopenspezies mit Höhe (temperaturabhängig)



Stoffliche Veränderungen im Wassertkreislauf

Warum ist Meerwasser salzig?

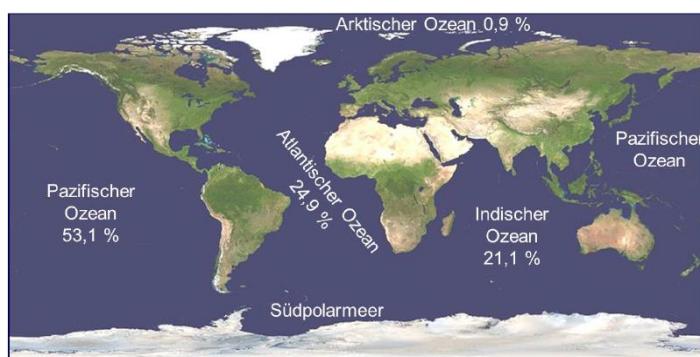
→ Mineraltransporten (Schwebstoffeinträge) aus Flüssen und Verdunsten von Süßwasser



Die jährlichen Schwebstoffeinträge in die Meere in globaler Perspektive
(Walling & Webb 1987)

Konsequenzen steigender CO₂-Gehalte im Wassertkreislauf

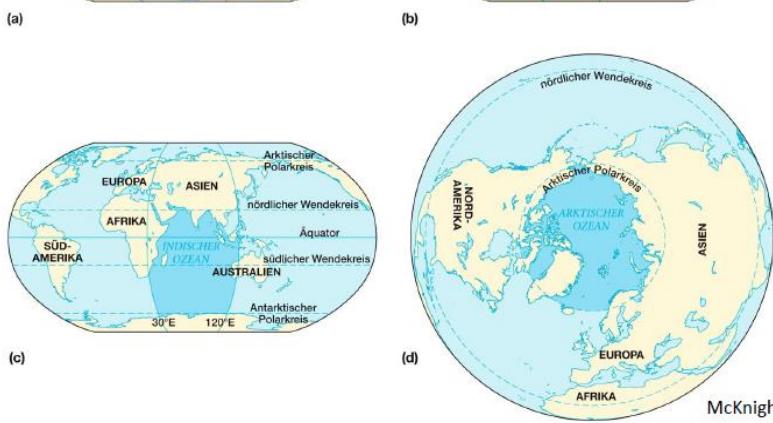
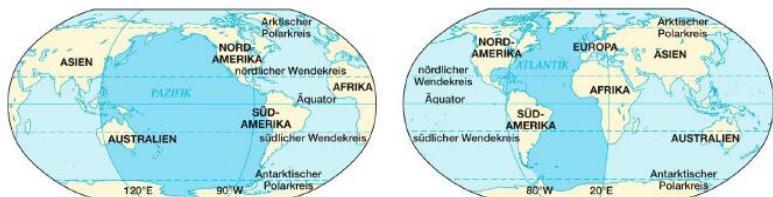
- Steigende CO₂-Gehalte im Wasser
- Höhere Biomasseproduktion
- Sauerstoffzehrung am Gewässerboden
- Absinken des pH-Wertes
- Vielfältige Auswirkungen auf Meeresorganismen
- Änderung des Aragonitgleichgewichts

6. Die Ozeane

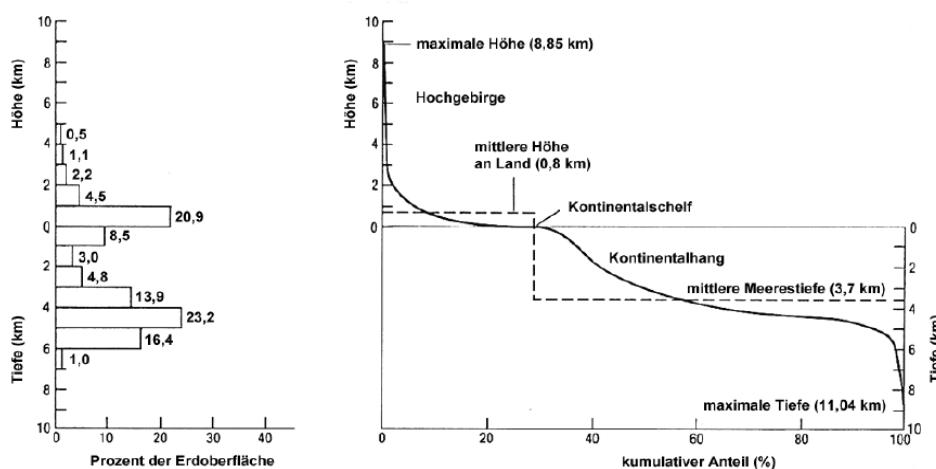
- 71% der Erdoberfläche von Wassermassen bedeckt
- Atlantik, Indik und Pazifik, Arktischer Ozean
- Entstehung der heutigen Ozeanbecken in vergangenen 200 Mio. Jahren vollzogen

Messung des Meeresbodens:

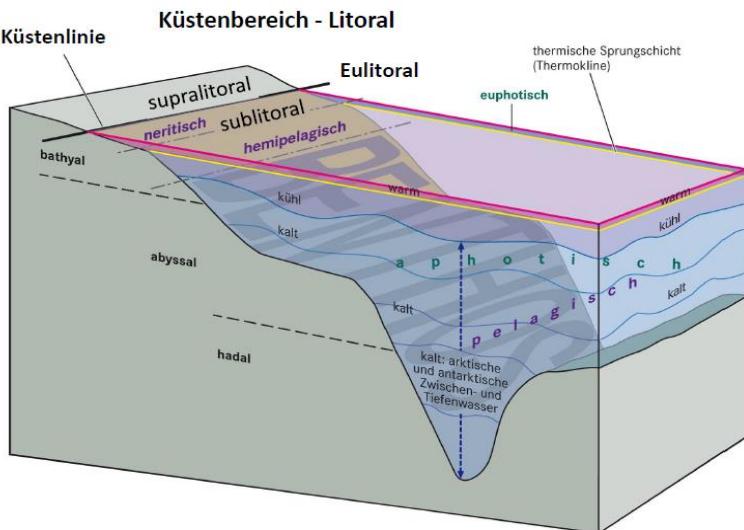
- Sonar: streifenweise Reliefaufnahme in Küstennähe
- Satelliten: Meeres-OF durch Erdanziehung mit Relief des Meeresbodens verknüpft (Art Spiegelbild): indirekt, ungenau, flächenhaft

**Häufigkeitsverteilung der Wassertiefe****Gliederung der Tiefe (grob)**

- Schelf (bis ca. 150 m Tiefe, Kontinentalsockel)
- Kontinentalhang
- Tiefsee
- Tiefseegraben



Vertikale Zonierung:



- **litoral:** Uferregion von Gewässern

- **Neritische Zone:** küstennah

- **Pelagial:** offener Wasserbereich

Gliederung der Tiefe:

- **Photische Zone:** Zone, in der Licht einfällt
- **Aphotische Zone:** Weniger Leben, Absinkprozesse
- **Thermische Sprungsschicht:** Durch Solarenergie erwärmte Warmwasserschicht (etwa 100-200 Meter, darunter Kaltwasser um die 4°C)
- Meeresboden: **Benthos**

Ursachen von Meeresspiegelschwankungen:

- Ebbe- Flut (tageszeitlicher Verlauf)

- El- Nino (jahreszeitlich)

- Sturmfluten (plötzlicher Anstieg)

- Dauerhafte:

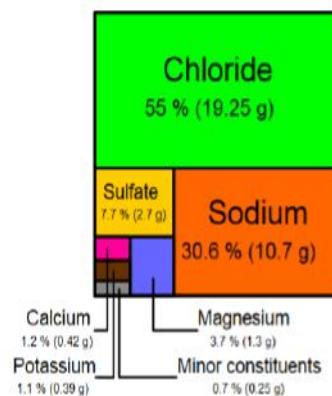
- **Isostasie:** Skandinavien: in letzter Eiszeit große Gletscher (hohes Gewicht), dünne Erdkruste und plastischer Mantel, Gewicht auf Erdkruste → Eindrücken in Mantel → Verformung der Kruste, Abschmelzen: Erdkruste drückt wieder hoch: jährliche Hebung um 1 cm in Skandinavien = gefühltes Sinken des Meeresspiegels durch Landanheben

- andere Möglichkeit, damit Land absinkt: Venedig: Bohren nach Gas und Öl: OF sinkt ab: Gas/ Wasser in Boden künstlich um dem entgegenzuwirken

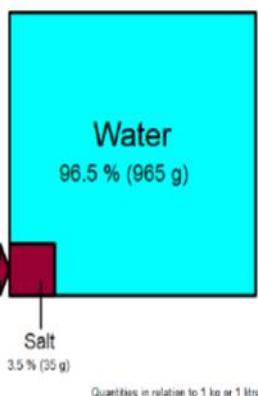
- **Eustasie:** wärmer werden: Abschmelzen von Landeis, freies Eis im Wasser schmilzt: keine Wasserspiegeländerung, + Ausdehnung von Wasser wenn es sich aufheizt (aufheizen von Ozeanen)

Chemische Zusammensetzung des Meeres:

Sea salts



Sea water



- Im Meerwasser nahezu alle Elemente gelöst vorhanden (Ozean als Senke für Stoffe: durch Subduktion von Platten/ Eindampfen wieder entzogen)
- mittlerer Salzgehalt 3,5 %, große räumliche Unterschiede
- Regionen mit hohem Salzgehalt: Mittelmeer (hohe Verdunstungsraten), Atlantik: Rocky-Mountains und Pyrenäen: gesättigtes Wasser aus Pazifik regnet ab: trockene ungesättigte Luft kommt über Atlantik an
- Wenig Salzgehalt: Mündungen von Flüssen, viel Niederschläge (Indonesien, Südamerika, Richtung Pole)
- Viel Salzgehalt: wenig Flüsse, hohe Verdunstung, Nachströmen von Salzwasser (Golfstrom, Trockenonen: Rotes Meer, Mittelmeer, nördlich und südlich des Äquators)

Dichteschichtung:

- homogene „mixed surface layer“/Mischungsschicht: geringe Dichte
- Schicht rapider Dichteunahme: Sprungsschicht (Pykn-, Thermo-, Halokline)
- homogener Körper kalten Tiefenwassers: hohe Dichte
- Trennschicht: Pyknokline:
 - Abrupter Dichtesprung (zwischen OF- Wasser und Tiefenwasser) abhängig von Temperatur und Salinität
 - In Tropen und Subtropen stark ausgeprägt: stabile Schichtung (mehr Salz: Verdampfen von Wasser)
 - In hohen Breiten: schwächer ausgeprägt

Wellenbewegung:

Wellen: Transport von kinetischer Energie

- Wind überträgt durch Reibung Energie
- Wassertransport: Wasser bewegt sich auf Orbitalbahnen
- Orbitalbewegung führt zur Wellenbewegung
- Resultierender Massentransport geringer als Wellenbewegung
- Orbitalbewegung führt zu Durchmischung

Ekman Transport**Die „Ekman-Spirale“**

- Windrichtung: Wind als Antrieb der OF
- induzierte Wasserbewegung
- Coriolis-Ablenkung wirkt senkrecht (Richtung hemisphärenabhängig)
- Resultierende Oberflächenströmung: Abweichung um 45 Grad

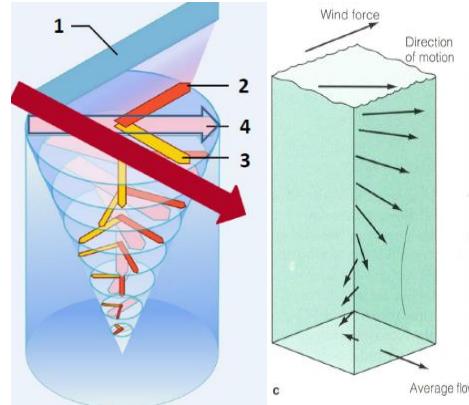
→ Muster setzt sich in die Tiefe fort

→ Resultierende Wasserbewegung 90° abweichend von Windrichtung

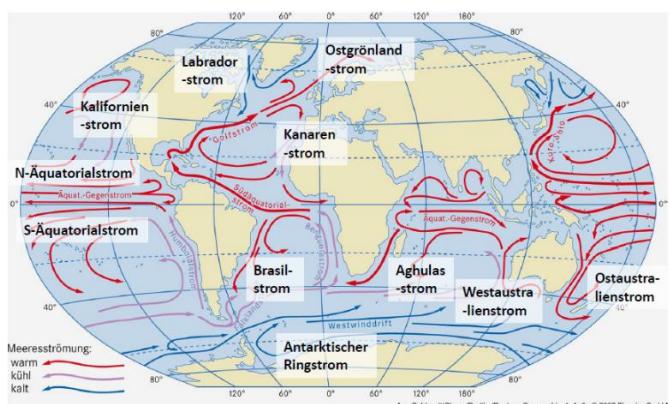
→ Ekman Transport

- oberste Wasserschicht überträgt Reibung auf unterliegende usw. (Windinduzierte Bewegung wird immer schwächer): Richtung ändert sich (Coriolisablenkung auch im Wasser und in der Tiefe): Bsp. Südamerika und Südafrika: Tiefenwasser fließt vom Kontinent weg: upwelling möglich

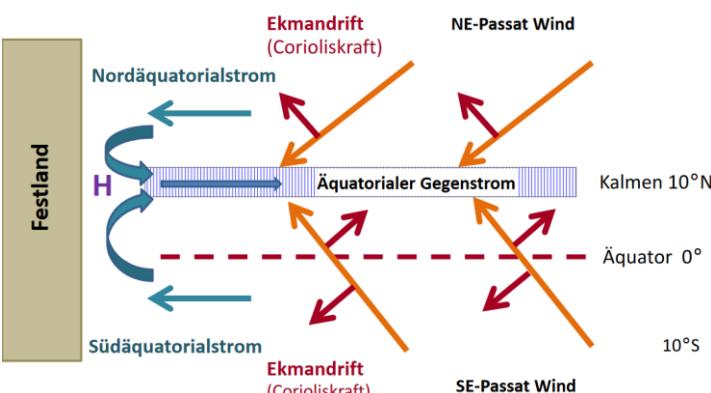
Mischungsprozesse: Wind wirkt auf Wasserfläche ein: Mischungsprozesse (bricht stabile Schichtung auf)

**Oberflächenzirkulation**

Beobachtung: im Zentrum der Ozeanwirbel erhöhte Wasserspiegel



- Ursache in Coriolis-Ablenkung
- Ablenkung der Wassermassen auf NHK nach rechts, auf SHK nach links
- Konsequenz: erhöhter Wasserspiegel im Zentrum der Wirbel
- Teilweise Strömungsform aufgrund der Kontinentformen
- Ostseite der Kontinente: warmes Wasser strömt Richtung Pol
- Westseiten der Kontinente: kaltes Wasser steigt auf
- Meereströmungen windinduziert:
 - Polare Ostwinde: geringer Einfluss, da auf SHK nur Kontinent, auf NHK Ozean von Land umschlossen
 - Westwindzone
 - SE-/ NE-Passate

Äquatorialer Gegenstrom:

- Vorkommen im Pazifik, Indik und verminderd im Atlantik (Strecke zum Ausbilden zu kurz)
- Passate treiben Wasser an: divergierende Wassermassen + Druckgradienten
- Durch Ekmandrift (Corioliskraft) entsteht ein Nord-/ Südäquatorialstrom (Divergenz des Wassers am Äquator)
- Rückströmung als äquatorialer Gegenstrom: teilweise aufgrund des Druckgradienten und teilweise aufgrund der Richtungsänderung des SE-Passats
- ITC im Mittel nach Norden verschoben: SE-Passat wechselt Richtung (SW-Monsun)

Der Golfstrom:



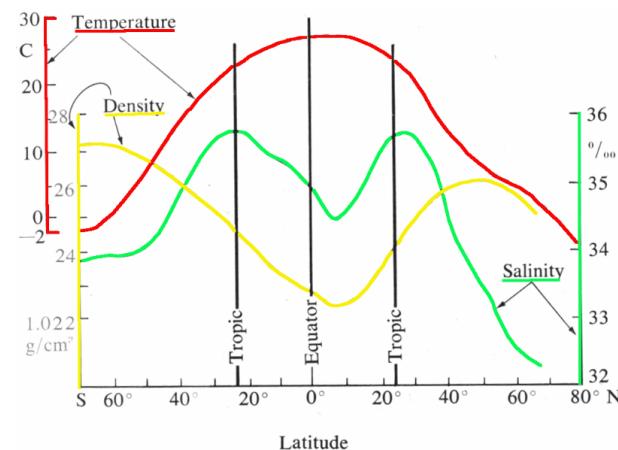
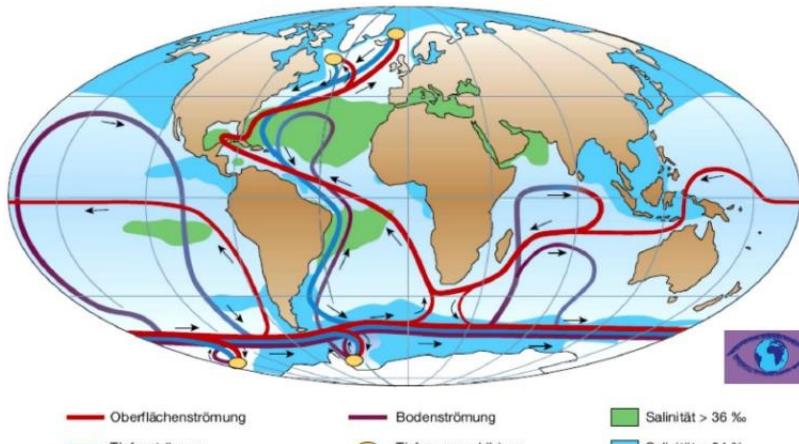
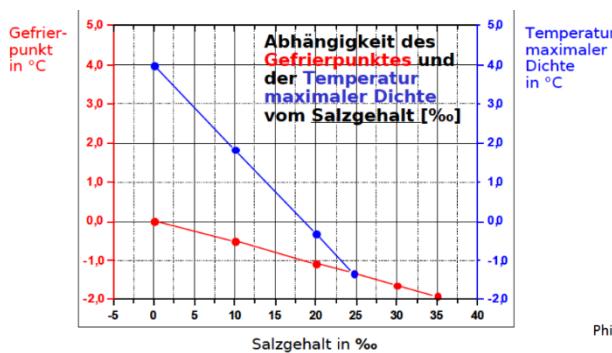
- Ursprung: Vereinigung des Nordäquatorialstroms mit Antillenstrom
- 50-70 km breit, bis 1000 m tief
- 55-63 Sv (= Knoten)
- Abschnürung von Warm- und Kaltwasserwirbeln
- Warmwasserwirbel nördlich des Golfstroms: rechter Drehsinn
- Kaltwasserwirbel südlich des Golfstroms: linker Drehsinn
- Mäander

Trennschicht Pyknokline:

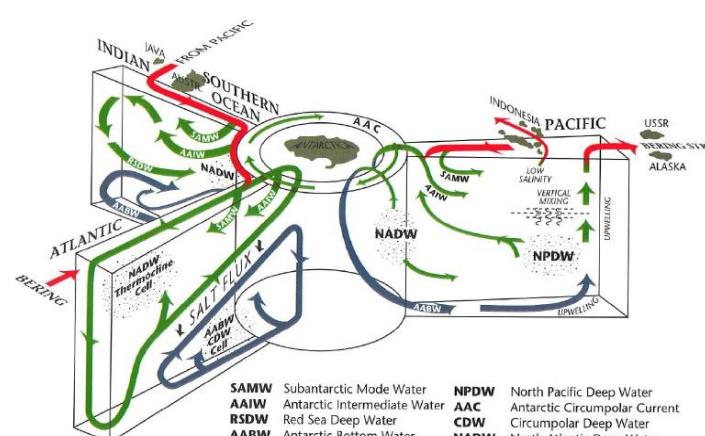
- Abrupter Dichtesprung abhängig von Temperatur und Salinität (Sprungschicht) (je kälter und salzhaltiger, desto dichter)
- In Tropen und Subtropen stark ausgeprägt stabile Schichtung
- In hohen Breiten: schwächer ausgeprägt

Thermohaline Zirkulation:

- Temperatur:** abhängig vom Einstrahlungswinkel
- Dichte:** warm: mehr Teilchenbewegung: mehr Platz: weniger Teilchen auf einem Raum: niedrigere Dichte (bei 4 Grad höchste Dichte)
- Salz** (je mehr Salz, desto dichter und schwerer Wasser):
 - Wendekreise: hohe Verdunstung und hoher NS: hoher Salzgehalt
 - ITC: viel NS: niedriger Salzgehalt (verdünnnt)
 - zu Polen hin: sinkt: wenig Verdunstung (Einfallsinkel sinkt), mehr NS (am Nordpol weniger Salz: Zuflüsse aus Flüssen von Kontinenten)



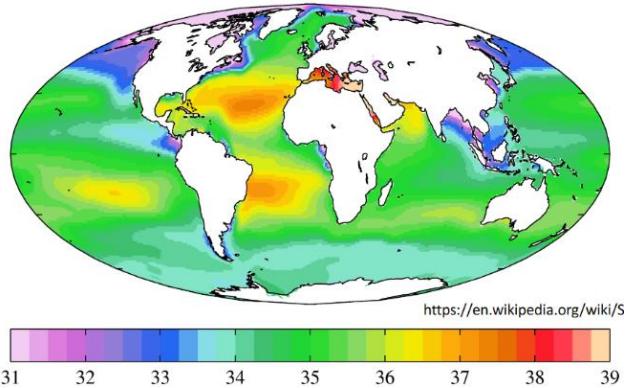
- Ursache: räumliche Unterschiede in Temperatur + Salzgehalt
- Gesamtaustausch der Ozeane: Vermischungsprozess (Verbindung von OF- und Tiefenströmung)
- Tiefenwasserbildung in Antarktis (Weddel- See, Antarktischer Ringstrom):
- Anfrieren von Wasser an Schelfeis durch Abkühlung (Meereisbildung): Salz wird entfernt: Meereis ist Süßwasser (Salzsohlenbildung)
- Extrem kaltes und salzreiches Tiefenwasser sinkt in Tiefe
- Tiefenwasserbildung: Absinken des Golfstroms bei Grönland: Wasser wird schwerer (es kühlte ab + Abgabe von Energie des Golfstroms) + hohe Salinität (durch Anreichern von Salz bei Wendekreisen)



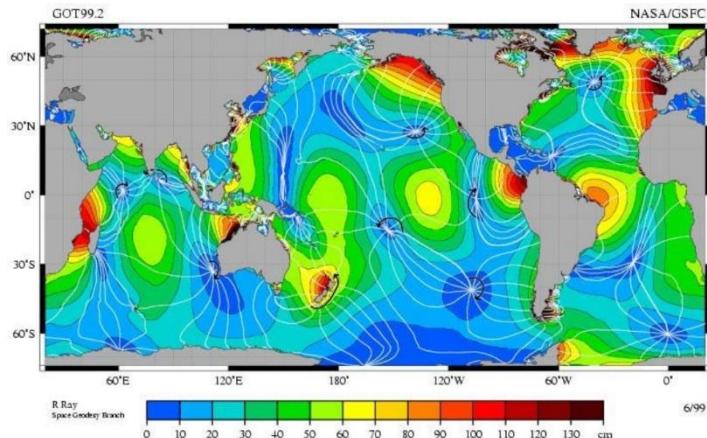
Salzgehalt der Meere:

Wasser im Atlantik auf NHK salzreicher als im Pazifik:

- Westwinddrift: Abregnen vor Rocky Mountains: Rückfluss in Pazifik und verdünnen
- trockene und warme Luftmassen (Föhn) über Atlantik: kein NS und Aufnahme von verdunstetem Wasser

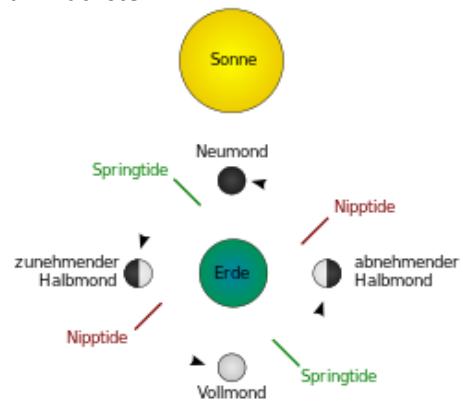
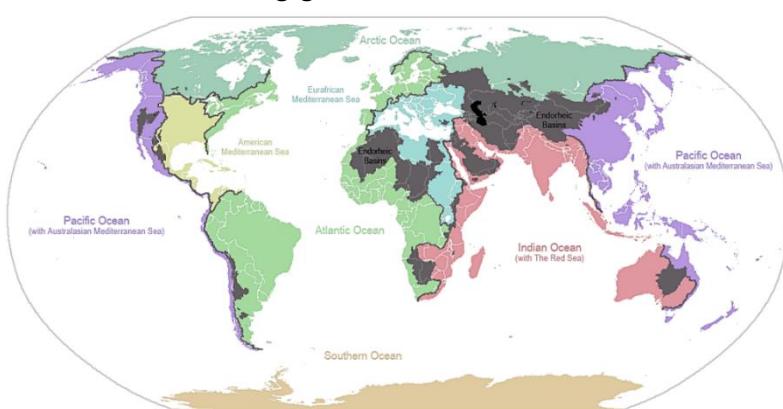


Gezeitenkräfte:



- Gezeitenwellen der Meere durch **Gravitations- und Fliehkräfte** im System Erde – Mond – Sonne
- **Springtiden** (Kräfte wirken in eine Richtung): Besonders stark ausgeprägte Gezeitenwirkung
- **Nipptiden** (Kräfte wirken in entgegengesetzte Richtungen): Besonders schwach ausgeprägte Gezeitenwirkung
- Durch Überlagerung der Gezeitenwellen: **stehende Wellen**
- Punkte ohne Tidenhub: **Amphidrome**
- Durch Coriolisablenkung Rotation der Tide um Amphidrome
- **Tidenhub**: Höhendifferenz zwischen Niedrig- und Hochwasser
- **Tide**: Gezeitenverlauf in der Zeit von einem Niedrigwasserstand bis zum nächsten

Kontinentale Einzugsgebiete:



Verteilung terrestrischer Einzugsgebietsflächen auf Ozeane und Binnengebiete:

Kontinent	Atlantik 10^6 km^2	Eismeer 10^6 km^2	Indik 10^6 km^2	Pazifik 10^6 km^2	Binnen 10^6 km^2	Gesamt 10^6 km^2
Asien	0,5 1,1	11,2 25,5	11,7 26,6	8,2 18,6	12,4 28,2	44,0
Afrika	14,9 49,9	-,- -,-	6,1 20,4	-,- -,-	8,9 29,7	29,9
Nordamerika	8,3 34,6	10,2 42,5	-,- -,-	4,5 18,7	1,0 4,2	24,0
Südamerika	16,3 90,0	-,- -,-	-,- -,-	1,0 5,6	0,8 4,4	18,1
Europa	6,5 65,0	1,6 16,0	-,- -,-	-,- -,-	1,9 19,0	10,0
Australien	-,- -,-	-,- -,-	2,9 33,0	1,8 20,5	4,1 46,5	8,8
Festland	46,5 34,4	23,0 17,1	20,7 15,4	15,5 11,5	29,1 21,6	134,8

Ozeane als Teil des Erd- Systems:

- Ozeane bislang unzureichend erforscht
- Die wichtigsten Stoff- und Energieflüsse direkt mit den Ozeanen verknüpft
- Nutzungsprobleme und Klimawandel fordern vermehrt Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Politik für Weltmeere
- Ozeane weitgehend „rechtsfreier“ Raum
- Schiffverkehr v.a. an Küsten
- Ozean als Co2 Senke

- Europa: 19% Binnen: Wolga mündet in kaspisches Meer (Binnensee)

Chlorophyllgehalt des Ozeanwassers: Indikator für Nährstoffgehalt

5. Die Kryosphäre und ihre Bedeutung im globalen Wasserhaushalt

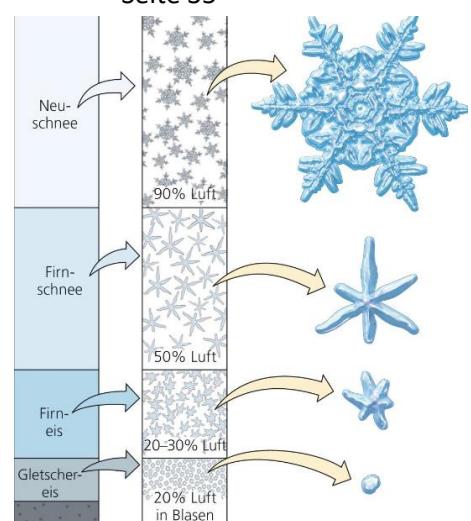
- Kryosphäre (3% Süßwasser, 2/3 davon Eis):

- Glaziologie: Schneedecken, bewegtes Eis. Gletscher
- Ozeanographie: Meereis
- Pedokryologie: Bodeneis, Permafrost

- Nur Gletscher und Eisschelfe haben Auswirkung auf Meeresspiegelanstieg

Metamorphose von Schnee:

- Schneeflocke: sechseckig: energetisch am besten + Dipole brauchen jeweils einen Partner: ungleiche Anzahl nicht möglich
- Schnee → Gletschereis durch Gefrieren und Tauen + Druck: Formveränderung (immer kompakter: Porenvolumen sinkt)
- je trockener, desto länger dauert Sinterung → Firn/ Eis Grenze umso tiefer, je länger Sinterung dauert (je trockener der Schnee)



Gletscher:

Massen aus körnigem Firn- und Gletschereis, die sich vom Nährgebiet, wo sie entstehen, zum Zehrgebiet, wo sie abschmelzen, bewegen.

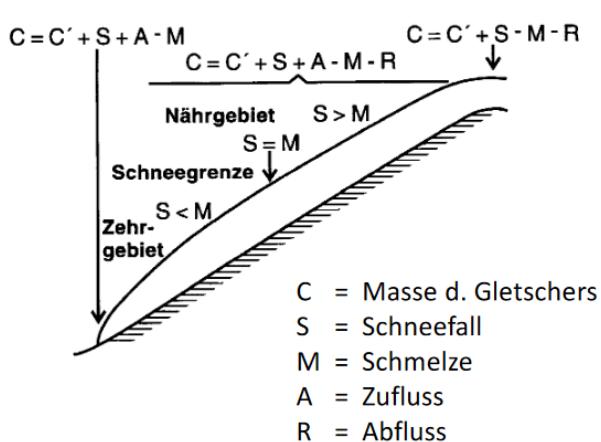
Schneeart	Raumgewicht [kg/m³]	Porosität [%]
Wildschnee	10 - 30	99 - 97
Pulverschnee	30 - 60	
gepresster Schnee	60 - 100	93 - 89
stark gepr. Schnee	100 - 300	89 - 67
tr. gesetzter Schnee	200 - 400	
nasser gesetzter Schnee	400 - 550	
trockener Firn	400 - 700	56 - 24
nasser Firn	600 - 800	50 - 20
Gletschereis	917	0

- Firn: verdichteter Altschnee (liegt bereits 1 Jahr lang)
- Verdichtung durch Auflast und gasförmigen Austausch
- Gletschereis durch Sinterung von Firn (Dauer: 300 a)
- Tiefe der Firneisgrenze: Tibet 25m, Grönland 75m, Antarktis 100- 150m
- Firn mit Schmelzwasserfast doppelt so dicht als trockener
- Nährgebiet: Akkumulationsgebiet
- Zehrgebiet: Ablationsgebiet
- Gletscher mit Inlandeis bedecken ca. 10% der Landfläche
- während des Pleistozäns zeitweise bis über 30%

Gletscherbedeckung im Pleistozän:

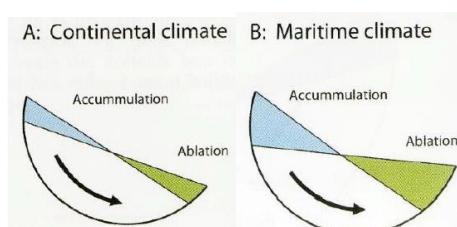
- Nordamerika und Teile von Europa: Absinken des Meeresspiegels
- heute: v.a. Alpen, Himalaya, Alaska und Pole mit Gletschern bedeckt

Gletscher Massenhaushalt:



- Nährgebiet (Akkumulation)
- Zehrgebiet (Ablation)
- Lage ergibt sich aus Massenhaushalt des Gletschers
- getrennt von Gleichgewichtslinie
- Weniger NS: Gleichgewichtslinie wandert nach oben
- positive Massenbilanz: Gletscher rücken vor
- negative Bilanz: Zurückschmelzen des Gletschers
- Schneegrenze ist die Höhenlage, bis zu der lokal noch Schnee liegt (orographische Schneegrenze)
- Höchste jährliche Lage der Schneegrenze im Gebirge: klimatische Schneegrenze: Alpen ca. 2,8 km, Skandinavien ca. 1 km, Spitzbergen ca. 450 m: nimmt mit steigendem Breitenkreis ab
- Firmlinie: Firn nicht mehr von Schnee bedeckt

- kontinentales Klima: geringer Massenumsatz (Geringer Gewinn/ Verlust), z. B. zentralasiatische Gletscher
- Maritime Klima: großer Massenumsatz (viel Schnee/ Schmelze), z.B. in Neuseeland



Gletschertypen: (Diagramm nach Größe sortiert)

- Nach Gestalt (morphologischen Typen)
- Nach thermischen Verhältnissen: kalte (Polare Gletscher) und temperierte Gletscher (Wasserfilm am Boden, niederer und mittlerer Breiten)
- Nach Bewegungsart: basales Gleiten und Blockschollenbewegung
- Nach Ernährungsweise

Morphologische Typen:

- Relief verhüllend: Dynamik abhängig vom Eis und nicht Relief (fließt über Relief: kein Einfluss)
- Relief überragt: Gletschereis fließt kanalisiert im Relief ab: Relief bestimmt Abfluss

Inlandeis:

- Untergrund wirkt schwach auf Oberflächenformen
- Flache Eiskuppen mit geringer Oberflächenneigung (<2°)
- Eis grenzt direkt oder mit Auslassgletschern ans Meer: Abfluss direkt ins Meer
- Geringer Moränengehalt (kein Gestein, da kein Berg)
- Großer Flächenanteil ist Nährgebiet
- Bei Antarktika grenzt Nährgebiet direkt ans Meer (fast immer: gesamter Eiskörper ist Nährgebiet)

Eiskappen:

- Eisfluss aus Eisdynamik
- Bsp. Vatnajökull (größter europäischer Gletscher): Relief verhüllt, Schneegrenze liegt mitten im Eis, viele Auslassgletscher (Eis fließt darüber ab)

Vorlandgletscher:

- Bsp. Malaspina Gletscher in Alaska
- kanalisierte Eisstrom im Kanal (seitlich begrenzt), Begrenzung fehlt: Eis läuft auseinander und bedeckt Vorland
- mit Moränensedimenten bedeckt

Talgletscher:

- Bsp. Beringgletscher in Alaska
- Eisstrom durch Relief gesteuert: Eisstromnetz

Basales Gleiten

Bewegung durch Regelation (Wiedergefrierprozesse) und Wärmefluss

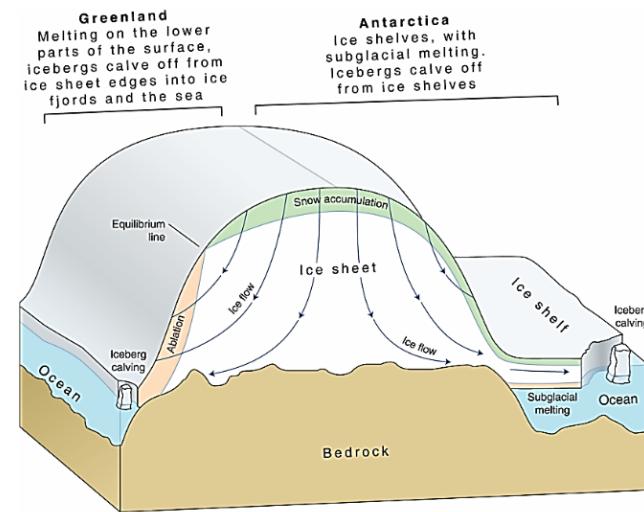
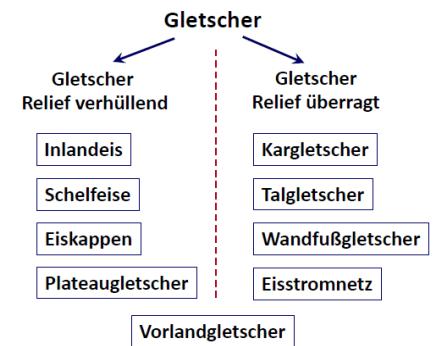
- Bei Schmelzwasser am Boden (temperierte Gletscher)
- Gleitbewegung auf Wasserfilm
- Gleiten auch bei hohen Spannungen vor und nach Hindernissen (Druckschmelzpunkt erreicht: mehr kann gefrieren: Lee- Seite gefriert: Rundhöcker)
- Regelation (Schmelzen und Wiedergefrieren) an kleinen Hindernissen
- Nur an temperierten Gletschern

Deformationsfließen

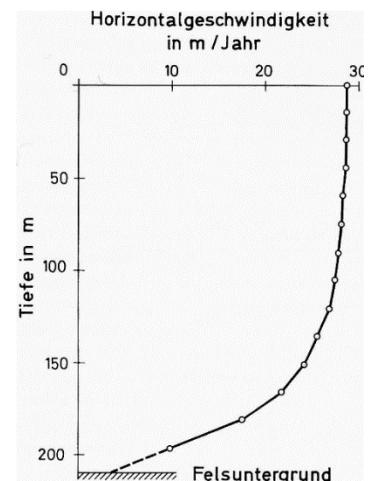
- strömende Bewegung: mechanische Beanspruchung des Eises
- Verschiebung entlang von Eiskörnern: Scherflächen
- Deformation von Eiskörnern → großer Druck: kleine Körner
- Umkristallisation des Eises unter hohem Druck: Eis verschiebt sich gegeneinander

Blockbewegung

- Gletscher zeigen z.T. unterschiedliche Bewegungsprofile
- Bei höheren Temperaturen oder geringer Geschwindigkeiten: laminar
- Bei tiefen Temperaturen, guter Ernährung oder hoher Geschwindigkeit: Blockbewegung
- Blockbewegung auch an OF sichtbar: aufgelöst in Seracs (OF reißt auf: Eistürme und Eisspalten bilden sich)



Unterschiede zwischen grönlandischem und antarktischem Inlandeis (UNEP, o.J.)

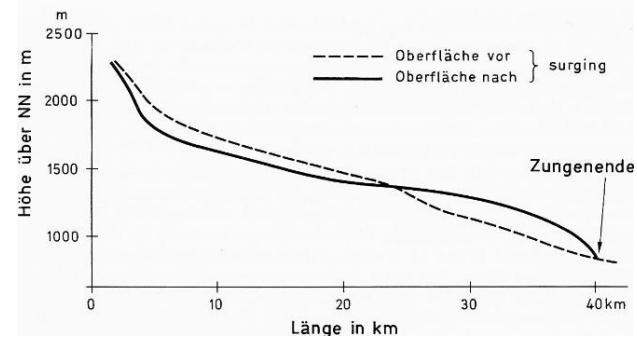


Surges

- Ca. 1% der Gletscher zeigen zeitweise extreme Fließgeschwindigkeiten (bis zu 100m pro Tag)
- Im Längsprofil gut sichtbar
- Ursache:

- Änderungen im hydrologischen Regime
- Geothermischer Einfluss (z.B. Vulkan unter Gletscher)
- Rhythmisches Phänomen aus Massenzuwachs und Stabilität

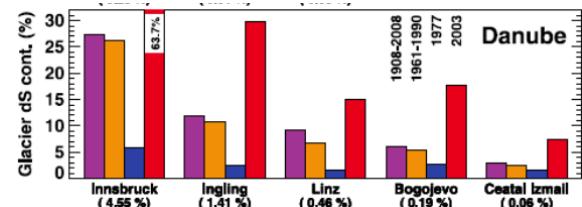
- Besondere Verhältnisse in Vulkangebieten: Island
- Extreme Abflussereignisse: Jökullaups
- Gletscherläufe auch bei Ausbrechen von Gletscherseen (Beispiele: Baltischer Eisstausee, Laurentischer Eisstausee)

**Gletscher Bedeutung in der Hydrologie:**

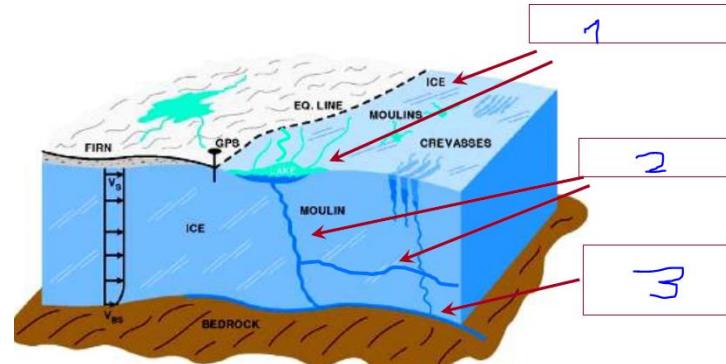
- Langfristige Speicherfunktion (10^3 - 10^6 , starke Schwankungen in Warm- und Kaltphasen) der Gletscher: Meeresspiegel)
- Kurzfristige saisonale Speicherfunktion
- Glaziale Abflussregime zeigen höchste Abflussschwankungen
- Je größer Gletscheranteil, desto größer Schwankungskoeffizient, dennoch wichtige regulierende Funktion in vielen Gebieten
- Wasserversorgung im Sommer bei hoher Evapotranspiration

Gletscherabfluss:

- Gletscherabfluss nur spürbar in direkter Nähe, weiter werg überwiegen z.B. Flüsse/ NS
- Winterhalbjahr: geringe Abflüsse
- Sommerhalbjahr: teilweise extreme Abflüsse
- starke Schwankungen des glazialen Abflusssystems
- kurze Speicherfunktion



Gletscherabfluss im August, Bsp. Donau (Anteil der Gletscherschmelze am Abfluss)

**Abflussmöglichkeit eines Gletschers:**

- 1: Entwässerung auf Gletscher: supraglazialer Abfluss
 - 2: Entwässerung im Gletscher: englazial: Röhrensystem (Druck: Höhenunterschied gegen Gefälle möglich)
 - 3: unter Gletscher: subglazial
- Wasser stammt von NS und Schmelzprozessen
 - Abfluss in supraglazialen Kanälen
 - Kann in supraglazialen Seen münden/ in Gletschermühlen bis an Basis gelangen
 - Abfluss auch im Gletscher/ im Gestein unter Eis (Nye channels: hoher Druck und Geröll: tiefe Kanäle)

Grönland

- Grönland: 2 mio km² größte Insel (1,7 mio. km² Inlandeis zzgl. 65.000 km² Plateaugletscher)
- Größte Eismächtigkeit ca. 3400 m, 2.9 mio km³ Eismasse
- Besteht aus zentraler Eiskuppel mit 3280 m und südlicher Kuppel mit ca. 2850 m
- durch große Auslassgletscher drainiert
- Zur Eismitte Fließraten gegen 0, nach außen hin stark zunehmend, nur im Norden Schelfeis
- NS ca. 360 mm/a, Süden 638 mm, Westen ca. 296 mm zentrale + nördliche Gebiete (kälter) ca. 165 mm

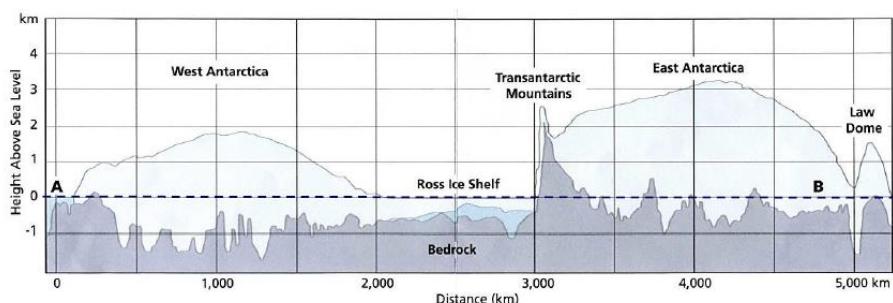
Entwicklung:

- Seit 1990er Jahren: Zunahme des Massenverlustes
- Akkumulationsraten bleiben nahezu konstant
- Deutliche Zunahme von Schmelze und Abfluss

Antarktika

- Höchster Kontinent, 60% liegen über 2000m: Kältepol Antarktis
- Festland teilweise unter Meeresspiegel: Isostasie
- Aktiver Vulkanismus (Mt. Erebus)
- Mehrere Eiskuppeln (Dome)
- Alter des Eises bis über 900.000 Jahre: EPICA
- Eis fließt am Rand am meisten
- Subglazialer See Wostok

Inlandeis:



Profilschnitt durch die Antarktis mit 400-facher Überhöhung (nach Blümel 1999, S. 59)

Schelfeisbildung:

- auf Meer schwimmende Gletschermasse (noch mit Kontinent verbunden), zusätzlich Schnee auf Schelfeis
- Abbrechen durch Gezeiten und Stürme
- Verluste v.a. im Bereich des Schelfeises der Westantarktis, positive Massenbilanz am Rand
- Eiszunahme in der Ostantarktis (stabil)
- Abnahme im Westen (leicht negativ), v.a. antarktische Halbinsel Verluste
- Konsequenzen abschmelzender Inlandeismassen: Veränderung des globalen Wasserhaushalts, Meeresspiegel steigt durch Massenverlust von Festlandseismassen

6. Das Wasser des Bodens

Grundwasser – Begriffe nach DIN 4049

Grundwasser: Wasser im Untergrund, das alle Hohlräume zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch Schwerkraft bestimmt wird

Grundwasserleiter: Gesteinskörper, die Hohlräume enthalten und damit geeignet sind Grundwasser zu leiten, z.B. pleistozäne Schotter

Grundwasserhemmer: Schlecht leitende Gesteinskörper (z.B. Sand: kleine Hohlräume, pleistozäne Sande in NDTL)

Grundwassernichtleiter: Gesteinskörper leitet kein Grundwasser (z.B. Ton, Wasser gelangt zwar in Hohlräume aber kann sich nicht weiter bewegen)

Grundwasserkörper: eindeutig abgrenzbares Grundwasservorkommen: oben: GW- OF, unten: Hemmer/ Nichtleiter, Seitlich: Gesteine, Flüsse (je nach Jahreszeit ist Füllung verschieden hoch: Sommer wenig (Pflanzen), Winter viel (NS))

Grundwasseroberfläche: obere Begrenzung, Grundwassersohle (Hemmer/ Nichtleiter) die untere Grenzfläche eines GW-Körpers

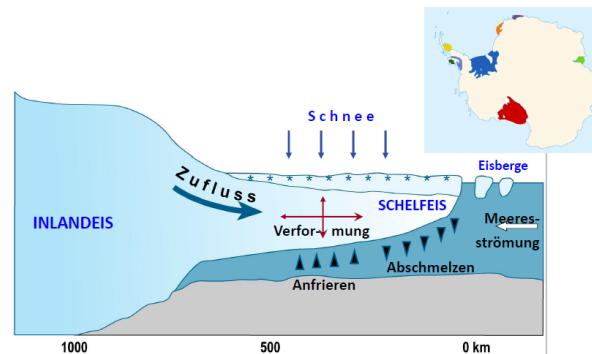
Freies Grundwasser: tritt dann auf, wenn sich der freie GW-Oberfläche innerhalb des GW-Leiters einstellt: GW muss sich frei bewegen können

Gespanntes Grundwasser: wenn freier Anstieg der Grundwasseroberfläche durch GW- Hemmer oder GW-Nichtleiter behindert wird: steht unter Druck

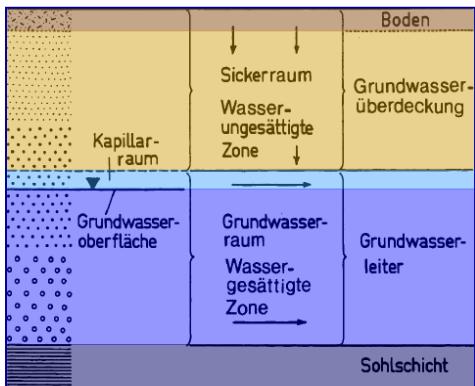
Grundwasserstockwerke: Grundwasserkörper durch mehrere übereinander liegende GW-Leiter und GW-Hemmer gegliedert



- Profil verdeutlicht Zeitteilung der Antarktis
- Depressionen bis -2000 m in Westantarktis
- Eiskuppeln gut erkennbar
- Antarktisches Phänomen: Schelfeis: auf dem Meer schwimmende Gletschereismasse, die noch mit Kontinent verbunden ist
- Positive Massenbilanzen am Rand de



Prozesse am Rande des Antarktischen Kontinents im Bereich des Schelfeises (nach Blümel 1999)



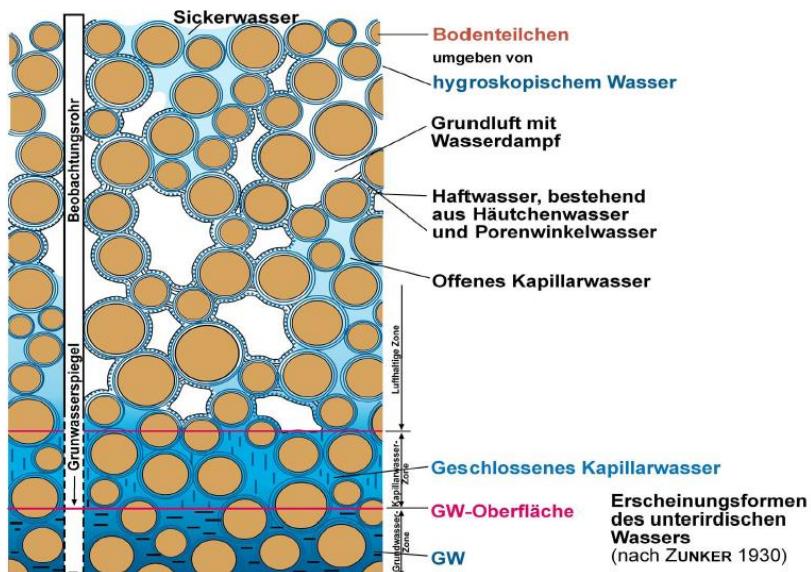
alle Hohlräume mit Wasser gefüllt

- Sickerung: Filtration
- Sohlschicht: wasserundurchlässige Gesteine
- nach DIN 4049 (von DIN-Organisation festgelegte Norm für Hydrologische Grundbegriffe)

Ungesättigte Zone „Bodenwasser“

Gesättigte Zone „Grundwasser“

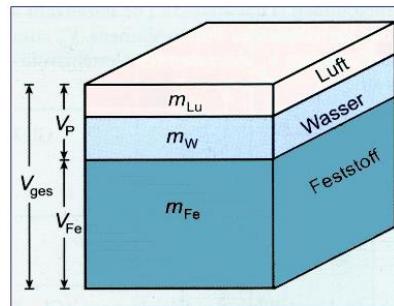
- wassergesättigt:



- Gesamtvolumen [m^3]: V_{ges}
- Festvolumen [m^3]: V_{Fe}
- Porenvolumen (Hohlräumanteil) [m^3]: V_P
- Porosität: NP in % (Porenanteil in %)
- Wasservolumen [m^3]: V_W
- Luftvolumen [m^3]: V_L

$$V_P = V_{ges} - V_{Fe}$$

$$n_p = \frac{V_P}{V_{ges}}$$

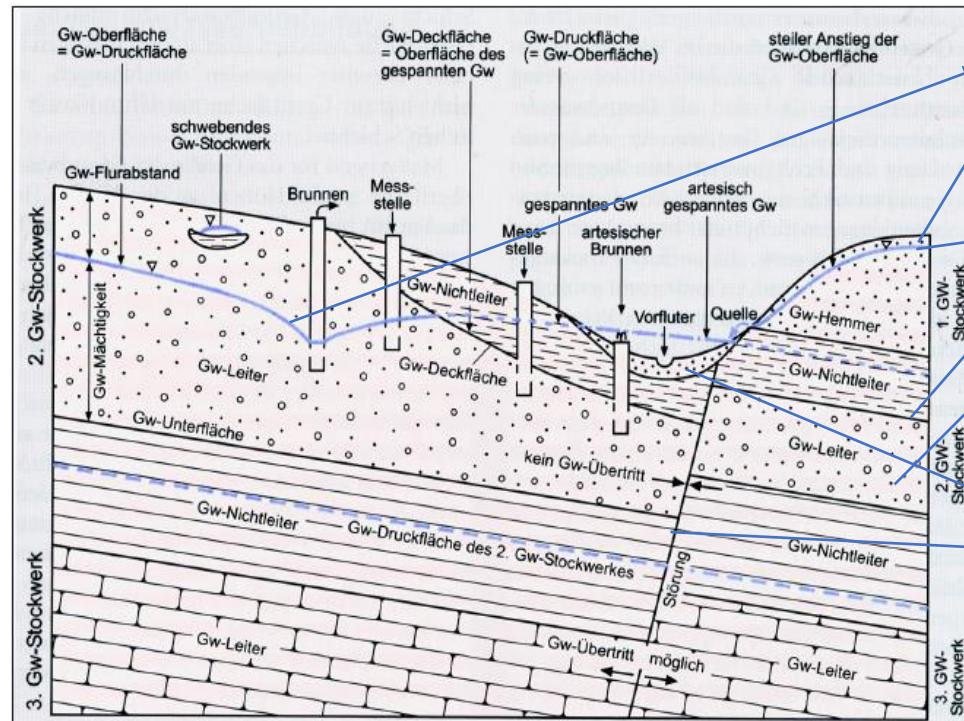


Inhaltsstoffe des GW

abhängig vom Gestein, Salzwassereintrag, Prozessen an OF

Die Verteilung der Phasen im Untergrund

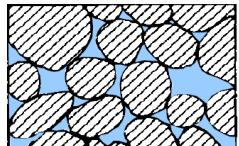
Hydrogeologisches Untergrundmodell:



- sinkt um Entnahme
- freie GW- OF
- gestrichelte Linie: gespanntes GW
- steil geneigte GW- OF: leitet schlecht, sanft geneigt: leitet gut
- Tonartige Gesteine
- Lockergestein
- artesischer Brunnen: durch Druck Anstieg bis zum gespannten GW
- Wasser über Landschaft
- Tektonische Verschiebung

Unterscheidung je nach geologischer Ausprägung des Untergrundes:

Porenwasserleiter:



- **Bsp.:** Pleistozäne Sande/ Schotter, Moränen, Holozäne Auensedimente, Sandsteine, Vulkanische Sedimente (Tephra)
- hauptsächlich Lockergesteine (GW füllt Porenraum zusammenhängend aus) → hochpermeabel
- Mehr oder weniger starke Bindung des Wassers im Porenraum in Abhängigkeit von Körnung (grobkörnig: schwache Bindung an mineralische Substanzen und umgekehrt)

→ feinporig (hohe Filterung) aber viele Poren: hohe Ergiebigkeit

Varianten:

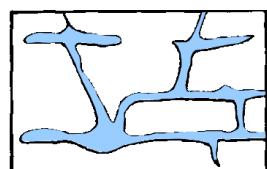
- Gut sortiert (homogen): hohe Porosität
- Schlecht sortiert: niedrige Porosität (Poren verstopft)
- Gut sortiert mit porösen Körnern (sekundäre Poren im Gestein)
- Gut sortiert, durch nachträgliche Ausfällung geringe Porosität (Bsp. Kalk: Poren verbucken: Festgestein (Konglomerat))

Kluftwasserleiter:



- Alle klüftigen Festgesteine mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit der Matrix bei einer mehr oder weniger ausgeprägten Klüftigkeit: fast alle Festgesteine
 - meistens geringe Bindung des Wassers in Kluftsystemen in Abhängigkeit von Kluftweite (weite Kluft: geringe Bindung und umgekehrt)
 - Im Festgestein bewegt sich GW in Gesteinsfugen und Kluftsystemen verschiedener Kluftweiten
 - nutzbare Wassermenge sehr unterschiedlich
 - Filterwirkung schlechter als in Porengrundwasserleitern
- hohe Filterung (Wasser muss durch viele feine Risse) aber geringe Ergiebigkeit (dauert)

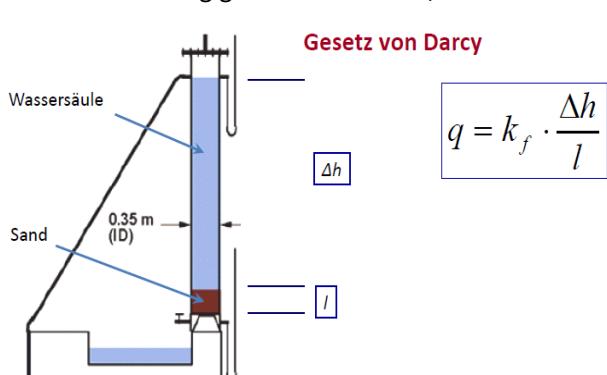
Varianten des Kluftwasserleiters: Entwicklung des Karstwassersystems:



- Im wasserlöslichen Festgestein bilden sich durch chemische Auflösung Hohlräume, die häufig durch Fugen unterschiedlicher Größe verbunden sind
 - abhängig von: Wasserbilanz, Reinheit des Kalkes, tektonische Beanspruchung, Entwicklungsdauer, Abstand vom Vorfluter
 - meistens sehr geringe Bindung des Wassers in Abhängigkeit von Kluftweite/ Hohlräumen
- (Wasser fließt in einer Art vorgefertigter Kanal)
- In Karstgrundwasserleitern erreicht GW meist sehr hohe Fließgeschwindigkeiten
- schlechte Filterung (vorgefertigte Leitungen), gute Ergiebigkeit, GW- Spiegel schwankt stark

Durchlässigkeit des Gesteins:

nicht abhängig von Porenanzahl, sondern von Porenleitfähigkeit (effektiver Porenanteil: Was tatsächlich Wasser leiten kann: n_{eff})



Gesetz von Darcy

$$q = k_f \cdot \frac{\Delta h}{l}$$

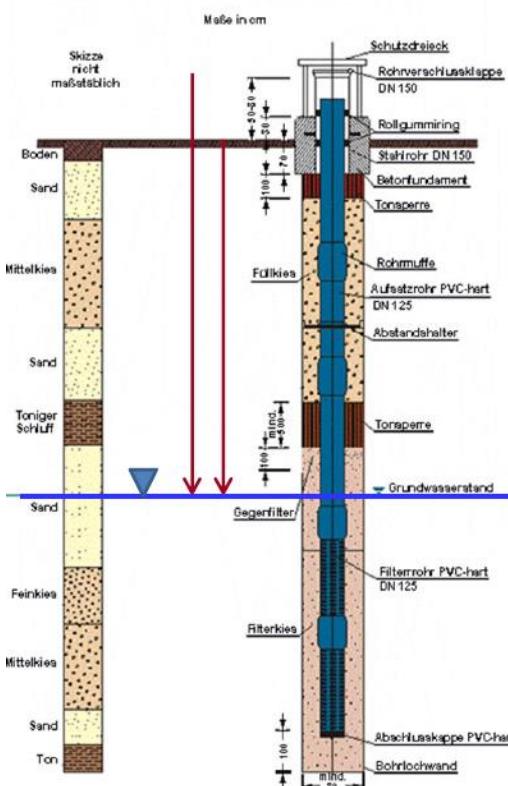
- **q** = Durchfluss [cm/s]
- **k_f** = gibt Durchlässigkeit in [cm/s] an (jeder Boden bestimmter kf Wert): Durchfluss davon abhängig
- **Delta h** = Druckhöhe: je weiter unter Wasser (größerer Druck) desto größer Durchfluss (Wie hoch steht Boden unter Wasser)
- **l** = Fließstrecke (Dicke des Bodens: je dicker, desto länger dauert es)
- **braun**: Boden: Wie viel Wasser kann infiltrieren/ aufgenommen werden
- abhängig von Bodenart (fein: länger zum Durchlaufen)
- Gesetz gilt in porösen Medien und bei laminarem Fluss
- delta h/l (hydraulischer Gradient): const.

- gleiche Druckhöhe: Zusammenhang von Korngröße und Wasserdurchlässigkeit: Menge an durchlässigem Wasser abhängig vom Material

- Anwendung: Abdichtungen

Messstellen:

BAUWEISE EINER GRUNDWASSERMESSTELLE



- Abstich: Abstand zwischen eingemessener Rohroberkante und GW- OF
- GW-Flurabstand: Abstand zwischen Geländeoberfläche und GW- OF
- Grundwasserhöhe: Höhenlage des GW- OF über NN
- Grundwasserverhältnisse werden in Gleichenplänen dargestellt
- Grundwassergleichen zeigen Abstand zur Geländeoberfläche: GW- Flurabstand
- Auch absolute Höhenlage des Grundwassers kann dargestellt sein

Grundwasser- Schutz

Schutzzonen Trinkwasserbrunnen:

Engere Schutzzone: 50-Tages-Grenze: Keime sterben ab

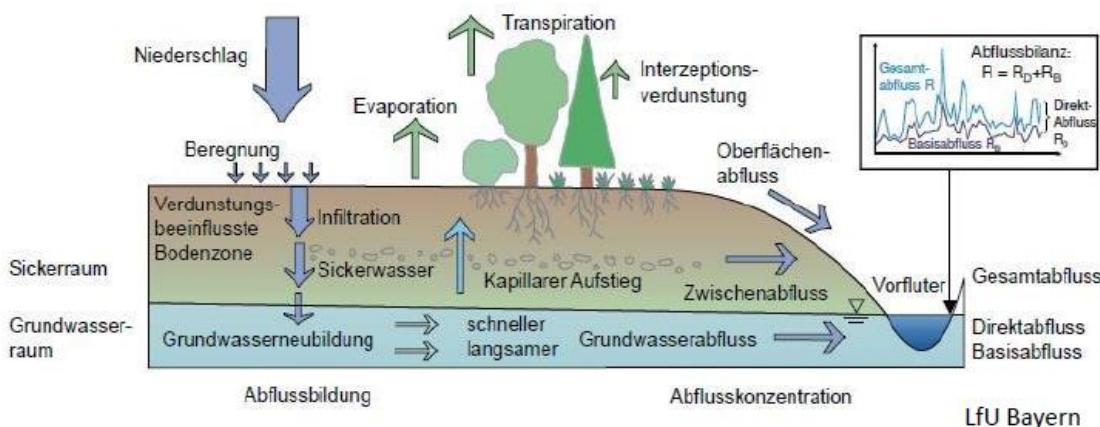
$v = \text{ca. } 20\text{m/d}$

$$50\text{d} * 20\text{m/d} = 1000\text{m}$$

Wie kann GW-Neubildung ermittelt werden?

- Aus Wasserbilanz
- Aus Abflussdaten
- Mit Modellen

Grundwasserneubildung: Zugang von infiltriertem Wasser zum GW



- Langjährig: $N = A + V$
- Kurzzeitig: $N = A + V + (R - B)$ (Rücklage und Aufbrauch)
- negativ: GW- Spiegel sinkt und umgekehrt
- enger Zusammenhang mit NS
- Höchste Neubildung im Alpenvorland
- große regionale Unterschiede
- Frankfurt/ Würzburg gering
- NDTL hoch (pleistozänes Lockergestein)

Wege:

- NS: Infiltration: Sickerwasser (erst Auffüllen der Bodenfeuchte)
- Infiltration aus Gewässern:

Austausch von GW und Fließgewässer im Porenbereich des Ufers und der Sohle (hyporheischer Austausch: flussrandlich)

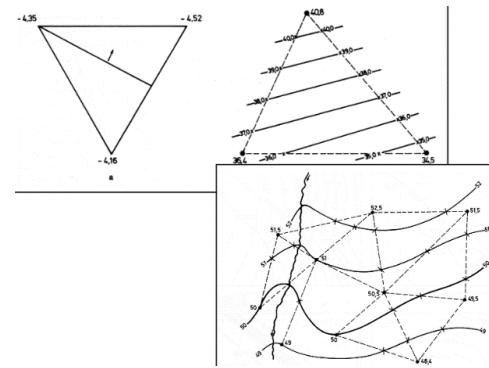
- GW- OF liegt über Gewässeroberfläche → GW fließt in Gewässer: Austritt von GW: **Exfiltration**
- GW- OF liegt unter Gewässeroberfläche (Hochwasser) → GW wird angereichert: **Infiltration**
- Extremfall: Gewässer versickert komplett, Bsp. Karstwasserleiter an Donau: Donauversickerung, Wiederaustritt an Karstquellen

Konstruktion von Grundwassergleichen nach Dalen von mindestens drei Brunnen mittels „hydraulisches Dreieck“

- äußere Daten: GW- Höhe
- GW- gleichen: gleiche GW- Höhe, zeigen Abstand zur Gelände- OF: GW- Flurabstand
- auch absolute Höhenlage des GWs ablesbar
- Fließrichtung senkrecht zur GW- Gleiche

Gesteinsverteilung in Deutschland:

In Abhängigkeit vom Gestein weisen GW unterschiedliche Mineralisierung auf



Mögliche Gefährdungen des Grundwassers:

- Einträge aus Luft, Landwirtschaft, Entwässerung von Oberflächen (Straßen), Arzneimitteln, Altlasten
 - Übernutzung von Grundwasser
 - Unfälle und damit verbundene Einträge
 - Undichte Kanalnetze
- chemischer Zustand: 36 % schlecht, mengenmäßiger Zustand: 96% gut

Darstellung des Wasserkreislaufs mit der mittleren Wasserbilanz für DTL:



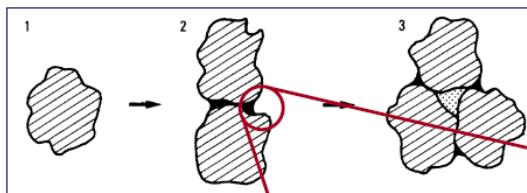
Grundwasserergiebigkeit:

- große regionale Unterschiede
- bei Lockergestein hohe Energiebiegigkeit
- Gute E. in Gebieten mit pleistozänen Sander- und Schotterflächen (NDTL + Alpenvorland), Lockergesteine des Tertiärs (Rheingebiete)
- schlechte E. im direkten Alpenvorland: Moränensedimente: Ton und Schluff geringe Wasserleitfähigkeit
- europaweit: Norden gut (Pleistozäne Relikte), Süden schlecht (Festgesteine)

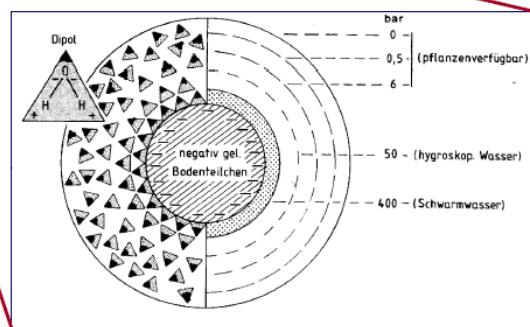
Bodenfeuchte (ungesättigte Zone):

- 0,17 % des Süßwassers
- oberhalb des geschlossenen Kapillarraums
- nicht wassergesättigt mit Luftanteilen
- Wechselwirkungen zwischen mineralischen Substanzen und Wasser: Adhäsion: Wasser wird angezogen (Mineralteilchen: negative Überschussladung: H₂O Moleküle: Anlagern mit positiver Dipolseite, hohe Bindungsenergie: Auflösen durch viel Wärme (Verdunstung)) → Wasserhüllen um Partikel
- Versorgung der Pflanzen (außer wenn Bindung zu groß ist)
- sehr feucht: Sickerwasser
- starke Bindung

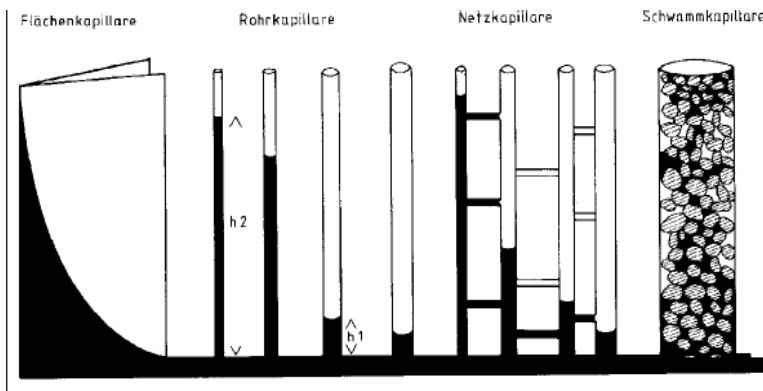
Bodenwasser Bindung:



1= Haftwasser (Wasserhülle um Partikel)
 2= Kapillarwasser (in Randbereichen)
 3 = Porenwasser (Wasser kann sich in Pore frei bewegen: keine Bindung, Sicker möglich)
 → unterschiedliche Kapillarsysteme kommen alle in der Bodenschicht vor



Kapillarbindung:



- Boden wie Kapillarsystem
- Flächenkapillare: stärkere Bindung je enger Platten zusammen sind
- Rohrkapillare/ Netzkapillare: z.B. Gänge durch Organismen, Wurzeln
- Schwammkapillare: H₂O im Porenraum zwischen Partikeln gehalten
- Mischung aus allen Formen in Realität
- stärkere Anhebung des Wassers in Abhängigkeit von der Kapillarweite

Aufstieg von Wasser in unterschiedlich geformten Kapillaren (Kuntze et al. 1994, S. 164)

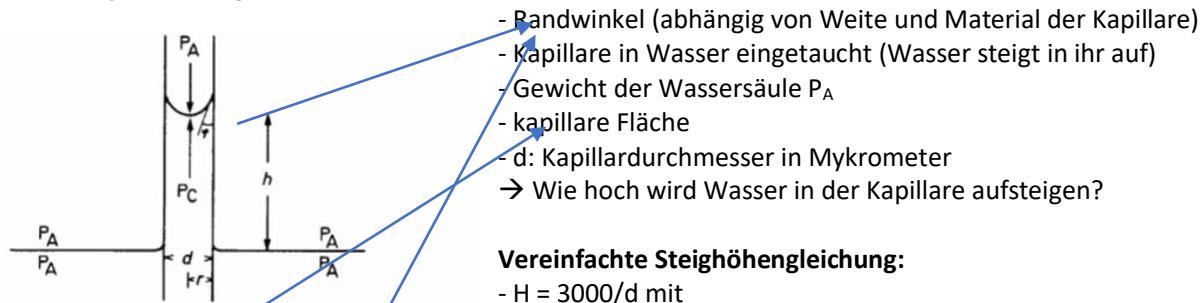
Konsequenzen aus Bindung des Wassers in ungesättigter Zone:

- Wasser nicht frei beweglich (abhängig von Kapillarbindung, z.B. trockener Boden: Wasser wird hineingesogen)
- Wasser wird entgegen der Schwerkraft angehoben (kapillarer Aufstieg)
- Wasser kann von Vegetation nicht beliebig aufgenommen werden
- Boden auch in Trockenperioden feucht

Messung des Bodenwassers:

- Bodenproben mit Stechzylinder (Bodenvolumen ausgestochen und schnell verschlossen (keine Verdunstung)) feldfeucht wiegen, dann Trocknung bis 105 Grad (alles Wasser verdunstet außer das in Mineralien gebundene) bis Gewichtskonstanz (nichts kann mehr verdunsten)
- TDR- Sonde: misst Bodenfeuchte mit Mikrowellen: Reflexion an H₂O Molekülen

Kapillare Steighöhe:



$$\begin{aligned} \sigma_{H_2O} &= 72,75 \text{ g/s}^2 && \text{- Oberflächenspannung} \\ \sigma_{H_2O} &= 0,998 \text{ g/cm}^3 && \text{- Dichte} \\ g &= 981 \text{ cm/s}^2 && \text{- Erdbeschleunigung} \end{aligned}$$

$$b. 20^\circ C$$

$$h = \frac{0,297}{d} \text{ cm}$$

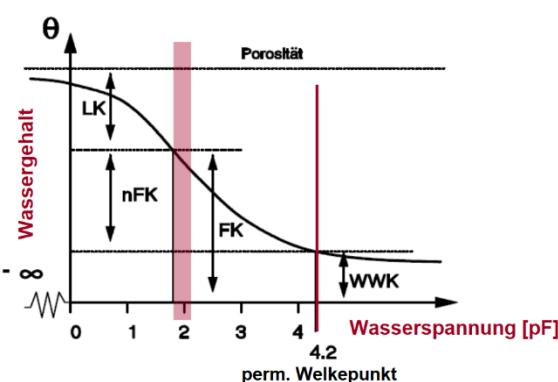
Begriffe:

- **Feldkapazität (FK):** Wassermenge, die der Boden entgegen der Schwerkraft zu halten vermag (pF 1,8)
- pF: Matrixpotential, wie viel Wasser im Boden gehalten wird
- **Permanenter Welkepunkt (PWP):** Wasserspannung bei der Bodenwasser von den Pflanzen nicht mehr entzogen werden kann (pF 4,2)
- **Welkepunktkapazität (WWK):** Wassermenge, die bei Saugspannungen > pF 4,2 so fest im Boden gebunden ist, dass sie den Pflanzen nicht zur Verfügung steht
- **Nutzbare Feldkapazität (NFK):** Wassermenge, die Pflanzen in Trockenperioden zur Verfügung steht ($nFK = FK - WWK$)

Potentiale:

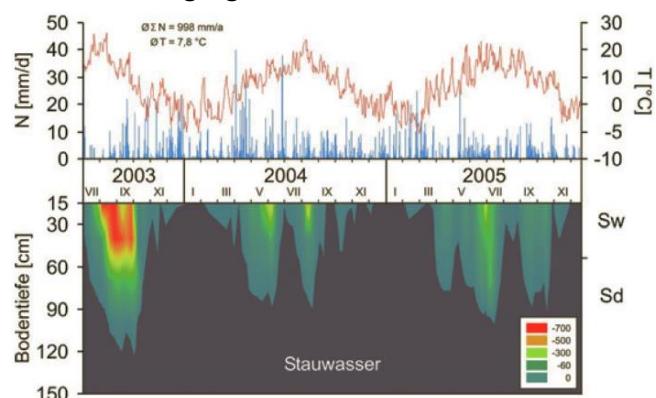
- Um Wasser in der ungesättigten Zone zu verlagern, ist Arbeit notwendig (Bindungsenergie)
- Notwendige Arbeit, um eine Menge Wasser von einem Punkt zum anderen zu transportieren (von einer Tiefe in nächste) → Energie um Wasser von einer freien Wasseroberfläche (Grundwasserspiegel) auf eine bestimmte Höhe im Poresystem zu heben/ der Bodenmatrix zu entziehen
- Kräfte überwinden, die auf Wasser wirken
- **Gravitationspotential:** Folge der Erdbeschleunigung (zieht Wasser nach unten), positiv
- **Matrixpotential:** Folge der Kapillarkräfte im Boden (zieht Wasser nach oben), negativ (auch Saugspannung, gibt an wie viel Wasser den Pflanzen zur Verfügung steht)
- Gleicher Betrag
- **Hydraulisches Potential:** Summe der Teilpotentiale (Matrix- und Gravitationspotential), im Gleichgewichtszustand 0
- Bsp.: Pflanze entzieht Wasser: Gravitationspotential weniger positiv, Matrixpotential bleibt gleich: Hydraulisches Potential negativ

Wasserspannungskurve:



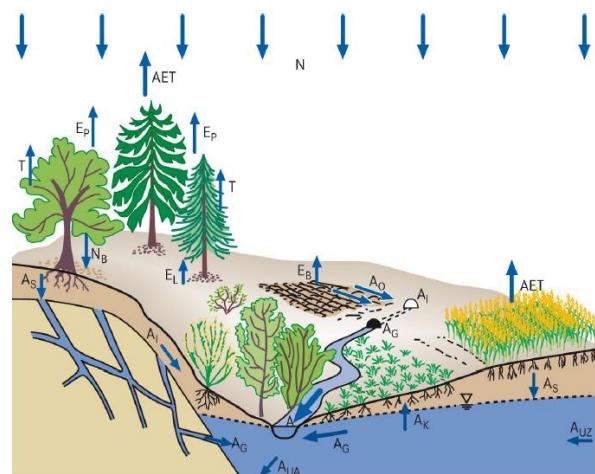
- rot: Temperatur
- blau: NS
- bunt: Saugspannungswerte: Austrocknung (Sommer)/ Aufsättigung (Winter)
- Stauwasser: hohe Wassersättigung
→ Abflussverhalten von Flüssen

Jahresgang Bodenwasser:



7. Wasser der Atmosphäre

Terrestrischer Wasserkreislauf

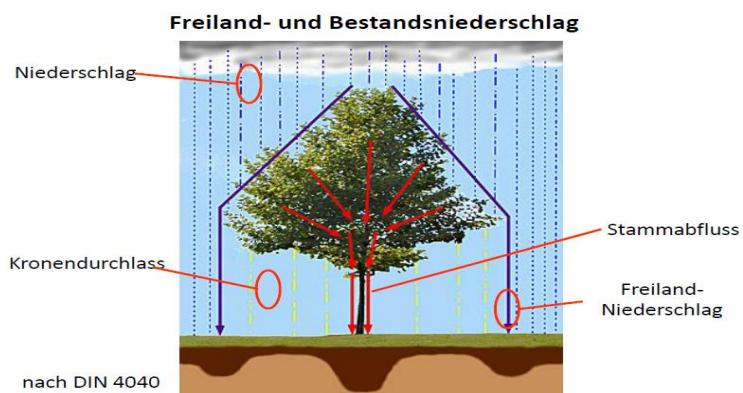


- Land- OF erhalten gesamtes Wasser über die Atmosphäre
- Jährlicher globaler Wasserumsatz: 496.000 km^3 durchläuft Atmosphäre
- Globaler Feuchtetransport von niederer in hohe Breiten
- Feuchtetransport von Ozeanen in die Kontinente
- Transport latenter Wärme
- Wasser in Atmosphäre: 0,04 %, 12 Tage mittlere Verweildauer: schneller Durchlauf

Definition Niederschlag:

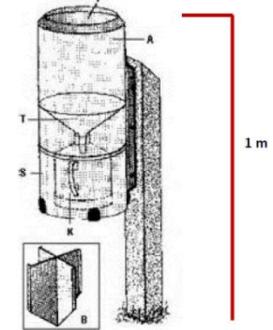
Wasser, das in flüssiger oder fester Form aus Atmosphäre auf EOF fällt/ dort abgesetzt wird

- Messeinheit Niederschlag: mm
- Niederschlagsintensität/ Regendichte: mm/Zeit
- flüssige Niederschläge: Regen (0,5 mm - ca. 5 mm), Niesel (<0,5 mm) und Tau
- feste Niederschläge: Schnee, Hagel, Graupel, Reif
- gefallene Niederschläge
- abgesetzte Niederschläge: dampfförmig, fest (Sublimation, Kondensation): Absetzung: Reif (fest), Tau (flüssig)



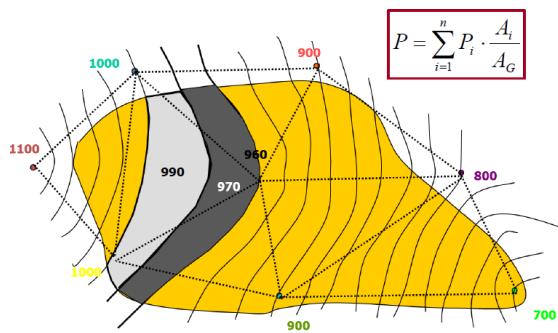
Messung Niederschlag:

- Im deutschen Sprachraum häufig Ombrometer nach Hellmann
- 200cm² Auffangöffnung
- Schafkantig begrenzt
- Kanne zum Sammeln des Niederschlags
- Weiterentwicklung zur Niederschlagskipphaage zur digitalen Registrierung von flüssigen NS
- Niederschlagsmessungen sind fehlerbehaftet (Sonne, Wind, Fehler an Geräten, ...)

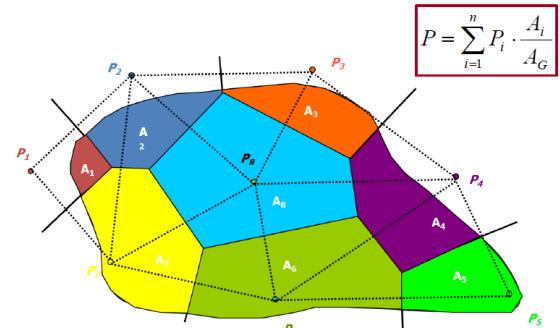


Gebietsniederschlag:

Isohyeten: Linien gleichen Niederschlags:



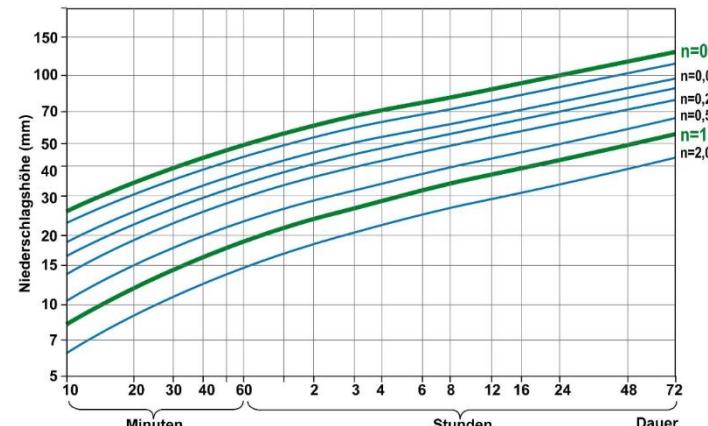
Polygone: Linien gleichen Niederschlags: Bei großräumlichen Betrachtungen angewendet:



Flächenhafte Erfassung mit terrestrischer Fernerkundung mithilfe von Radar

Unterscheidung gefallener Niederschlag: (nach Intensitäten und Dauer der Niederschläge): Regen, Schauer, Starkregen

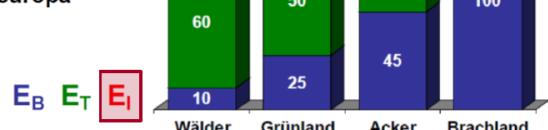
Mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeit von Niederschlagshöhen bei verschiedener Dauer der Niederschläge



- 1,0: 1 mal im Jahr
- 0,01: 1 mal im Jahrhundert
- Eintrittswahrscheinlichkeit

Zur Erinnerung → Bedeutender Anteil der Interzeption!

Prozentuale Aufteilung für Mitteleuropa*



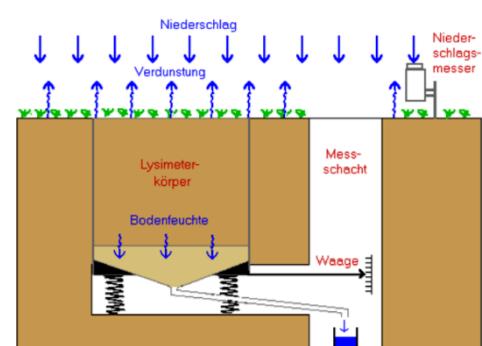
Verdunstung:

- Evaporation (Eb): Verdunstung der EOF
- Transpiration (Et): Verdunstung von Lebewesen
- Interzeptionsverdunstung (Ei): Verdunstung von pflanzlichen OF
- Evapotranspiration: Gesamtverdunstung $Ev = Eb + Et + Ei$

Interzeption:

- Zusammenhang von Blattfläche und Interzeption
- Höhe der Interzeption direkt von Vegetationsoberfläche abhängig
- Messung der Blattfläche als Maß für Interzeption: LAI (Blattflächenindex: „einseitige“ Quotient von Blattoberfläche pro Untergrundfläche)

Verdunstung von Landflächen: Evaporation und Transpiration: Messung: Lysimeter: Verlust an Masse des Bodens



Evapotranspiration:

Penman-Monteith-Modell	
$ETa = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{r_a} \cdot (e_s(T) - e)}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$	
L^*	spezifische Verdunstungswärme für 1 mm Verdunstungshöhe
s	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
R_n	Strahlungsbilanz
G	Bodenwärmestrom
ρ	Luftdichte
c_p	spezifische Wärme der Luft
r_a	aerodynamischer Widerstand
$e_s(T) - e$	Sättigungsdefizit, abhängig von Lufttemperatur T und Dampfdruck e
γ	Psychrometerkonstante
r_s	Stomatawiderstand
www.hydroskr	

- aktuelle Evapotranspiration
- Sättigungsdefizit, r_a und ρ (Ventilation) und r_n (zur Verfügung gestellte Energiemenge) als wichtigste Faktoren
- je trockener und wärmer Luft, desto mehr Wasser kann aufgenommen werden

8. Fließgewässer und Seen**Definition: See:**

allseitig geschlossene, in einer Vertiefung des Bodens befindliche, mit dem Meer nicht in direkter Kommunikation stehende stagnierende Wassermasse

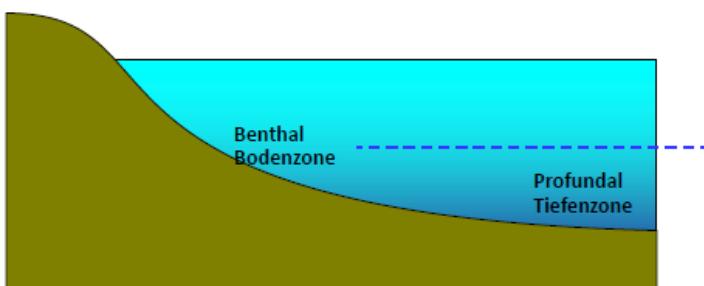
- „stagnierende Wassermasse“ (im Gegensatz zu Flüssen) aufgrund geringer Fließgeschwindigkeiten keine turbulente Durchmischung
- **Flachseen:** Litoralflora kommt am gesamten Seeboden vor
- **Tiefseen:** Litoralflora beschränkt sich auf randliche Bereiche
- Lebenserwartung von Seen abhängig von Zuflüssen: Verschüttung durch fluviale Prozesse, organische Prozesse, Erosionsgut: Viel Zufluss ins Becken aber wenig Abfluss

Möglichkeiten der Entstehung von Seeböcken:

- **Konstruktive Seeböcken:** durch tektonische Prozesse: Bodensee, Baikalsee
- **Destruktive Seeböcken:** durch Erosionsprozesse: Große Seen N.A., Ammersee (v.a. glaziale Erosion)
- **Obstruktive Seeböcken:** durch Abdämmung (Täler durch Verschüttung gefüllt, z.B. Bergrutsche): Eibsee, Fernpassseen
- **Anthropogene Seeböcken:** Stauteiche

Seen Zonierung:**Unterscheidung nach topographischen Kriterien:**

→ Pelagial (Freiwasserzone) und Benthal



Photische Zone (abhängig von Trübung, Licht für Photosynthese vorhanden)

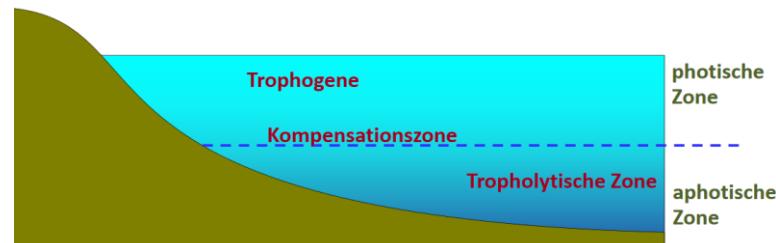
Aphotische Zone

Benthal: Boden/ Sedimentbereich (grün, Unterteilung nach Lichteinfall):

- **Litoral:** helle, warme Schicht, Uferzone
- **Profundal:** dunkle und kalte Tiefenzone, keine thermische Schwankung im Jahresverlauf

Unterscheidung des Pelagial (blau) nach**Sauerstoffversorgung:**

- **Trophogene Zone:** Phytoplankton produziert mehr O₂ als durch Atmung verbraucht wird: O₂ Überschuss
- **Kompensationszone:** Photosynthese und Atmung im Gleichgewicht
- **Tropholytische Zone:** O₂-Verbrauch übersteigt Produktion: O₂-Mangel



Unterscheidung des Pelagial nach thermischen Verhältnissen:

Seezirkulation abhängig von Tiefe des Wasserkörpers und klimatischen Bedingungen

→ Antrieb durch Dichteänderungen aufgrund der Temperatur, windangeregt

- **Epilimnion:** gut durchleuchtet und durchlüftet, der Lufttemperatur angepasst

- **Metalimnion:** Sprungschicht, große Temperaturdifferenz, Lage abhängig von Temperatur und Grad der Durchmischung

- **Hypolimnion:** sauerstoffarm, niedrigere Temperaturen

Seeschichtung: (OF- Schicht abhängig von Lufttemperatur)

Ausbildung stabiler Schichtung im Sommer:**- Phase der Sommerstagnation:**

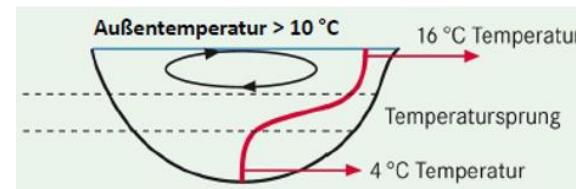
- Durchmischung durch Wind nur an der Oberfläche

- stabile Schichtung (Stagnation)

- Kein gesamter Wasseraustausch (durch extreme Dichteunterschiede)

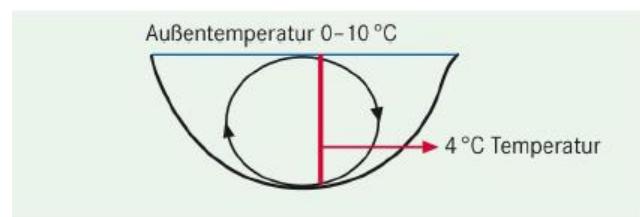
- Temperatursprung: extreme Temperaturveränderung über kurze Distanz

- Warmwasserkörper (windinduzierte Durchmischung) liegt auf Kaltwasserkörper

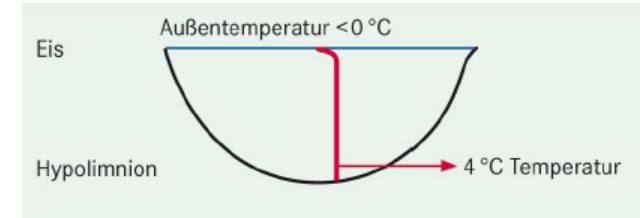
**Herbst und Frühjahr: Aufhebung der thermischen Schichtung:****- Phase der Vollzirkulation (Homothermie):**

- Durchmischung durch Absinkprozesse

- Durchmischung durch Windeinfluss (durch Stürme im Herbst extremer)

**Winter: Ausbildung erneuter thermischer Schichtung:****- Phase der winterlichen Stagnation:**

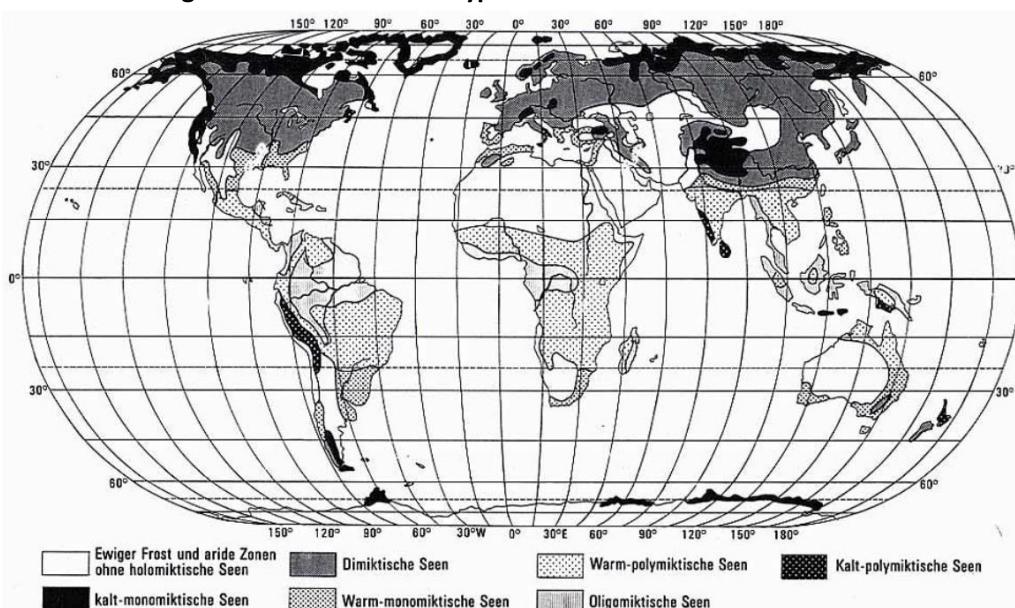
- Kaltwasser schwimmt auf dichterem Tiefenwasser
- Durch Eisbildung Verhinderung von windinduzierten Mischungsprozessen

**Zirkulationstypen:****Unterteilung nach beteiligten Wassermassen:**

- **Holomiktisch:** mindestens eine Vollzirkulation im Jahr
- **Meromiktisch:** nur Teilzirkulation (Bodenwasser nicht erfasst)
- **Amiktisch:** nicht zirkulierend

Nach Häufigkeit der Zirkulation (holomiktisch):

- **Monomiktisch (einmal zirkulierend):** kalt-monomiktisch (polar, Sommerzirkulation)
warm-monomiktisch (Tropen, Winterzirkulation)
- **Dimiktisch (zweimal zirkulierend):** kalt-dimiktisch (mittlere Breiten, Herbst – und Frühlingszirkulation)
warm-dimiktisch (Tropen Regenzeit)

Verteilung der thermischen Seentypen:

- durchwegs kalt: Winterstagnation, Sommerzirkulation
- Winterstagnation, Frühjahrszirkulation, Sommerstagnation, Herbstzirkulation
- Winterzirkulation, Sommerstagnation
- Durchwegs warm: poly-/ oligomiktisch

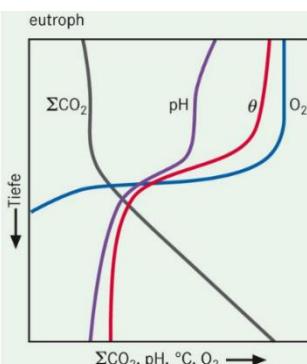
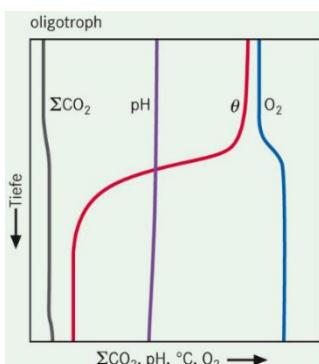
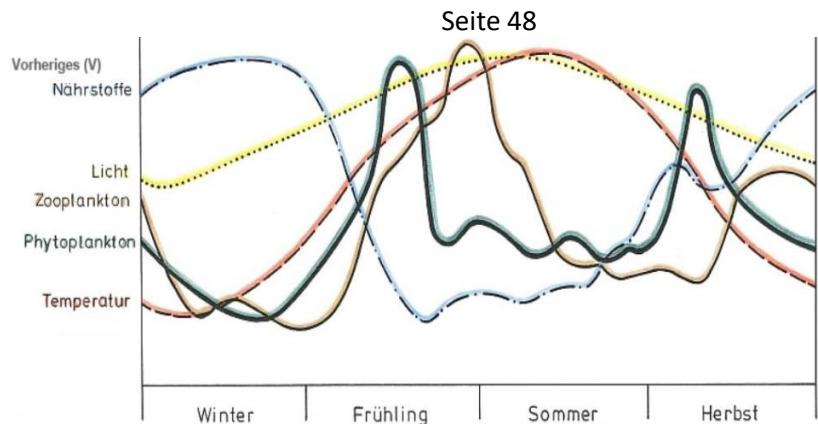
Physische Geographie I

Jahresgang von Seen:

- Licht und Temperatur: enge Korrelation: parallel
- Zooplankton frisst Phytoplankton
- Absinken des Nährstoffs: vom Plankton gefressen
- Absinken Phytoplankton: vom Zooplankton gefressen
- Absinken Zooplankton: kein Phytoplankton: absterben

Trophiegrad (Nährstoffgehalt) von Seen:

- **Oligotroph**: durchgängig nährstoffarm, O₂-reich, gering produktiv, hohe Sichtweite
- **Mesotroph**: mittlere Nährstoffgehalte, Übergangsform
- **Eutroph**: nährstoffreich, O₂-arm, im Hypolimnion evtl. anaerob (Stagnationsphasen), Algenblüte
- **(Hypertroph**: Überangebot an Nährstoff, O₂-Mangel, Faulschlammbildung, anaerobe Abbauprodukte: Methan, Schwefelwasserstoff)
- **(Dystroph**: starke Anreicherung von Humusstoffen pH gering: Mooreseen)
- Phosphor Gehalt entscheidend für Primärproduktion: je mehr desto mehr

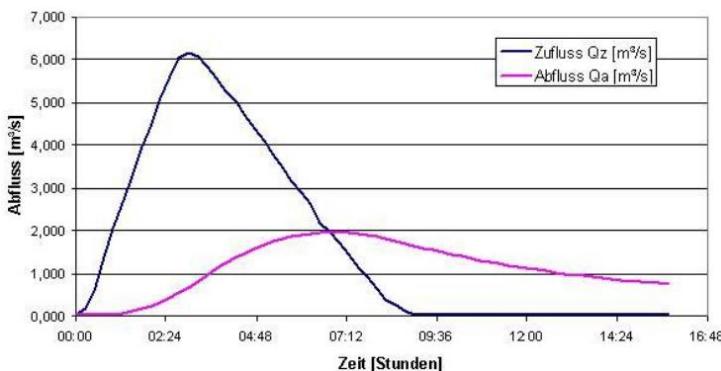


- **oligotroph**: ph gleich, o₂ gleich, Dichte: thermische Schichtung im Sommer
- **eutroph**: ph Abnahme (Methan, Schwefelwasserstoff), Dichte: thermische Schichtung, O₂: Abnahme in Sprungschicht, am Boden fast kein O₂: Aufbrauch durch Zersetzung von organischen Substanzen (CO₂ steigt)

Messung Trophiegrad: Seccie Scheibe (Weiß): je höher Trübung desto höher Nährstoffgehalt

Abflussverhalten: Abfluss wird durch Seen gedämpft

Jägersbleeker Teich: Retention bei Extremhochwasser



- **Retention**: Zurückhalten von Wasser in Seen:

Änderung des Abflussverhaltens

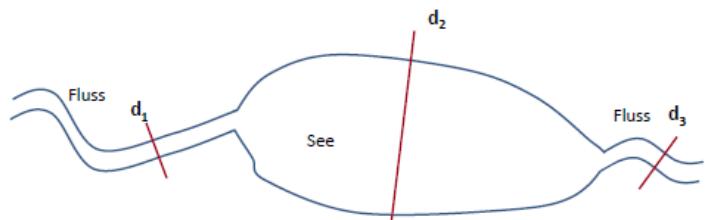
- schwarz: normaler Abfluss

- rosa: Abfluss in See: Dämpfung und Verzögerung des Abflusses

$$Q = d * v$$

Mit:

- | | | |
|---|---|----------------------------------------------|
| Q | = | Abfluss [m ³ /s] |
| d | = | durchflossener Querschnitt [m ²] |
| v | = | Fließgeschwindigkeit [m/s] |

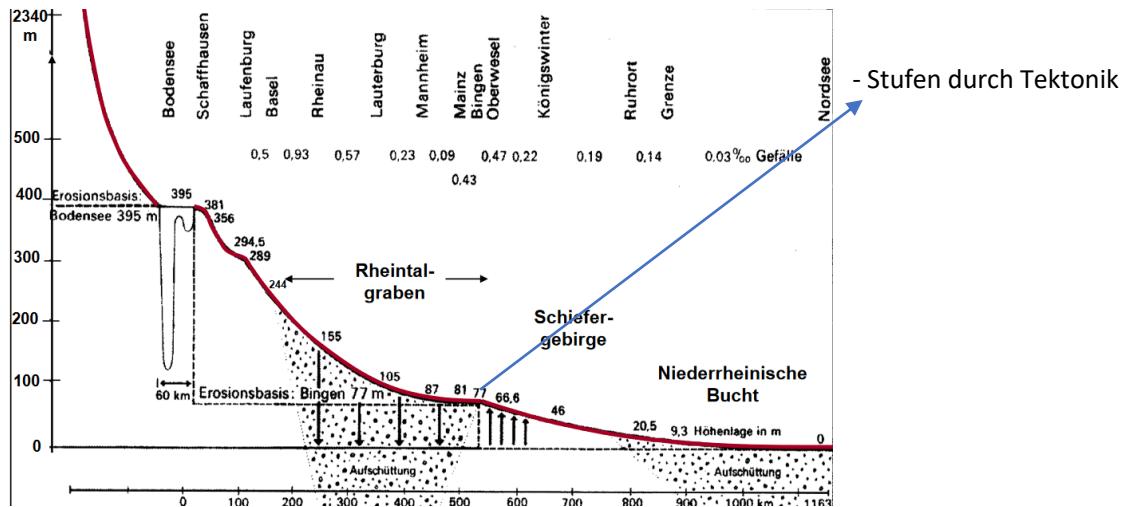


- d₁: schmal: Geschwindigkeit muss ansteigen

- d₂: breit, Geschwindigkeit wesentlich kleiner: Seevolumen muss erst ansteigen (braucht Zeit)

- d₃: erst Abfluss, wenn Volumen so weit angestiegen ist

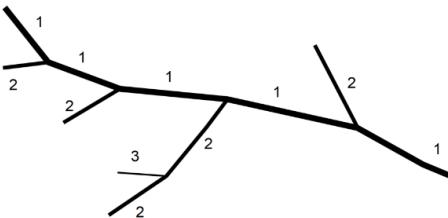
Gefällskurve des Rheins:



Flüsse

Definition:

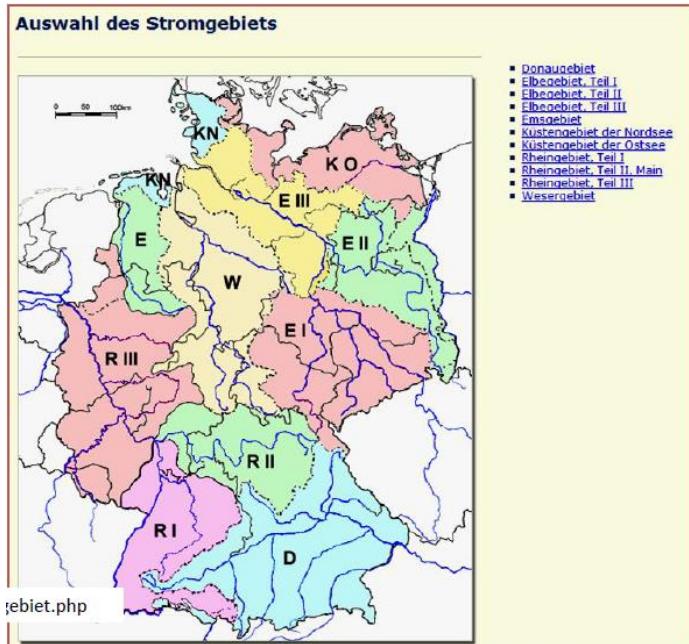
- Flüsse sind fließende Gewässer
- Fließen in gestreckten Hohlformen
- Weisen zumeist durchgehendes Gefälle auf
- Unterscheidung in Haupt und Nebenflüsse
- Flüsse entwässern Gebiete



Klassische Flussordnungszahlen

- Ins Meer mündende Flüsse haben Ordnungszahl 1
- In diese Vorfluter (-fluss, in den anderer fließt) mündende Flüsse haben die Ordnungszahl 2 usw.

Aufteilung Deutschlands in Stromgebiete: Einzugsgebiete der Flüsse, die in das Meer entwässern:



- kontinentale Wasserscheide: Entwässerung in zwei verschiedene Meere

Parameter	Zeichen	Einheit
Fließgeschwindigkeit	v	m/s
Abfluss	Q	m³/s
Mittlerer Abfluss	MQ	m³/s
Abflussspende	q	l/s * km²
Mittlere Abflussspende	mq	l/s * km²
Abflussfülle		m³

Abfluss:

- **Durchfluss:** Wasservolumen, das pro Zeiteinheit einen definierten oberirdischen Fließquerschnitt (Abflussquerschnitt) durchfließt, Einheit: m³/s
- **Abfluss:** Wasservolumen, das pro Zeiteinheit aus einem Gebiet fließt, Einheit: m³/s
- Unterschied Abfluss/ Durchfluss: Betrag gleich, einerseits Betrachtung des ganzen Gebiets dahinter, andererseits nur Betrachtung des Querschnitts,
- **Wasserstand:** oder Pegelstand eines Gewässers, Einheit: cm
- **Abflussspende:** Abfluss eines Gebietes durch Fläche des Einzugsgebietes Einheit: $\frac{l}{s}$ / km² oder l/s x km² (Abfluss pro Fläche)

- **Flussbett:** Ist der bei mittlerem Abfluss benetzte Querschnitt eines Flusses
- **Ufervolle Abfluss:** bei einem einjährigen Hochwasser benetzte Querschnitt
- **Gerinnebett:** aktuell benetzter Querschnitt
- **Abflussfülle:** Wasser, das in längerer Zeit aus einem Gebiet fließt

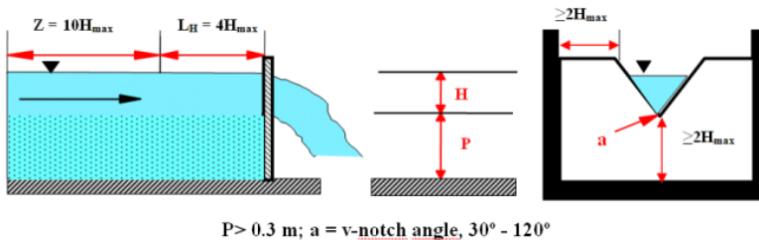
Durchflussmessungen:

Direkte Methoden

- Gefäßmessung: einfachste Durchflussmessung
- Durchfluss durch standardisierte Querschnitte: z.B.:

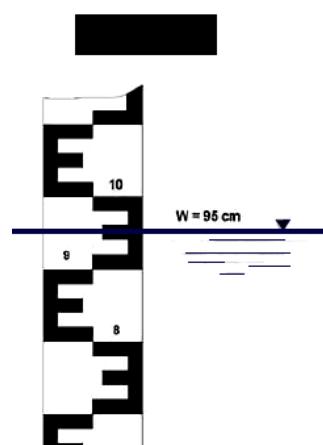
Thompson- Wehr:

- Wasserspiegelhöhe erfassen
- Anstauen durch Platte: freies Ablaufen
- Durchfluss messen



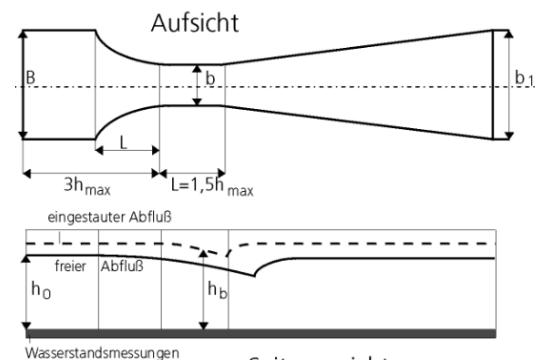
Indirekte Methoden

- Bestimmung des Durchflusses mittels Fließgeschwindigkeit:
 - Notwendig für die Messung: Bekannter Querschnitt und Geschwindigkeitsverteilung
- Messung von Fließgeschwindigkeiten in verschiedenen Tiefen an Messlotrechten:
 - Aufteilen in Querschnitte, Geschwindigkeit an mehreren Stellen und Tiefen erfasst (Geschwindigkeitsfläche)
- Hydrometrischer Flügel: Anzahl der Umdrehungen (durch Strömungen) pro Zeit
- Induktionsmessverfahren
- Messung vom Messfloß aus
- Berechnung von Abflüssen (v steigt bei Neigung)
- ADCP-Verfahren (moving boat): Gleichzeitige Erfassung von Wassertiefe und Geschwindigkeitsprofil
- Akustisches Verfahren nach dem Doppler Prinzip: ADCP
- Tracerverfahren: Abflussmessungen auf der Basis von Verdünnung von zugegebenen Stoffen
- Pegelmessungen:
 - Pegelmessung: einfache Möglichkeit, aber keine Bestimmung des Abflusses (durch Schwimmer, Wasserdruck, Wasserspiegel)

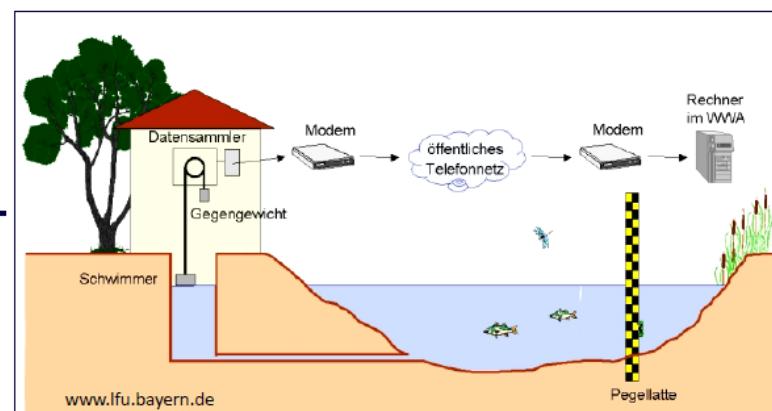
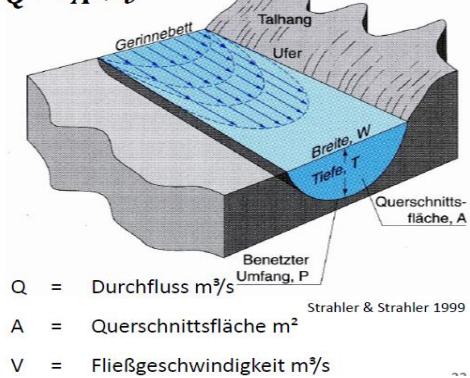


Venturi- Kanal:

- Einengung des Wassers: Rückstau erzeugen
- freies Ablaufen



$$Q = A * v$$

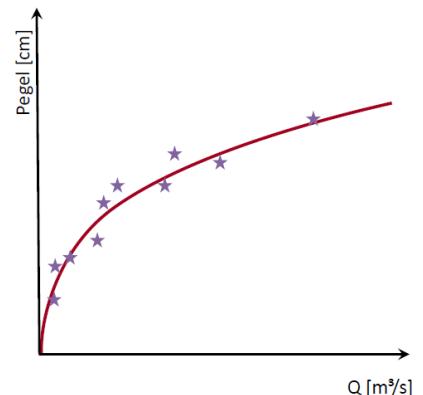


- Berechnung des Abflusses durch Schlüsselkurve

- Durchflussmessungen bei verschiedenen Wasserständen
- Anpassung einer Ausgleichskurve: Abfluss kann Pegelwerten zugeordnet werden
- Erstellung einer Schlüsselkurve + Abflusstafel
- Streuung durch Ablese-/ Messfehler
- höherer Abfluss bei steigenden Pegeln: Energieliniengefälle als Ursache (Hysterese der Schlüsselkurve)

Abflussstatistik

- Daten aller amtlichen Pegel im Deutschen gewässerkundlichen Jahrbuch
- Oberhoheit: Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG
- Jahrbücher nach Stromgebieten
- Aktuelle Daten und Abflussstatistik
- Höchste, niedrigste Abflüsse + im Mittel, Wiederkehrperiode



Hydrologisches Jahr:

- 01.11. - 31.10.
- entspricht GW-Gang: Auffüllen des GWs im Winter, Entleeren im Sommer durch Evapotranspiration

9. Abflussregime

- Parde Koeffizienten (keine Einheit): beschreiben Abflussregime auf verschiedenen Ebenen
- Gewässergröße unwichtig: Gewässer können direkt miteinander verglichen werden
- K3 wichtig: Schwankung von mittlerem Hochwasser und mittlerem Niedrigwasser
- 2.: Mittlerer monatlicher Abfluss/ mittlerer jährlicher Abfluss
- jährlicher Durchschnittsabfluss: 1
(unter 1: unterdurchschnittlich und umgekehrt)
- Fläche ober- und unterhalb gleich groß

2. Ebene → Betrachtung des Jahresgangs

1. Ebene → Betrachtung des ganzen Jahres

$$\begin{aligned}K_1 &= \text{MHQ} / \text{MQ} \\K_2 &= \text{MNQ} / \text{MQ} \\K_3 &= \text{MHQ} / \text{MNQ}\end{aligned}$$

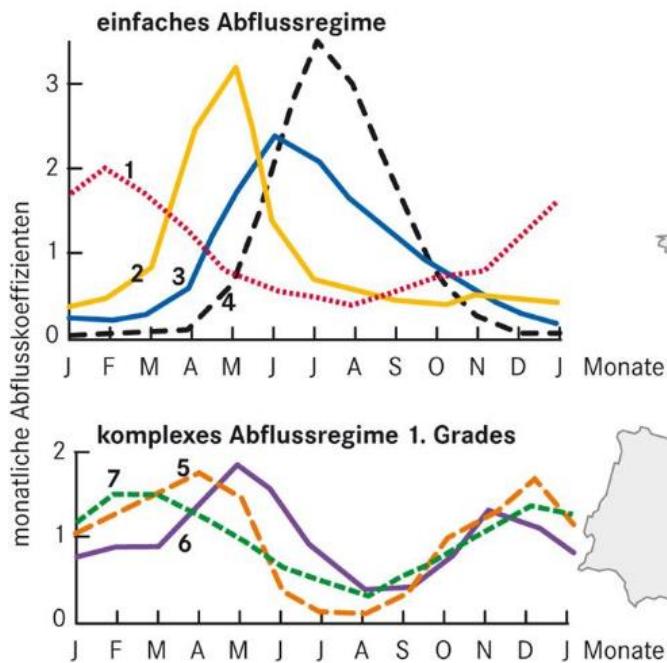
$$K_{mo} = \text{MQ}_{mo} / \text{MQ}_a$$

Einfaches Abflussregime: ein dominanter Steuerfaktor (1-4): Abhängig von Flussspeisung

- **1 Ozeanisches Pluvialregime:** Sommer wenig, Winter viel: steuernder Faktor nicht NS (ganzjährig gleichbleibend), sondern Temperatur: Evapotranspiration zehrt NS im Sommer auf, im Winter Abfluss durch fehlende Evapotranspiration
- **2 Nivalregime Tiefland:** Schneeschmelze setzt früher ein und ist ausgeprägter: Maximum im Frühjahr, wenig im Winter
- **3 Nivalregime Bergland:** Schmelzen dauert durch Hochlage länger: Maximum im Sommer, wenig im Winter (Bsp. Lech)
- **4 Glaziäres Regime:** Gletscher/ Eis brauchen länger zum Schmelzen: Maximum im Sommer (fällt mit Einstrahlmaximum zusammen), im Winter fast kein Abfluss

Komplexes Abflussregime 1. Grades: zwei dominante Steuerfaktoren (5-7), Mischung von Speisungsregimen (höherer Einfluss: höhere Spitze: zuerst genannt)

Komplexes Abflussregime 2. Grades: mehr als zwei Steuerfaktoren, da Gewässer durch unterschiedliche Zonen fließt (Bsp. Rhein): Überlagerung verschiedener Milieufaktoren



- 1 ozanisches Pluvialregime (Seine/Paris)
- 2 Nivalregime Tiefland (Dnepr/Kamenka)
- 3 Nivalregime Bergland (Rhein/Chur)
- 4 glaziales Regime (Rhone/Gletsch)

- 5 mediterr. Pluvio-Nival-Regime
- 6 Nivo-Pluviales Regime
- 7 ozean. Pluvio-Nival-Regime

10. Einzugsgebiethydrologie

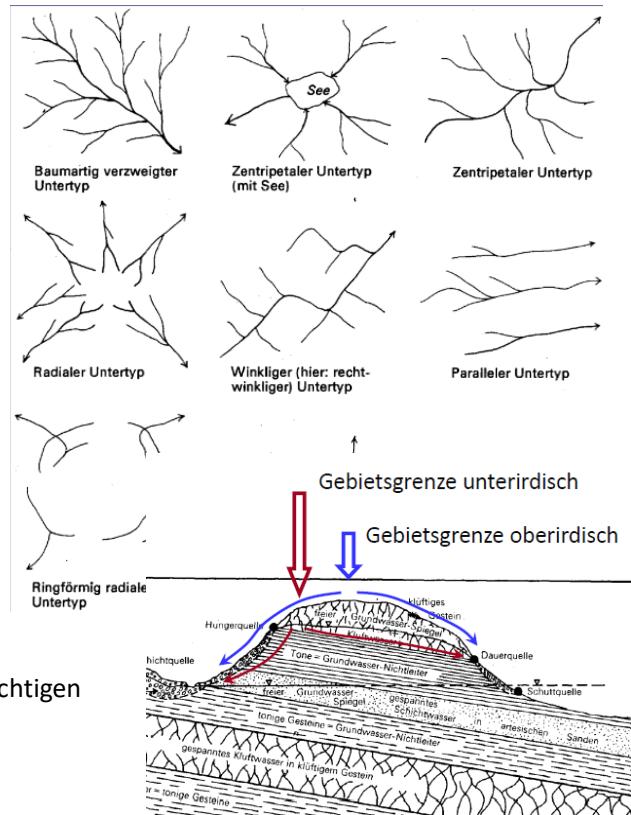
Einzugsgebiet: Teilgebiete der Erdoberfläche, die zu einem Fluss hin entwässern (durch Wasserscheide abgegrenzt)

- Flusssysteme in Einzugsgebieten zumeist dendritisch
 - Andere Grundrisse häufig durch geologische Verhältnisse bestimmt- An Bifurkationen laufen Flusssysteme auseinander (seltene)

Wasserbilanz von Einzugsgebieten:

- Jährliche Bilanz nicht ausgeglichen
 - Speicheränderung berücksichtigen
 - Feuchte Jahre: Auffüllen der Grundwasserspeicher
 - Trockene Jahre: Auslauf der Speicher, Speicherentleerung

$$A = N - ET \pm \Delta S$$



Abgrenzung:

- Oberirdisches Einzugsgebiet = Niederschlagsgebiet → nach Topographie abgrenzbar

- Reliefanalyse DGM)
 - Analyse geologischer Strukturen (Schichtung, Klüftung, Tektonik)
 - Kartierung von Quelleigenschaften
 - Markierungsversuche mit diversen Tracern

- bei kleineren Einzugsgebieten unterirdisches Einzugsgebiet (GW) berücksichtigen

- oberirdisches + unterirdisches nicht gleich



Ringförmiges Untertyp

Eigenschaften von Einzugsgebieten:

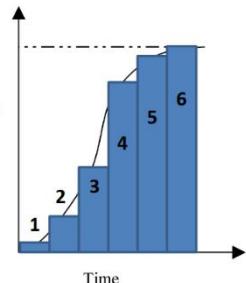
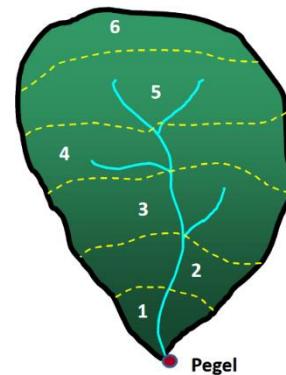
Unterscheidung von variablen und invariablen Gebietseigenschaften:

Invariable Gebietseigenschaften

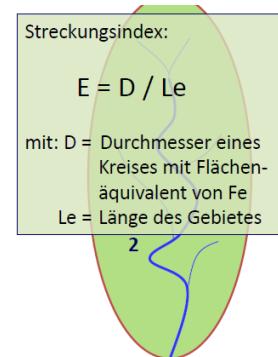
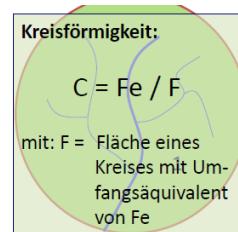
- Gebietsfläche (zunehmende Fläche: MQ steigt, mq: unabhängig vom Gebiet, beeinflusst von z.B. NS Menge, Zulauf von Flüssen)
- Reliefverhältnisse
- Höhenlage
- Form des Gebietes
- Geologie
- Böden
- Exposition des Gebietes
- Gewässernetz und seine Struktur

Isochronen:

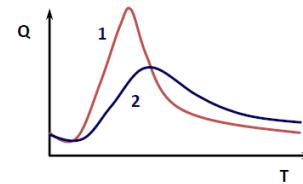
- Linien gleicher Laufzeit geben ähnliche Fließzeiten bis zum Pegel an
→ Zeit bis Abfluss Scheitel: Konzentrationszeit (abhängig von Gebietsfläche)
- charakteristischer Verlauf des Abflussanstiegs:
Konzentrationsabschnitt

**Gebietsfläche:**

- Kompakte kreisförmige Gebiete zeigen andere hydrologische Reaktionen als gestreckte Einzugsgebiete
- Konzentrationszeiten: Form bei gleichem Relief entscheidend
- 1: Kreis, 2: langgestreckt

**Gebietsgröße:**

- Einflüsse auf Scheitelanstiegszeit: Einzugsgebietsform
→ Einzugsgebietsgröße beeinflusst Abflussverhältnisse: großes Einzugsgebiet: lange Vorwarnzeit bei Hochwasserereignissen und umgekehrt

**Gewässernetzdichte:**

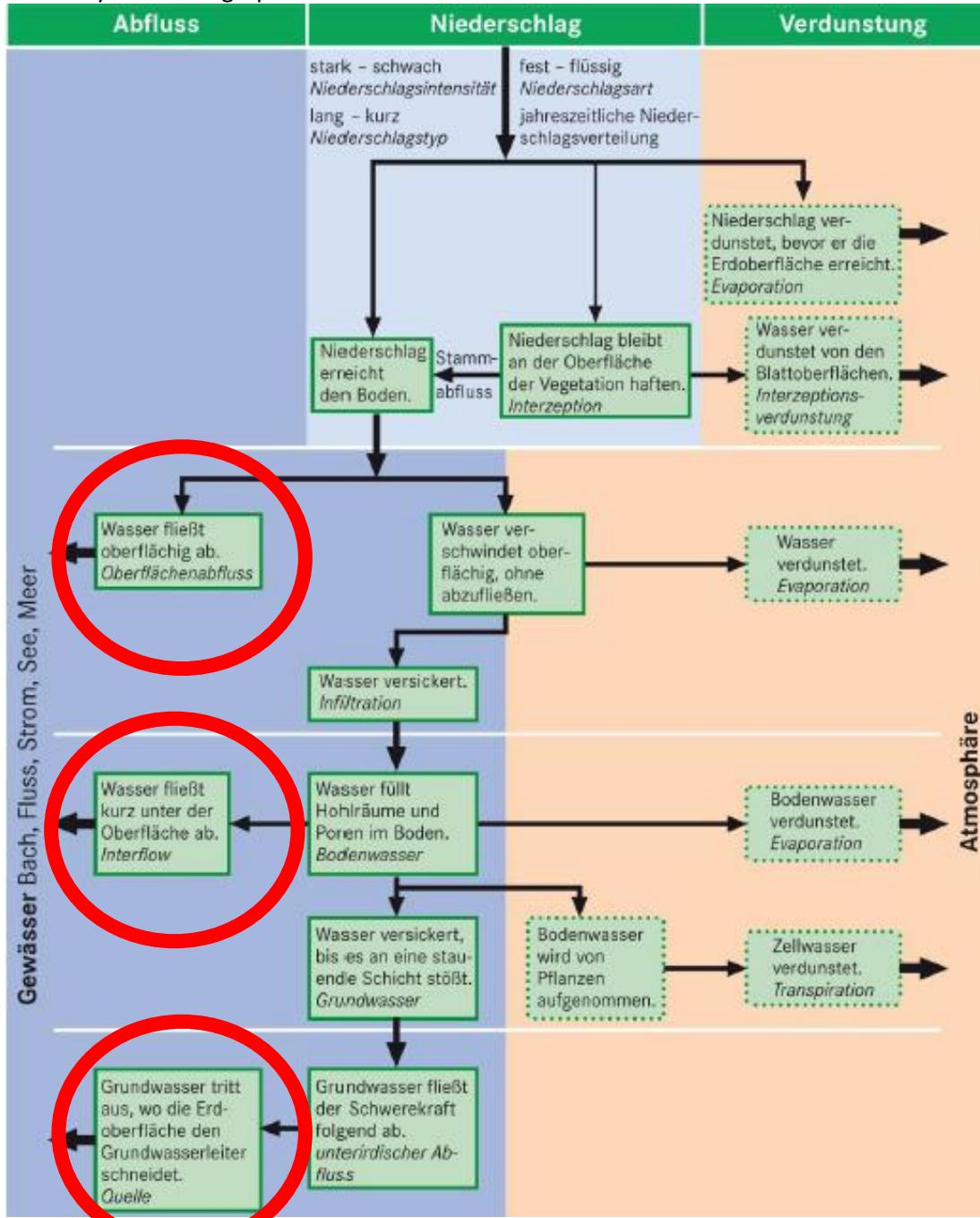
- kumulative Gewässerlänge pro Flächeneinheit (km/km^2)
- Beeinflussende Faktoren: Verkarstung (Untergrundabfluss), Löss (geringe Durchlässigkeit): hohe Gewässernetzdichte, glaziale Serie: niedrige Gewässernetzdichte (Durchlässigkeit bei Schottern) und hohe bei Zungenbeckenseen
→ Gesteine großer Einfluss

Variable Gebietseigenschaften: (jahreszeitlich wechselnd)

- Vegetationsbedeckung
- Bodenwassergehalt
- Hydrologische Eigenschaften von Böden
- Grundwasserverhältnisse
- Aktivität von Bodenbecken
- Schneebekken speicher

11. Prozesse der Abflussbildung

- Abflussbildung umfasst alle Prozesse, die an Abflussentstehung beteiligt sind
- Unterscheidung in Abflusskomponenten
- Infiltration große Bedeutung

**Typische Abflussarten:**

- Abfluss an OF: Oberflächenabfluss
- Abfluss in ungesättigter Zone: Zwischenabfluss (interflow)
- Abfluss im GW: Basisabfluss
- Sonderfall: Returnflow (Wasser trifft nach Infiltration auf gesättigten Bereich: tritt wieder an OF)

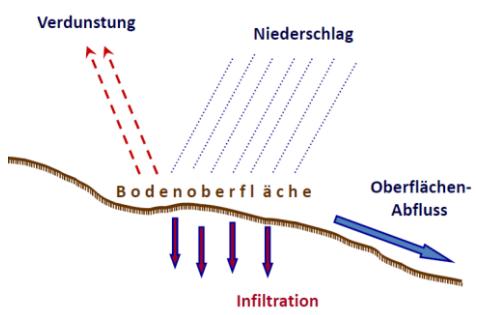
Infiltration:

Auf Boden- OF Aufteilung in:

- Verdunstung
- Infiltration
- OF- Abfluss

Erfassung von Infiltration:

- Röhreninfiltrometer
- Doppel- Ring Infiltrometer
- Beregnungsversuche



Prozess der Infiltration:

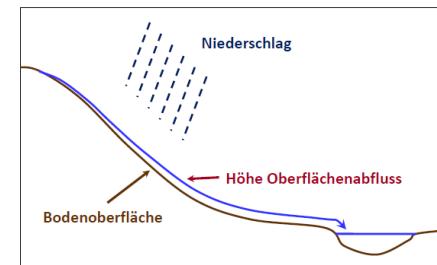
- Wasser versickert nach NS nach und nach tiefer im Boden: feuchte Front schreitet langsam mit Tiefe fort
 - Geschwindigkeit abhängig von:
 - kf- Wert: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit an OF (abhängig von Körnung, Bodenmaterial)
 - h: Druckhöhe des Wassers
 - Mächtigkeit der gesättigten Lage
 - Saugspannung an Feuchtefront (trocken in Tiefe: Wasser wird „angesaugt“)
 - Infiltrationsrate nicht nur von Körnung (Bodenart) bestimmt
 - Weite Poren ohne Matrixpotential: rasche Infiltration
- Makroporen Infiltration

Variable source area concept:

- abflusswirksame Flächen, die überproportional zum OF- Abfluss beitragen
 - vernässen sehr schnell: kein weiteres Wasser kann infiltrieren
 - Ausdehnen von Gewässern: Beitragende Flächen werden immer größer (Flächen, die zum OF- Abfluss beitragen)
- Abflusswirksamkeit räumlich und zeitlich variabel

Oberflächenabfluss

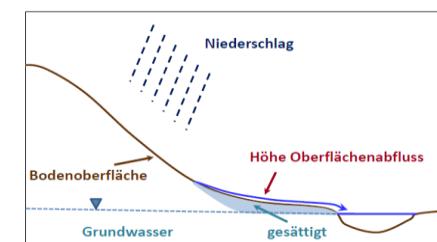
- schnellster Abfluss: erreicht zuerst Gewässer
- Ursache: zu große NS- Intensität oder zu geringe Infiltrationskapazität

**Fall 1: Infiltrationsrate durch Bodenart (Körnung, kf- Wert) bestimmt**

- vor allem feinkörnige Böden:
- Infiltrationsüberschuss (infiltration excess overland flow)
- Horton'scher Oberflächenabfluss: NS- Intensität größer als Infiltrationsrate (Versickerungsrate): es regnet mehr als versickern kann

Fall 2: Infiltrationsrate durch Bodenfeuchte bestimmt

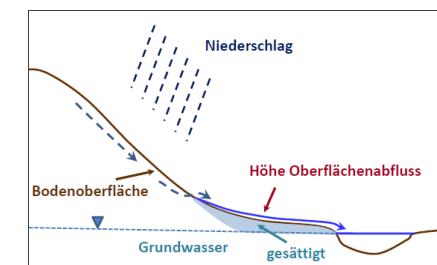
- vor allem nasse Böden
- Sättigungsüberschuss (saturation excess overland flow)
- Dunne'scher Oberflächenabfluss: OF- Abfluss in Gebieten mit hoher Bodensättigung (durch Sättigung, Frost und undurchlässiges Gestein ausgelöst): Boden ist schon gesättigt und kann deshalb kein Wasser mehr aufnehmen (Sättigung von unten)

**Fall 3: Infiltriertes Wasser durch Bodenfeuchte zum Austritt gezwungen**

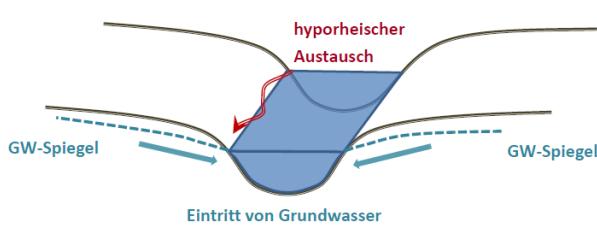
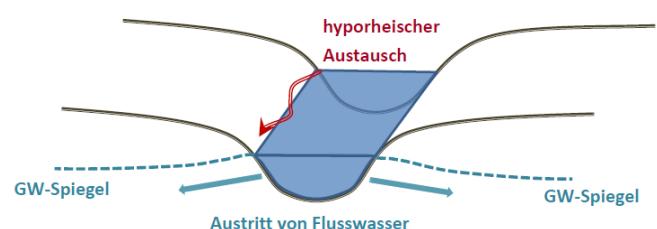
- am Übergang zu gesättigten Bereichen
- vorher Interflow (Zwischenabfluss, v.a. an Makroporen/ Schichtgrenzen): Stauung des versickerten Wassers an undurchlässigeren Bodenschichten, auf welchen dann ein Abfluss stattfindet (GW vom Sickerwasser nicht erreicht)

→ Return flow:

Im Boden versickertes Wasser, welches nach einer unterirdisch zurückgelegten Strecke wieder austritt (z.B. an Hängen) und anschließend oberirdisch weiterfließt + in Gewässernetz fließt

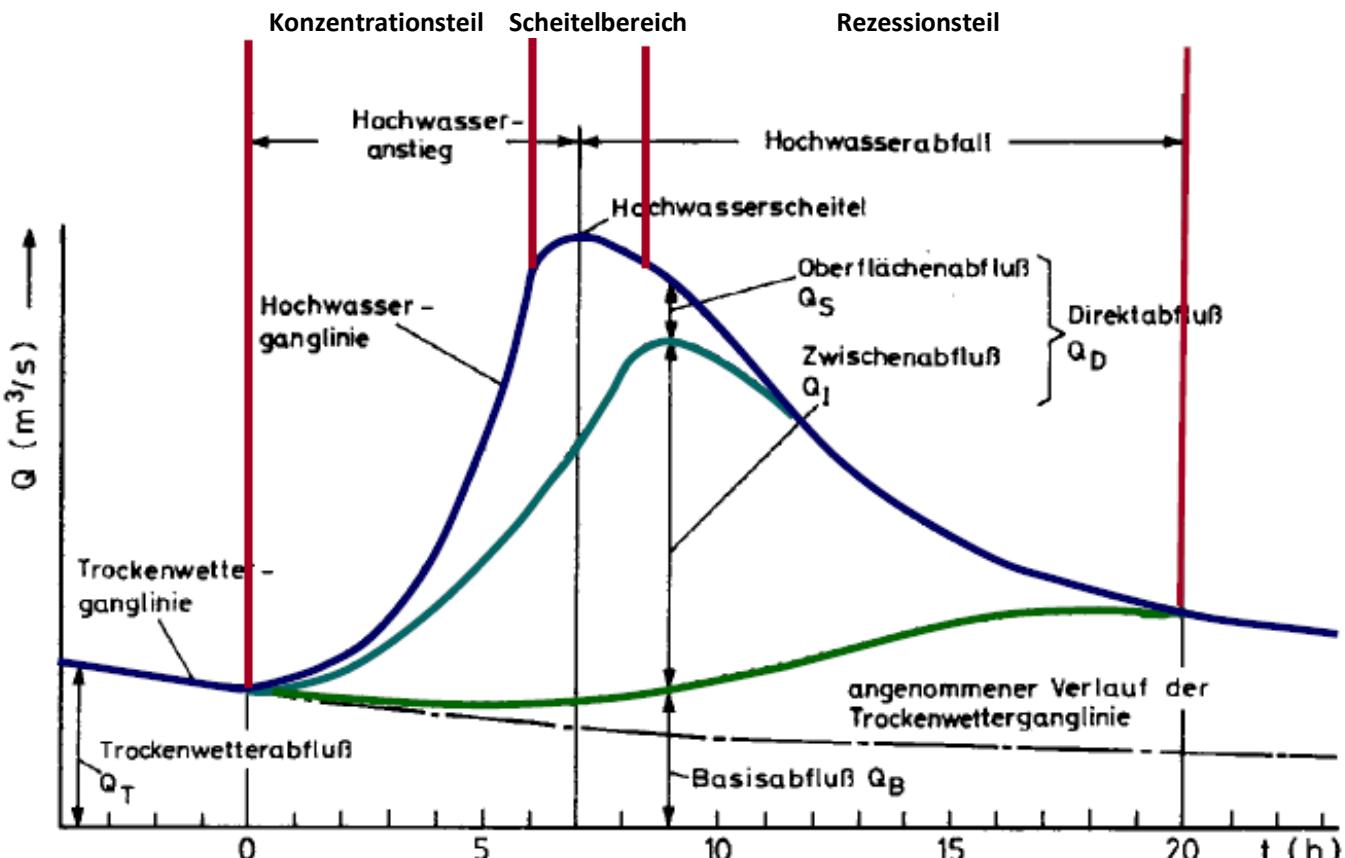
**Baseflow (versorgt auch in Trockenperioden mit Wasser):**

- Austausch von Grundwasser und Fließgewässer:
Austausch von Wasser im Porenbereich des Ufers + Sohle
→ hyporheischer Austausch:

Bei GW > Flusspegel: influente Verhältnisse:**Bei GW < Flusspegel: efluente Verhältnisse:**

Abflusskomponenten:

- **Hochwasser:** Pegelstand und Abfluss, der deutlich über dem mittleren Pegelstand/ Abfluss liegt
- **Hochwasserabfluss (=storm flow):** zeitlich begrenzter Abflussanstieg aufgrund von Niederschlägen, Schneeschmelze, etc.
- **Hochwasserdauer:** Zeit von Beginn des Abflussanstiegs bis zum Ende des Direktabflusses
- **Direktabfluss:** Abfluss aus OF- Abfluss und Interflow, direkt von einem Niederschlag- /Schmelzereignis ausgelöst
→ erzeugt Hochwasserwelle/ Hochwasserabfluss
- **Hochwassergebiete:** in kurzer Zeit kann bei Stark- NS/ Schneeschmelze sehr viel OF- Abfluss entstehen

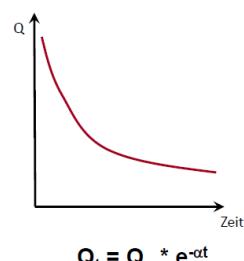
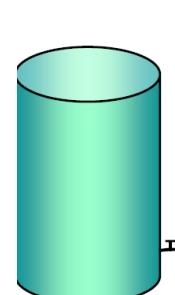


- **Konzentrationsteil:** Hochwasseranstieg
- **Scheitelpunkt:** Hochwassermaximum: maximaler OF- Abflussanstieg im Einzugsgebiet
- **Rezessionsteil:** Hochwasserabfall
- **OF- Abfluss + Zwischenabfluss (größerer Anteil): Direktabfluss**
- **OF- Abfluss:** am schnellsten: Maximum früher
- **Zwischenabfluss:** Maximum später: Abflussprozess durch Untergrund verlangsamt
- Fläche des Zwischenabflusses größer als die des OF- Abflusses: Wasser im Untergrund hat trotz des langsameren Fließens größeren Anteil an Hochwasserwelle
- **Basisabfluss:** steigt nur leicht, Maximum am Ende der Welle, kann nicht weiter ansteigen, da GW- Speicher maximalen Füllungsstand erreicht hat
- steiler Anstieg und flacher Abfall
- **OF- Speicher, Bodenspeicher, Grundwasserspeicher**

Rezessionsteil: (von Gebietseigenschaften bestimmt)

Speicherkonzept der Abflussbildung:

- Abfluss besteht nach Speichermodell aus Direktabfluss und Basisabfluss
- drei Teilabflüsse verschiedene Fließgeschwindigkeiten: verschiedenes Auslaufverhalten: OF- Speicher zuerst leer, GW- Speicher führt sogar in Trockenperioden Wasser
- Speicherhöhe von Wasser im Einzugsgebiet direkt vom Abfluss bestimmt

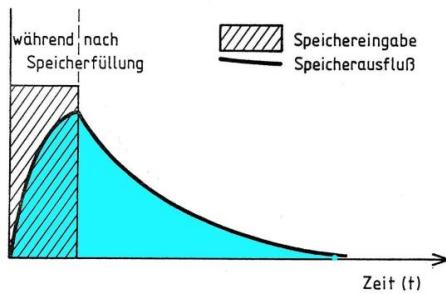
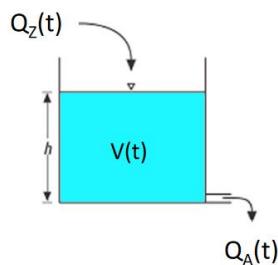


mit:

- Q_t → Abfluss zum Zeitpunkt t nach Q_0
- α → empirische Rezessionskonstante
- t → Zeitintervall zwischen Q_0 und Q_t

Linearspeicheransatz:

Abfluss hängt direkt von Wasserstandshöhe (Speicherfüllung) ab

**Auslauf:**

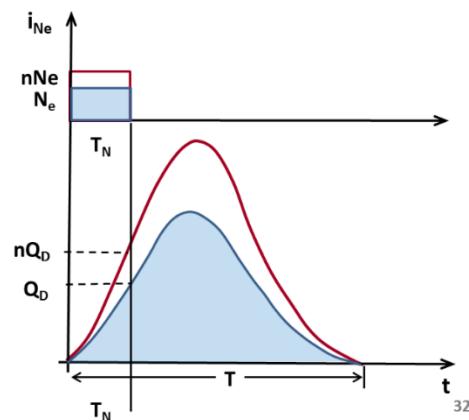
$$V(t) = V(0) * e^{-k*t}$$

$$Q_A(t) = Q_A(0) * e^{-k*t}$$

Mit Befüllung:

$$\rightarrow V(t) = V(0) * e^{-k*t} + Q_z(t) * (1 - e^{-k*t})$$

$$\rightarrow Q_A(t) = Q_A(0) * e^{-k*t} + Q_z(t) * (1 - e^{-k*t})$$

Mit k = Speicherkonstante**Einheitsganglinie:****- Zeitvarianz:**

- Einheitsganglinie ist spezifisch
- unabhängig von Jahreszeit (unabhängig bei Frost, Schnee, ...)
- Gebiet darf sich nicht verändern (Bebauung, ...)

- Invariabilität:

NS gleicher Dauer erzeugen gleich lange Abflussereignisse

- Linearität:

Abfluss direkt proportional zum effektiven NS

- Form und Dauer der Abflussganglinie bleiben erhalten

Beliebige Abflussganglinien lassen sich durch Überlagerung von Einheitsganglinien beschreiben

- Einzugsgebiete haben spezifische Konzentrationszeiten (Isochronenansatz) + spezifisches Rezessionsverhalten (Speicherauslauf)

→ Hochwasserwellen lassen sich als Einheitsganglinie darstellen: unterscheiden sich nur im Volumen, Form/ Zeit bleibt gleich

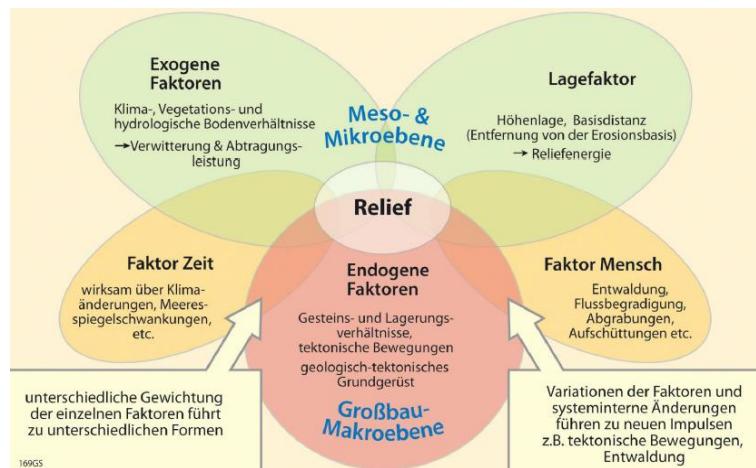
→ Abflussganglinien durch Überlagerung von Einheitsganglinien

Geomorphologie:

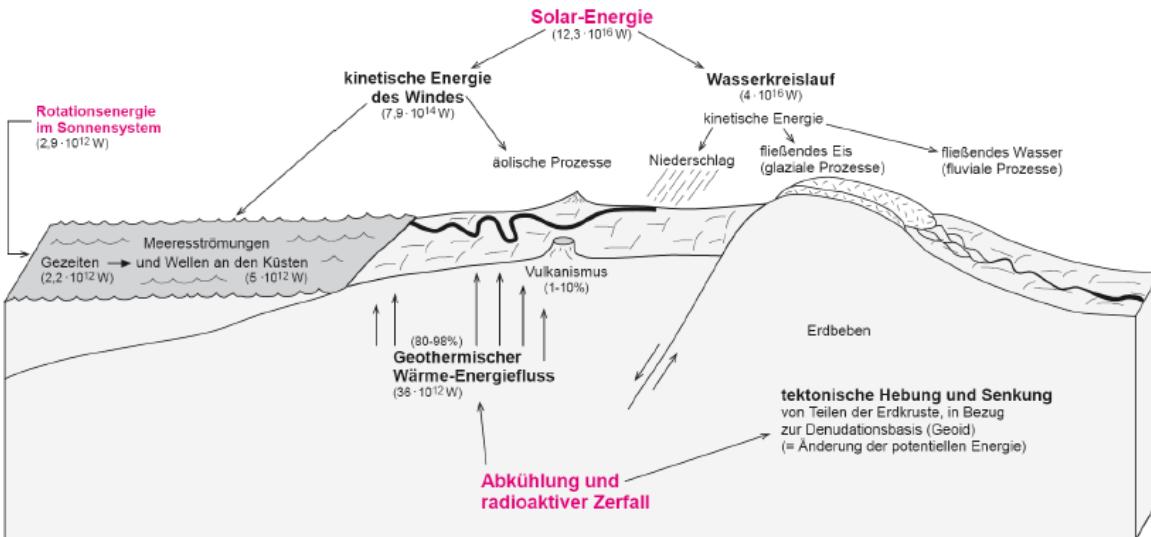
- befasst sich mit historischen und aktuellen Formbildungsprozessen
- Lehre von den OF- Formen der Erde und ihre Entstehung

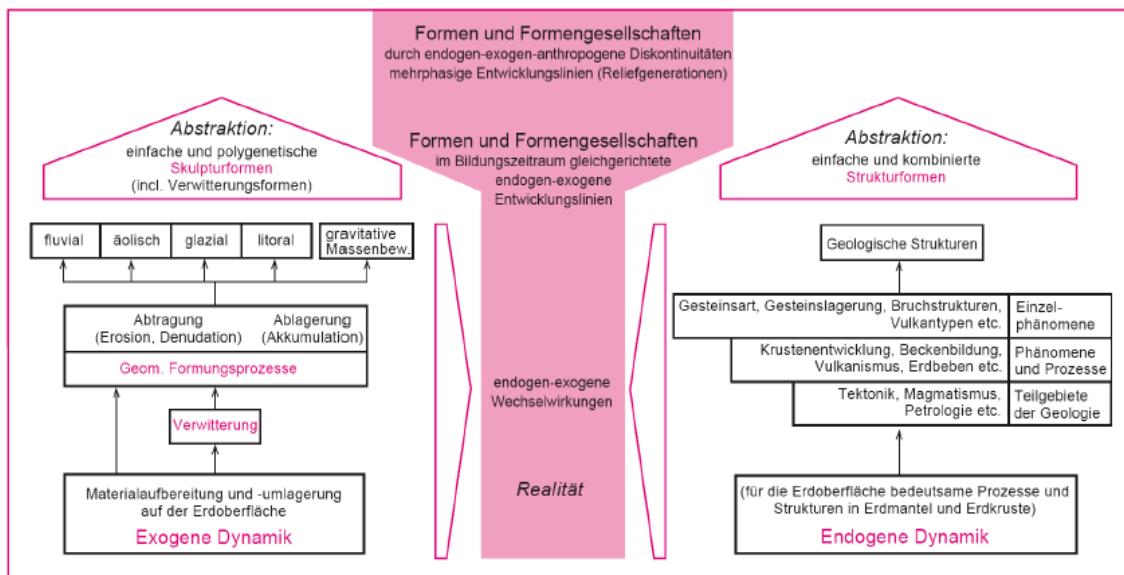
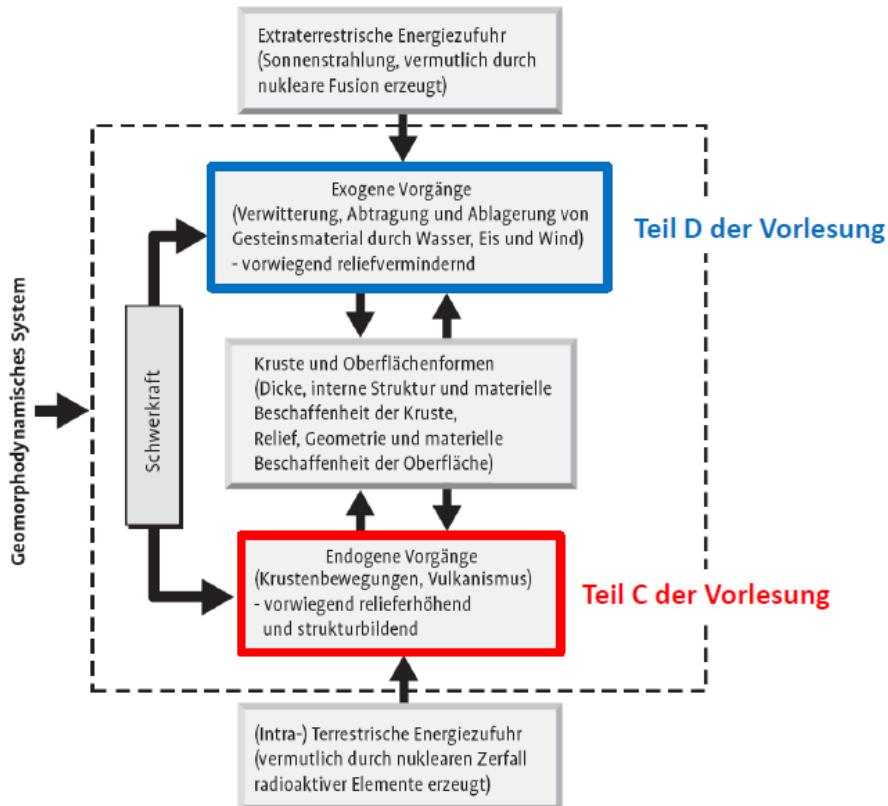
Beschäftigungsfeld des Georeliefs:

- Formung eines Reliefs: Materialgewinn und Materialverlust
- polygenetisch (durch mehrere unabhängige Prozesse entstanden) und mehrphasig entstandene Landschaftsformen
- Untersuchung nach Genese, Größe, Eigenschaften
- Exogen: meist höhenaufbauend
- Endogen: meist höhenabtragend

Faktoren der Reliefbildung:**Einflüsse:**

- Phytovarianz (Pflanzen)
- Klimavarianz
- Petrovarianz (Gesteine)
- Tektovarianz
- Humaninfluenz

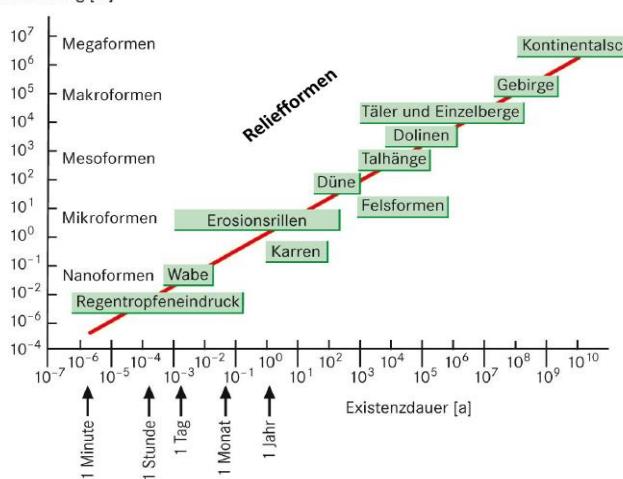
Relevante Energieflüsse für die Erdoberflächenformung:



Skulpturformen: von exogenen Faktoren geschaffene Landschaftsformen
Strukturformen: von endogenen Faktoren geschaffene Landschaftsformen

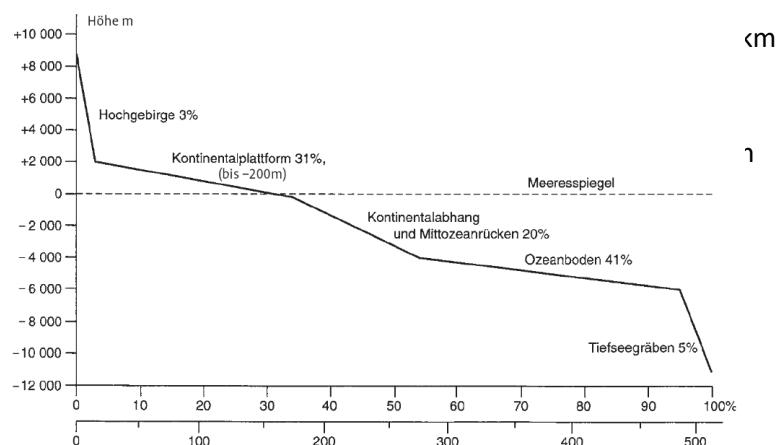
Beziehung zwischen Größe und Existenz Dauer von Landformen:

Ausdehnung [m]

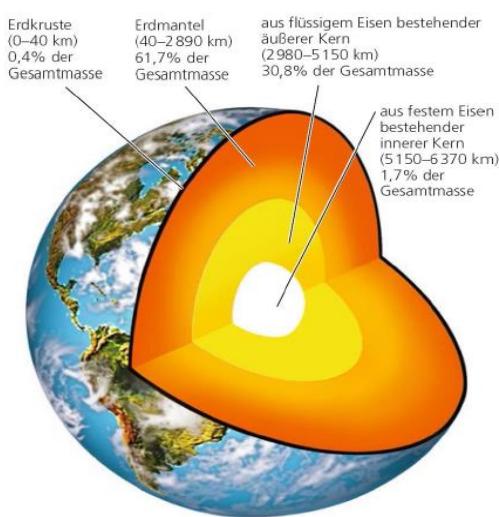


- Formen (Tal)
- Formeigenschaften (Hangneigung)
- Materialarten (Fels)
- Materialeigenschaften (Klüftung)
- Prozesse (Rutschung, Gleitung, Verwitterung)
- Prozesseigenschaften (Abtragungsrate)

Hypsometrisches Diagramm:

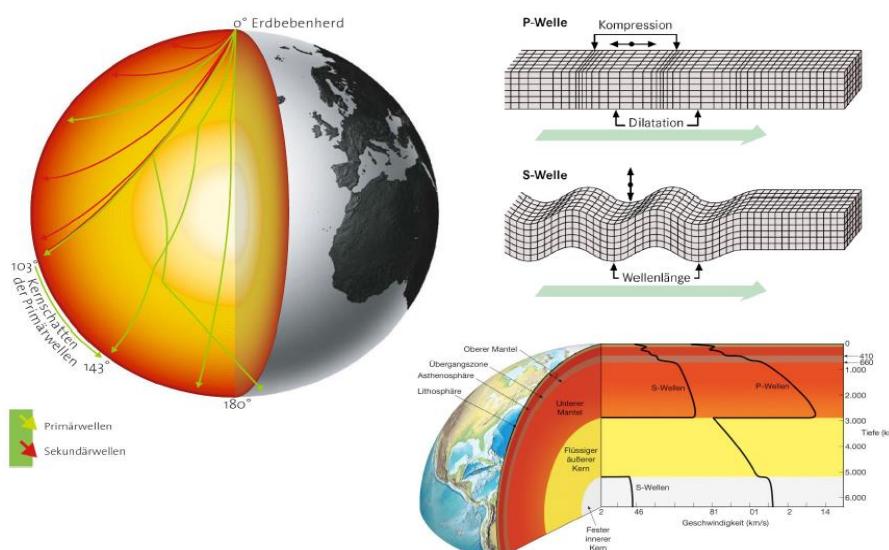


Aufbau der Erde und Erdgeschichte im Überblick

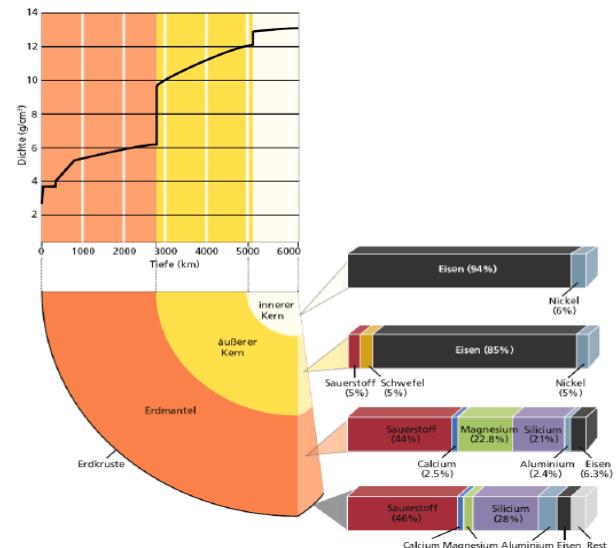


- 13,8 Mrd. Jahre: Urknall
- 4,5 Mrd. a: Alter der Erde
- Erdradius: 6370 km
- Asthenosphäre: oberer Erdmantel: Konvektionsströme (durch Wärmefluss): Magnetfeld
- Lithosphäre: schwimmt auf Asthenosphäre, Kruste + fester oberer Mantel: isostatische Bewegungen
- Mantelkonvektion: Antrieb der Plattentektonik
- Unterschied zwischen Schalen: Druck und Temperatur: Schweres sinkt nach unten: Druck steigt: verfestigen
- Isostasie: Lehre vom Schwimmgleichgewicht
- Bewegung der Lithosphärenplatten durch Wärmeausgleich zwischen kalter EOF und wärmerem Mantel

Erforschung des Erdinneren: Analyse von Erdbebenwellen:



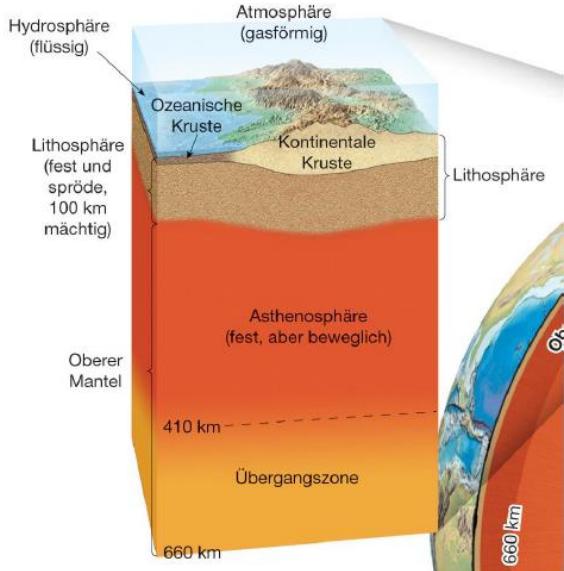
Chemische Zusammenfassung der Erdschalen:



- P- und S- Welle: Raumwellen: Ausbreitungsrichtung in Bewegungsrichtung:
Messen des Erdinneren

- P: Kompressions-/Longitudinalwelle, schneller
- S: Scher-/Transversalwelle, nur in festen Materialien
- OF- Wellen: Zerstörerisch, schwächen nach gewisser Zeit/ Distanz ab (Rayleigh- und Love- Welle)

Mohorovicic- Diskontinuität: 5- 50 km
Tiefe (Grenze Mantel Kruste):
Dichtesprung: verschiedene Dichte:
(anderes Material) Gravitative
Entmischung

**Ozeanische Kruste:**

- 6 km mittlere Mächtigkeit
- Dichte ca. 3,1 g/cm³ (Ozeanische Kruste schwerer als kontinentale)
- Max. Alter ca. 200 Mia. Jahre
- Basaltisch, SiMa

Kontinentale Kruste:

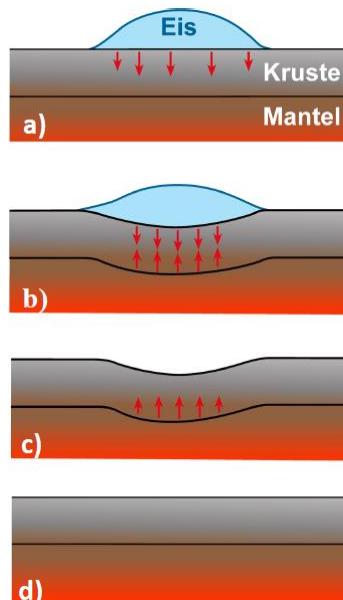
- 40 km mittlere Mächtigkeit
- Dichte ca. 2,7 g/cm³
- Max. Alter ca. 3,7 Mrd. Jahre
- Granitisch, SiAl

Isostasie: (Schwimmgleichgewicht der festen Erdkruste in zähflüssiger Asthenosphäre)

Ausgleichsbewegungen der Krustenplatten bei Entlastung (Aufstieg infolge von Abtragungen) und bei Belastung (Absinken durch z.B. Ausbildung von Eisschilden): Plastischer oberer Mantel Ursache für Isostasie

Modifikation durch isostatische Ausgleichsbewegungen:

- **Sedimentationsisostatisch:** Einfluss der isostatischen Ausgleichsbewegungen durch Sedimentablagerungen
- **Denudationsisostatisch:** flächenhafte Abtragung von Boden/Gestein, damit Anhebung der zugrundeliegenden Platten
- **Hydroisostatisch:** Druck durch Wassermassen drückt nach unten
- **Glazialisostatisch:** Eismassen drücken Platten nach unten



Bsp. Postglaziale Hebung Skandinaviens

Gründe für wiederholtes Massenaussterben:

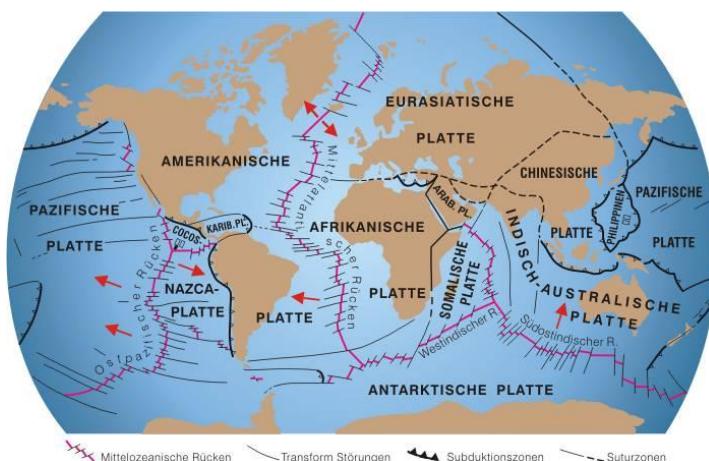
- Globale Meeresspiegelschwankungen
- Veränderte Plattenkonstellationen
- Großflächiger Austritt von Flutbasalten
- Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre
- Meteoriteneinschläge

Faunistische Einschnitte i.d. Erdgeschichte

Ära	System
2,6	Quartär
Känozoikum	Neogen
23	Paläogen
65	Kreide
145	Jura
200	Trias
251	Perm
299	Karbon
359	Devon
416	Silur
444	Ordovizium
488	Kambrium
542	

→ = „Massensterben“

Pleistozän: 2,6 mio a – 11.000 a bp
Holozän: bis vor 11.000 a



Entstehung der Kontinente: Pangäa



Driftraten: Bewegungsraten

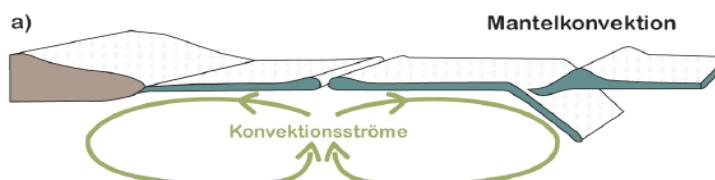
Beweise/Indizien A. Wegeners:

- Gleich verlaufende Gebirgszüge
- Gleiche Gesteine
- Fortsetzung von Vergletscherungsspuren
- Gleiche fossile Flora & Fauna (Mesosaurus)
- Passform der Kontinentalränder
- Alte Fluss-Systeme („Ur-Amazonas“: Niger und Amazonas passen zusammen)

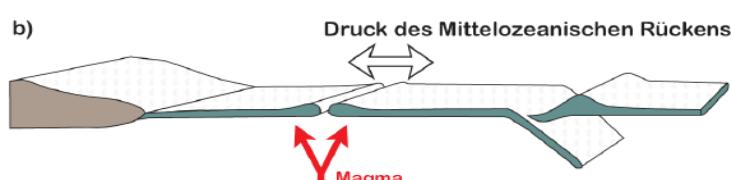
Palomagnetisches Muster:

- Magnetfeld der Erde polt sich alle 100.000 a um
- Eisenhaltiges Magma tritt bei Plattenverschiebung aus und erstarrt
- Ausrichtung des Eisens eingefroren, Basalt nordet sich ein
- Gesteinsalter kann mit Detektoren festgestellt werden
- Marie Tharp: Kartieren von Ozeanböden mithilfe des Palomagnetischen Musters

Die wichtigsten Kräfte als Motor der Plattenbewegung:

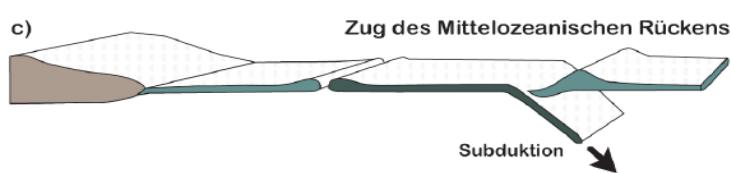


„ridge push“



„slab pull“: Aufstieg von Magma (warmes geringere Dichte: Aufstieg erkalten: höhere Dichte: Abstieg)

Seafloor-spreading: Ozeanbodenbildung durch Auseinanderdriften: Magma steigt auf und verhärtet



Zug des Mittelozeanischen Rückens
Subduktion einer Platte (ozeanische Platte) aufgrund geringerer Dichte (kontinentale ist älter und damit schwerer und dichter)

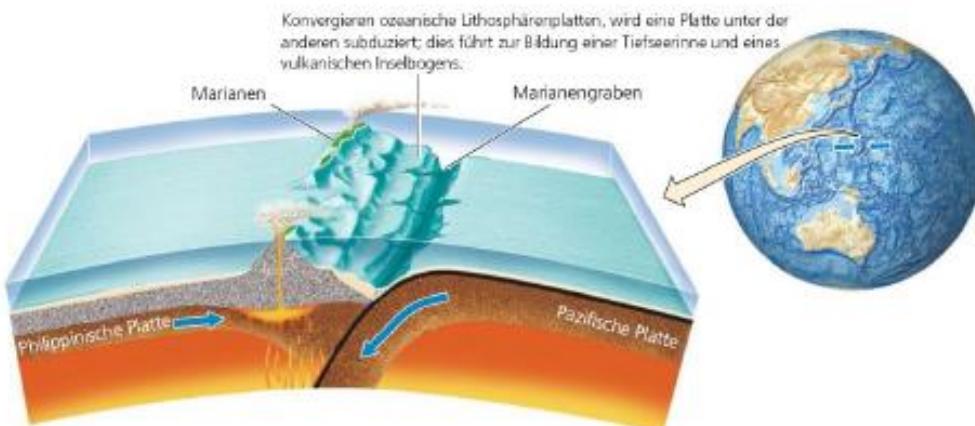
Lithosphäre der Kontinente älter: ozeanische Kruste wird ständig neu aufgeschmolzen

Antrieb der Plattentektonik:

Aufsteigen von heißem Magma: Abkühlung und Absinken: erneut erwärmen und aufsteigen (Konvektion)



Konvergente Plattengrenzen



Konvergenz von zwei ozeanischen Platten

Inselbogentyp (Bali)

- Vulkanismus
- Erdbeben
- ältere Platte (schwerer) wird subduziert
- Inselbögen und Tiefseeräben



Konvergenz einer ozeanischen und einer kontinentalen Platte

Andiner Typ (Anden)

- Atacama Tiefseerinne
- Vulkanismus- am Rand der kontinentalen Platte kommt es zur Entwicklung eines Vulkangürtels



Konvergenz von zwei kontinentalen Platten

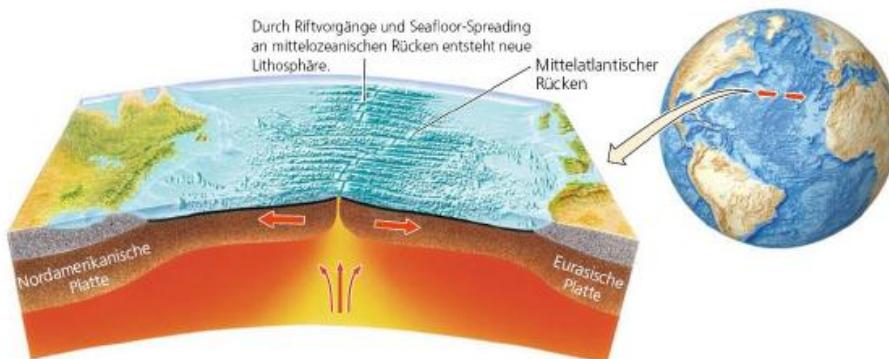
Alpiner Typ (Alpen, Himalaya)

- Auffaltung: Orogenese (beide Platten gleiche Dichte)
- Kollision erzeugt extreme Krustenverdickungen
- Überschiebung der Platten, keine echte Subduktion

- Plattenkonvergenz: Gebirgsbildung
- häufig Vulkanismus und Erdbeben in Subduktionsgebieten
- ozeanische immer unter kontinentale (schwerer, höhere Dichte)

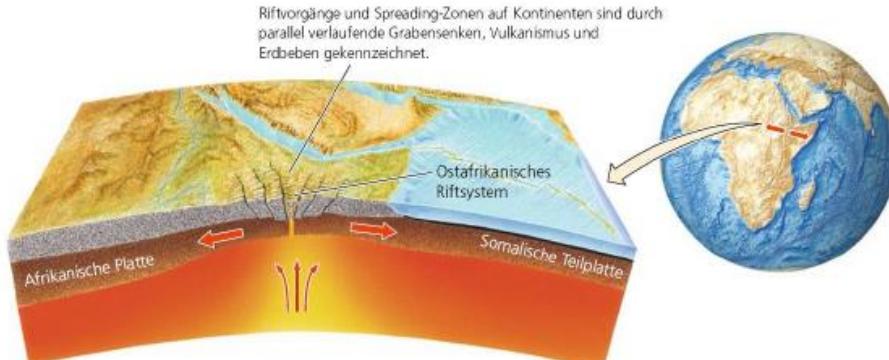
Divergente Plattengrenzen: Konstruktive Plattengrenzen

- Dehnung ozeanischer oder kontinentaler Lithosphäre
- Aufreißen der Lithosphäre an Schwächezonen durch Konvektionsströme
- zwischen auseinanderdriftenden Plattenstücken wird ständig neue Kruste gebildet (Material aus Asthenosphäre, Austritt dünnflüssiger Basaltlava): - **Sea floor spreading:** Bildung von ständig neuer basischer, ozeanischer Kruste (Mittelozeanischer Rücken)
- Ozeanentstehung durch Plattendivergenz: z.B. Atlantik, Rotes Meer
- Mittelozeanischer Rücken liegt in Island über dem Meeresspiegel (Hotspot: besonders intensiver Wärmestrom: starker Auftrieb: Lithosphäre gewölbt)



Plattentrennung auf Ozeanboden

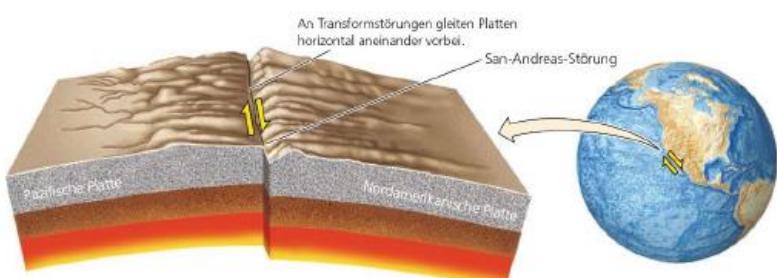
Untermeerische Gebirgsketten mit zentraler Grabenstruktur (Rift, Mittelatlantischer Rücken): Vulkanismus und Erdbeben



Plattentrennung auf Kontinenten

Kontinentaler Graben (ostafrikanisches Riftsystem, Oberrheingraben): parallel verlaufende tektonische Grabensenken, basaltischer Vulkanismus

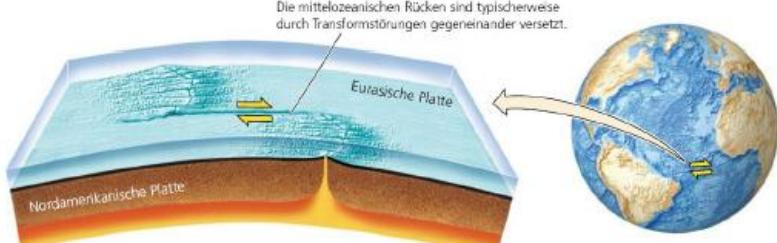
Transformstörungen



- Kein/ wenig Vulkanismus
- Erdbeben: Hartes Gestein: Bruch: Verkeilen von Platten (zerstörerische OF- Wellen), weiches Gestein: Falten/ Dehnen
- weder Raumgewinn noch Raumverlust

Transformstörungen auf Kontinenten

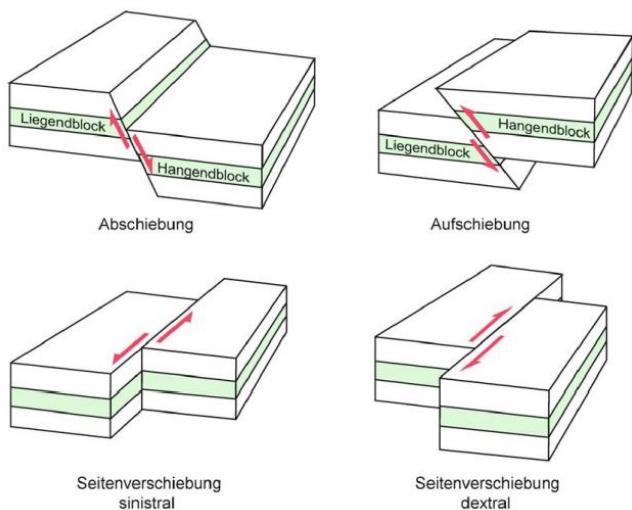
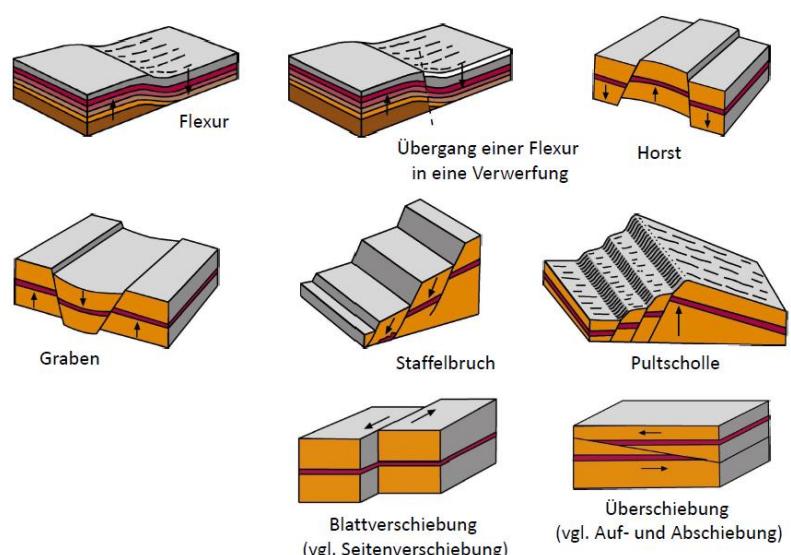
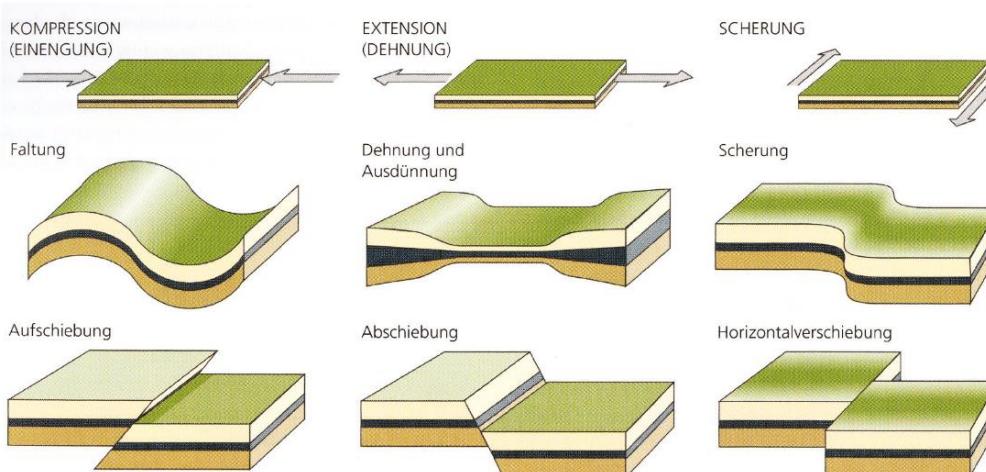
- Kontinentale Kruste wird gegeneinander versetzt: Reibung: Scherspannung steigt bis Reibungswiderstand überwunden: Bruch: Erdbeben



Transformstörungen an mittelozeanischen Rücken

Krustendeformation (Bruchtektonik):

- Ursache: Tektonische Verschiebungen (Plattendivergenz, -konvergenz, Transformstörung)
- schnelle Verformung: Erdbeben
- Möglichkeiten: aneinander vorbeigleiten durch seitliche Scherkräfte (Transformstörung), zusammendrücken/ verkürzen durch Kompression (Plattenkonvergenz), auseinanderreißen durch Dehnung (Plattendivergenz)
- Resultate: Falten, Verwerfungen, Überschiebungen (Auf- und Abschiebungen)
- Falten: Faltengürtel in Faltengebirgen (z.B. Ural, Alpen Himalaya)
- Verwerfungen: Brüche mit horizontaler/ vertikaler Verschiebung von Gesteinsschichten (**Staffelbruch**: treppenartig versetzte/ abgesunkene Schollen (Oberrheingraben), **Pultscholle**: treppenartig versetzte/ angehobene Schollen)
- Überschiebungen: Abschiebung: Dehnungsbrüche mit Raumdehnung (Flexur), Aufschiebung: Raumeinengung durch Kompression
- Horst: nach oben geschobene Gesteinsscholle (Aufschiebung)
- Graben: nach unten geschobene Gesteinsscholle (Abschiebung)
- Raumgewinn oder -verlust
- Versatz: **Sprunghöhe**

Grundtypen der Krustendeformation durch Bruchtektonik:**Krustendeformation durch Bruchtektonik****→ Orogenese****Krustendeformation durch Faltentecktonik**

- Isostatische Hebung: Deformation der Erdkruste

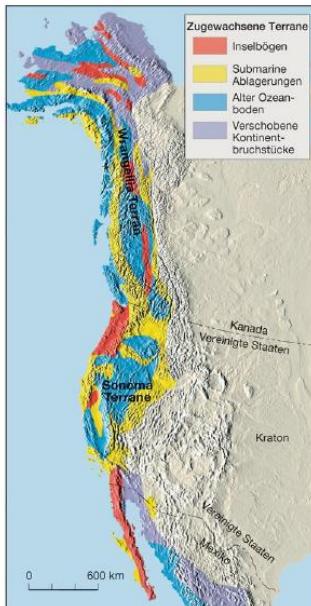
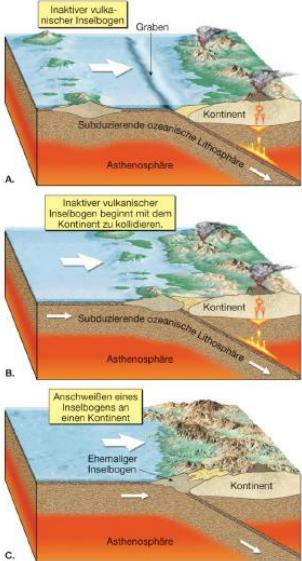
- Scherung: weiches Gestein
- Horizontalverschiebung: hartes Gestein

- **Geologisches Fallen und Streichen:**
Sedimente waagrecht angeordnet, tektonische Krustenbewegungen zerlegen diese Schicht:
Schrägstellung (Lagerung der Schichten im Raum: Sedimentation)

Phanerozoische Orogenesen in Europa:

Orogenese	Zeit	Wichtige Aufschlussgebiete
Alpidisch	Kreide bis Paläogen	Alpen
Variszisch	Karbon bis Perm	Rheinisches Schiefergebirge
Kaledonisch	Ordovizium bis Silur	Norwegen, Schottland
Cadomisch	Kambrium	Bretagne

Terrane(s) als „angewachsene“ Krustenblöcke



- **Terrane:** tektonisch isolierter, relativ einheitlicher Gesteinskomplex, der von ihm stark differierenden Plattenrändern/Gesteinseinheiten „angeschweißt“ wurde

- Teile der subduzierenden Platte bleiben hängen: Angliedern in Orogenese:
Alochthonous Bruchstücke (gehören eigentlich nicht zum Kontinent, wo sie angewachsen sind)

Einteilung nach Bildungsalter:

Kadomisch -> kaledonisch -> variszisch -> alpidisch (Sehr junge Gebirge: vulkanische Gebirge (Gebirge des westpazifischen Inselbogens und SE-Asiens))

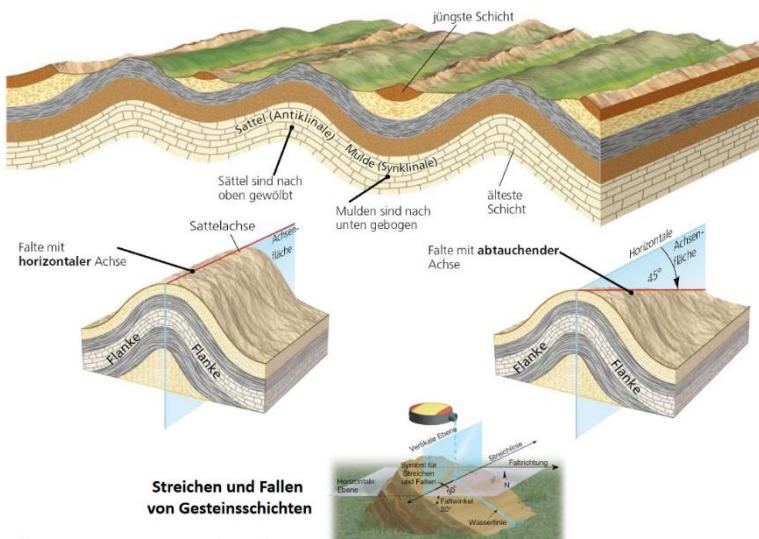
Einteilung nach geomorphologischen Erscheinungsformen

Kammgebirge, Kuppen, Ketten, Grat, Tafel, Vulkan

Einteilung nach geologisch-tektonischen Erscheinungsformen:

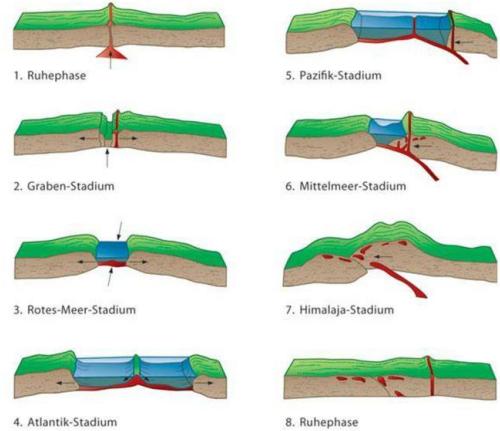
Bruchschollengebirgen, Faltengebirge, Horst, Vulkan, Bruchfalten, Rumpfschollen

Krustendeformation durch Falten tektonik:



Orogenese:

Wilson Zyklus



Lernhelfer.de

Überblick geologisch-tektonischer Gebirgsbildungszonen

- **Gebirge konvergierender Plattenränder**
 - Kollision ozeanischer und kontinentaler Platten (Subduktion): Anden, Kaskadengebirge der USA (Mt. St. Helens)
 - Kollision von kontinentalen Platten: Alpen, Hoher Atlas, Balkan, Kaukasus, Himalaya (während alpidische Orogenese) Ural, Appalachen (während variszischer Orogenese)
 - Kollision von ozeanischen Platten: Japansicher Inselbogen, Philippinen, indonesisches Archipel, Aleuten, Marianen
- **Gebirge divergierender Plattenränder:** auf Island, in E-Afrika (Kilimanjaro, Mt. Kenya, Virunga-Vulkane), in Sibirien
- **Gebirge über Hot Spots:** Hawaii, Goggar-Gebirge, kanarische Inseln (Teneriffa; Tide 3718m Höhe)

Vulkanismus

- Prozesse und Erscheinungsformen, die mit dem Austritt von Magma an EOF in Zusammenhang stehen
- Pazifischer Feuerring: (ring of fire) 60% des globalen Vulkanismus
- Magmablase weniger dicht: Nachgeben des Drucks der Erdkruste: explosiver Ausbruch

Vorgang:

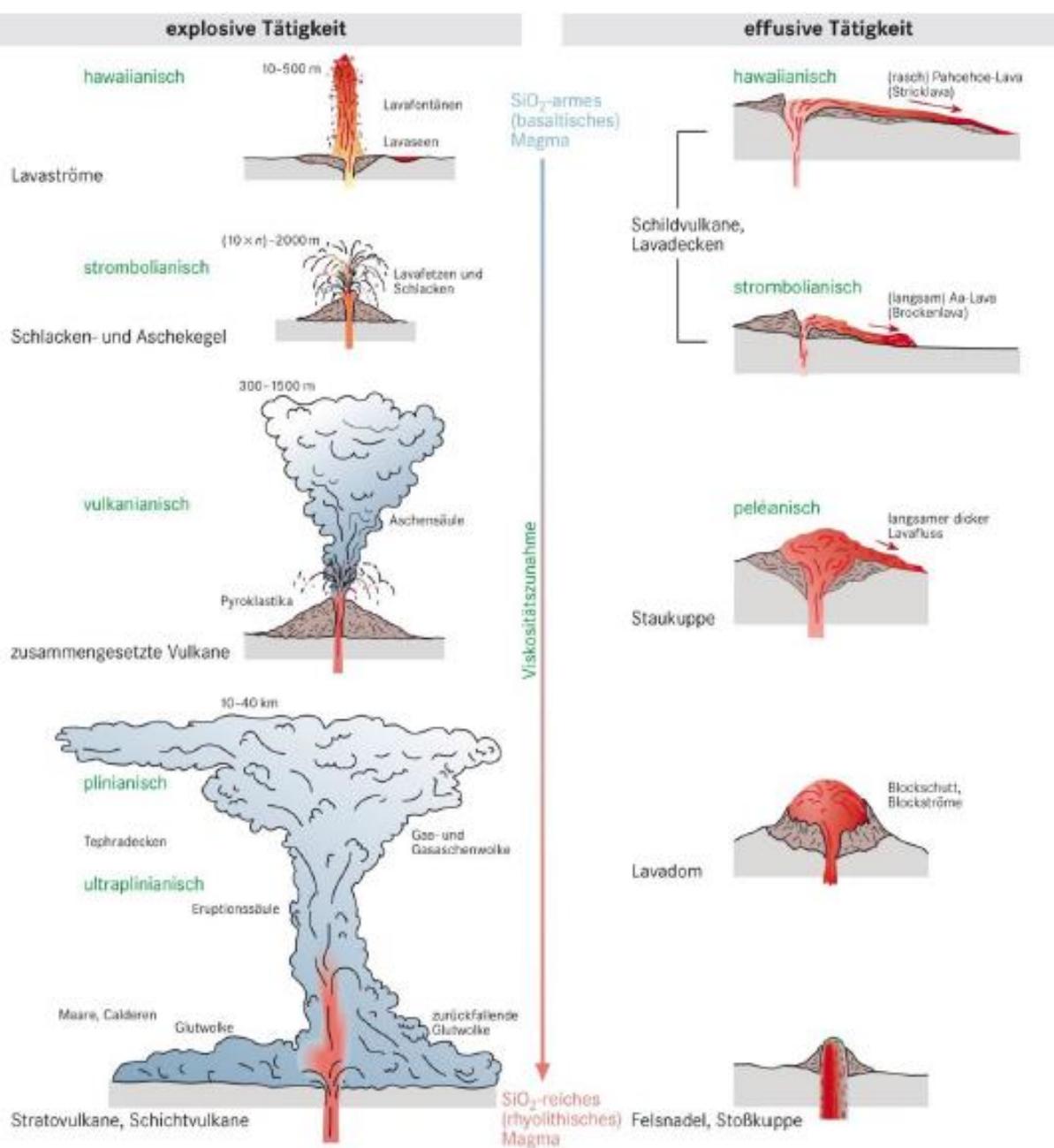
- Gestein im Mantel schmilzt
- Hochtragen durch Druck
- Magma: steigt auf wegen geringerer Dichte
- Kruste: Magmakammern: bei genügend Druck: hochschießen (Pyroklastika, Eruptionswolken)

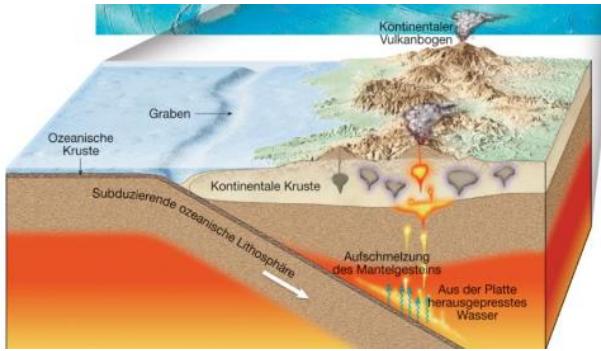
Erstarrungsort des Magmas:

- **Plutonismus:** Tiefenvulkanismus: vorzeitige Erstarrung magmatischer Körper in Oberkruste, kein unmittelbarer Durchbruch bis an OF (Freilegung durch Abtragung): Plutonite
- **Subvulkanismus:** Erstarrung nahe der EOF: Quellkuppen und Lagergänge (ausgekühlte Magmablase)
- **OF-Vulkanismus:** Vulkanite

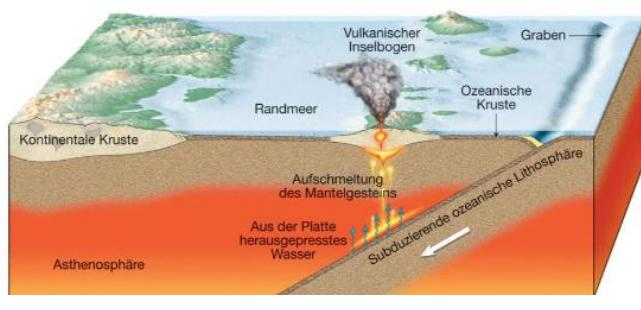
Verbreitung von Vulkanismus:

Subduktionszonen, mittelozeanischer Rücken, Kontinentalränder, Hot Spots



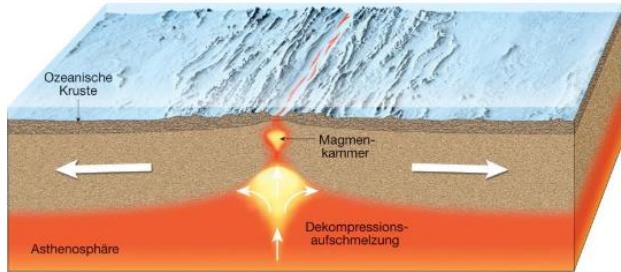


Kontinentaler Vulkanbogen

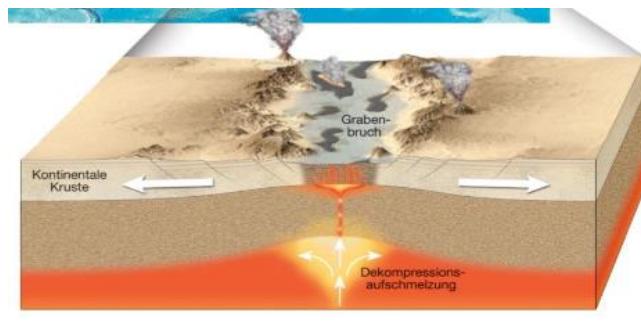


Inselbogen

Divergenter Plattenvulkanismus: 15 %

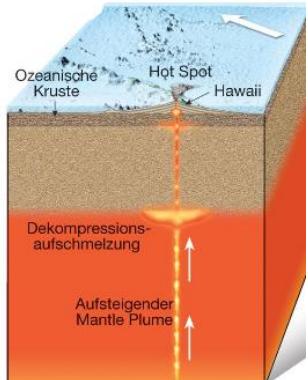


Ozeanischer Rücken

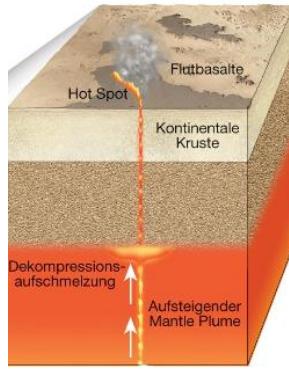


Kontinentaler Graben (Oberrheingraben)

Intraplattenvulkanismus: 5%



Ozeanisch



Kontinental

Phreatische Eruption: Lava trifft auf unterirdisches Wasser und verdampft dieses: Explosion

Magma: (dem Erdinneren angehörende/ von dort stammende, glutheiße Lösung)

Magmatismus: Vorgänge, die durch Förderung zähflüssigen Materials aus dem Erdinneren hervorgerufen werden:

Bildung und Bewegung von Magmen

Chemische Zusammensetzung der Magmen hat Einfluss auf Fließgeschwindigkeit, Eruptionstyp und Vulkanform:

Sauer:

- rhyolithisch
- Hoher Anteil an Kieselsäure SiO₂: silikatreich
- Zähflüssig: mehr Druck kann sich aufbauen
- Lavafontänen, Steinbrocken, Wolken
- explosiv/ übersättigt/ hochdifferenziert/ dacitisch/ zäh/ gasreich
- Stratovulkan: steil
- Magmablase eher jung

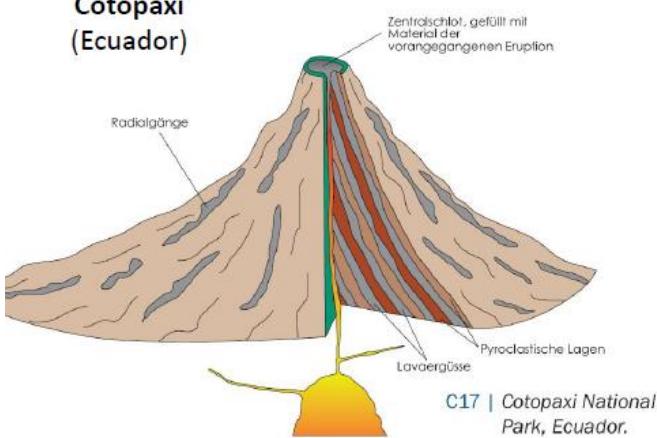
Basisch:

- Basaltisch
- Niedriger Anteil an SiO₂: silikatarm
- dünnflüssig
- effusiv/ untersättigt/ undifferenziert/ basaltisch/ flüssig/ gasarm
- Schildvulkan: flach
- eher alte Magmablase: SiO₂ setzt sich ab
- Bsp. Sticklava (kühlt langsam ab, unten noch flüssig), Blocklava (rollende Kohlestücke), Pillowlava (submarin, Lava kühlt bei Kontakt mit Wasser sofort ab)
- je tiefer desto basaltischer
- Flutbasalte: extrem dünnflüssig

Vulkantypen:

Schichtvulkane:

Cotopaxi (Ecuador)



Schildvulkane:

- auch **Stratovulkan**
- steile Flanken, können sehr hoch werden
- bis zu 6 km hoch
- explosive Ausbrüche durch Magmananstauung
- Parasitäre Schläuche möglich
- übereinanderliegende Schichten aus Lava und Pyroklastika beim Abkühlen

Somma-Vulkan:

- Bsp. Vesuv
- Entstehung eines Vulkans auf einem alten: Neuer Krater auf altem
- Absacken des Kraters durch Magmaverlust: Entleerte Magmakammern

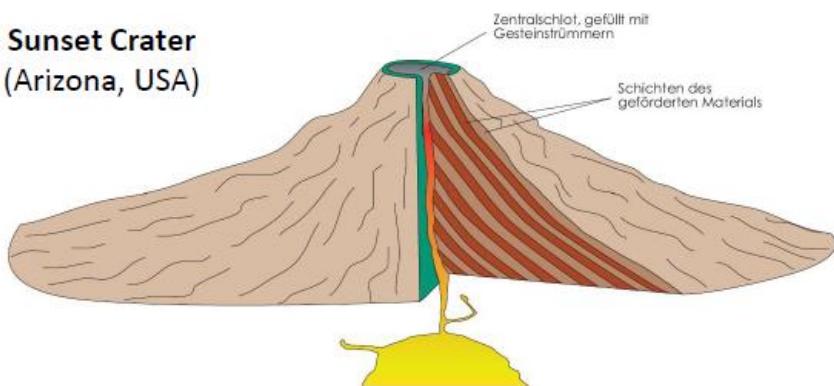
Gesteinstyp:	Basalte	Andesite	Dacite
Chemismus:	basisch	intermediär	sauer
SiO ₂ -Gehalt (Gewichts-%):	46 - 52	52 - 58	58 - 68
Temperatur der Schmelze:	heiß (1100 - 1200 °C)		weniger heiß (700 - 900 °C)
Fließverhalten:	dünnflüssig		zähflüssig
Entgasungsvermögen:	gut bis sehr gut		schlecht
Ausbruchsverhalten:	effusiv	gemischt	explosiv
Explosivitätsindex (E):	sehr niedrig (3 - 7)	mittel (60 - 80)	hoch (> 80)
Produkte:	fast ausschließlich Laven	Laven und Pyroklastika	großenteils Pyroklastika (Bimssteine, Aschen, Ignimbrite)
Vulkanbauten:	Schildvulkane, Basaltplateaus	lavareiche Stratovulkane	lavaarme Stratovulkane, Staukuppen
Berühmte Beispiele:	Kilauea, Ätna, Stromboli	Mayon, Fujiyama	Krakatau, Merapi, Montagne Pelée, Mt. St. Helens

Sierra Grande (New Mexico, USA)



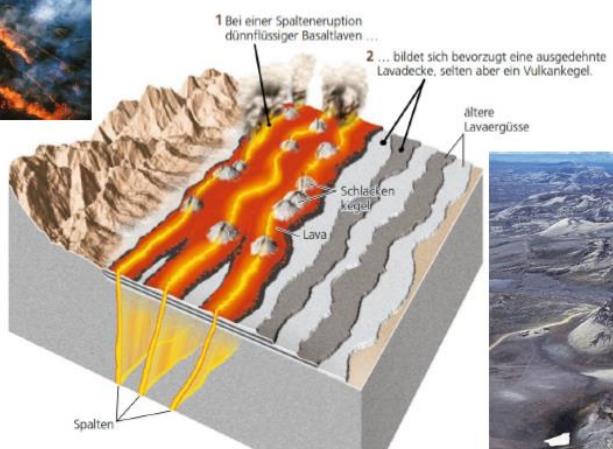
- sehr flach: Lava fließt sehr weit weg
- häufigste Art
- Material fließt langsam ab
- mehrere Schläuche: Flankeneruption, Hauptschlott, Lavaerguss
- Parasitärer Zentralvulkan: Viele Nebenkrater
- Schildvulkane sind um ein Vielfaches größer als Schichtvulkane

Sunset Crater
(Arizona, USA)



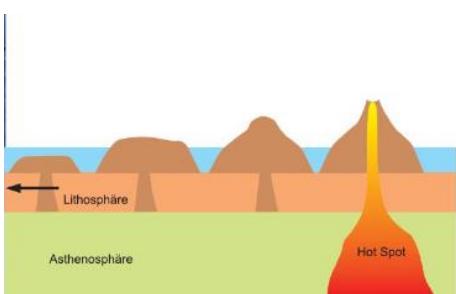
- Material sehr locker: nicht sehr steil, eher klein
- häufigste Vulkanform
- Gesteine fallen in Schlot

Spalteneruption:



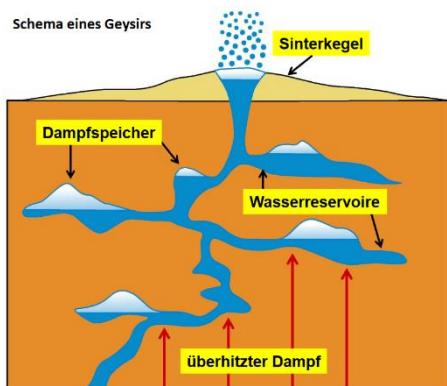
- Bei starker Dehnung der Lithosphäre (divergierende Plattengrenzen)
- z.B. Laki-Spalte auf Island: Mittelozeanischer Rücken verläuft auf Festland
- fließt flächenhaft aus

Hotspot-Vulkanismus:



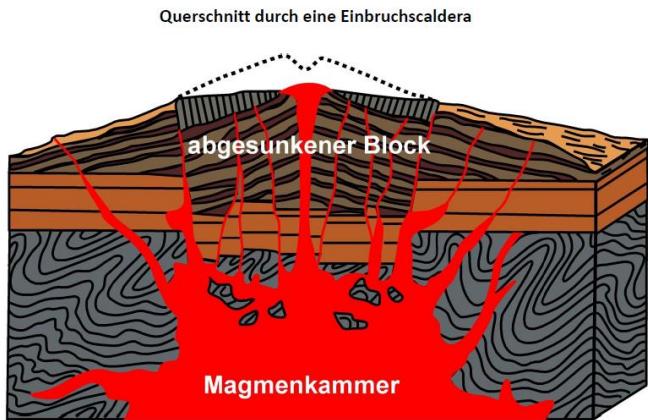
- Hotspots werden immer dann aktiv, wenn sich Platte über Hotspot schiebt
- Vulkan wird von Magmablase versorgt
- Plattenverschiebung
- Vulkan von Magmablase getrennt: erlischt
- Neuer Vulkan bildet sich über alter Magmablase
- > Vulkanketten
- Phreato-magmatische Explosion: Wasser in Magmakammer: Gasdruckerhöhung und Ausbruch
- Bogenform: Drehung/ Richtungsänderung der Platte

Geysire:



- Vulkanismus verbunden mit geothermischer Anomalie: Aufschmelzung von Gestein und verdampfen von Wasser im Untergrund
- schlagartiges Befördern von Wasserdampf an OF
- Dampf stark übersättigt an Mineralien: Kalkablagerungen

Calderen:



- Druck in Magmakammer sinkt: Einsturz durch auflastenden Druck: **Einbruchscaldera**
- Explosive Eruption sprengt oberen Teil des Vulkans weg: **Explosionscaldera**
- zylinderförmiger Kegel oft mit mehreren Schlacke- und Aschekegeln

Pyroklastische Förderprodukte:

- unverfestigtes gefallenes Material: Tefra
- Tuff: verfestigte Asche
- Laven: Lavaströme, Kissenlava,
- Glutwolken: Gase können Atmosphäre verändern

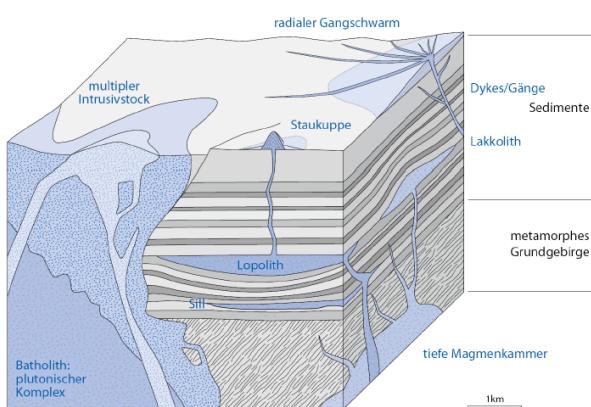
Maare:



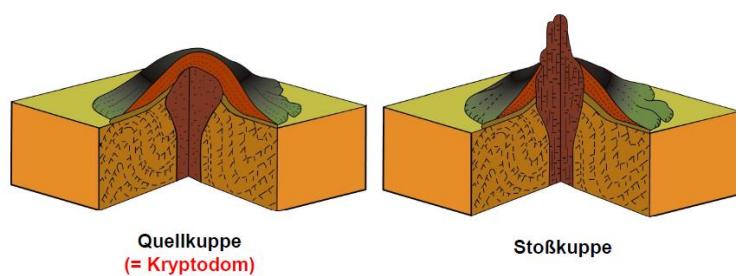
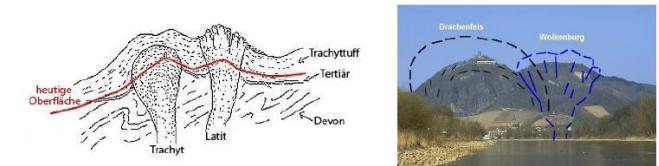
- entstehen durch phreato-magmatische Explosion
- Explosionstrichter: sprengt obere Gesteinsschicht
- Lava und Wasser: Dampfexplosion
- Tiefe des Magma- Wasser- Kontakts entscheidet über Intensität des Ausbruchs
- Pyroklastika sinken wieder in den Schlot: Ringwall
- kleiner als Calderen und oft mit Wasser gefüllt

Korngröße	Unverfestigt	Verfestigt (die jeweilige Korngröße muss mehr als 75% betragen)
Bomben	> 64 mm Bomben (verformbare Magmafetzen); Wurfschlacken (verformbar, nicht verformbar); Blöcke (feste Gesteinsbruchstücke)	Agglomerat; verschweißte Schlacken, Schlackentuff; pyroklastische Breccie
Lapilli	64 - 2 mm Lapilli (Schlackenlapilli, Bimssteinlapilli)	Lapillituff
	< 2 mm Aschen (Bimssteinaschen)	Aschentuff

Magmatische Intrusivkörper:

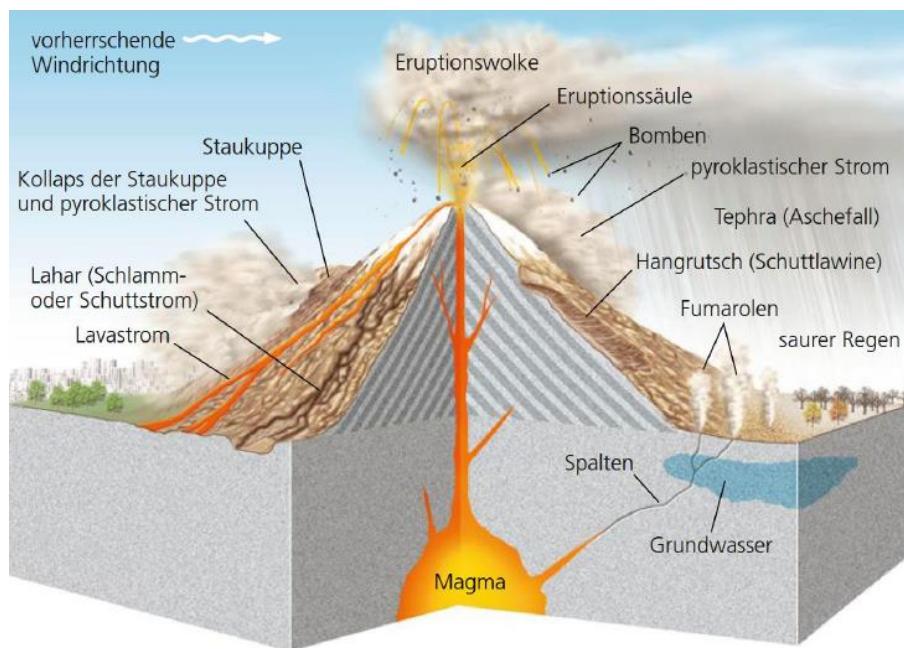
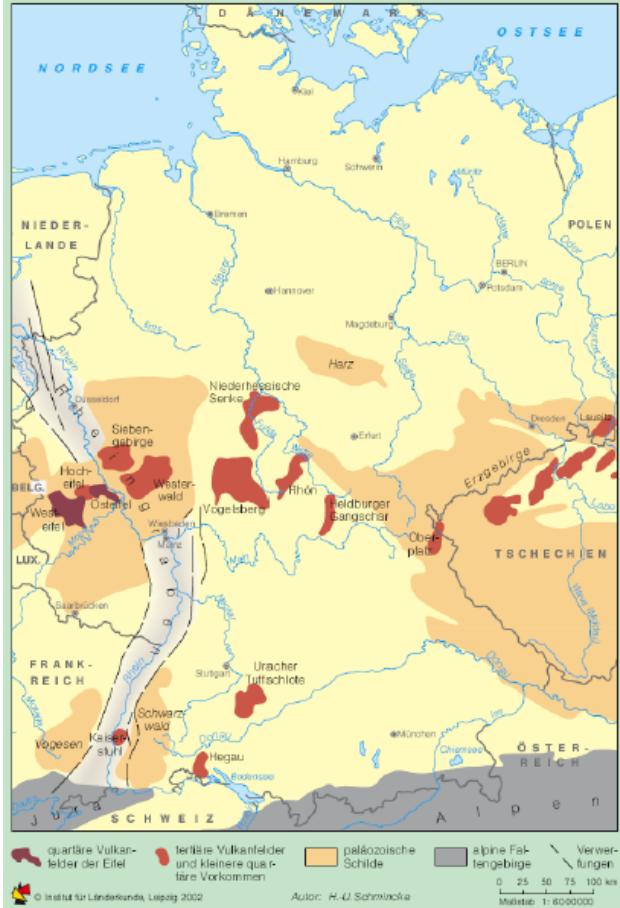


Stoß- und Quellkuppe:



- Bsp. Mt. St. Helens: zähe Lava: Verschließen: Explosion

Vereinfachte Darstellung der großen Vielfalt an vulkanischen Naturgefahren:



zusätzlich Glutwolken und Glutlawinen; Eruptionswolke kann bis in Stratosphäre gehen, Einstellung des Flugverkehrs, klimatische Unterschiede, Umformung des Umlands, Vernichtung der dort ansiedelnden Menschen

Positives am Vulkanismus:

- Ost-/ Westeifel
- Schwäbische Alb
- Bodensee
- Oberrheingraben

- Vulkanisches Glas
- gute Böden (Mineralien): hohes Agrarpotential
- hydrothermale Erzlagerstätten

Gesteine und Gesteinskreislauf

- **Minerale:** physikalisch und chemisch homogenen Bestandteile der Erdkruste und von Teilen des Erdmantels
- Minerale mit ebenen OF (Kristallflächen) die in bestimmter geometrischer Beziehung zur Atomanordnung stehen: Kristall
- Minerale meistens kristallisiert: wenige amorph (mit gleichen physikalischen Eigenschaften in alle Richtungen)
- mehr als 2000 Arten bekannt, davon 250 gesteinsbildend
- mafisch (basaltisch), andesitisch (intermediär), felsisch (granitisch)

Wichtige Mineralgruppen und Minerale

- Silikate: Feldspat, Quarz, Glimmer, Kaolinit, Olivin, Pyroxen, Andalusit (90% aller gesteinsbildenden Minerale Silikate)
- Oxide: Magnetit, Hämatit
- Karbonate: Calcit, Dolomit
- Sulfide/ Sulfate
- Halogenide
- Lapili: kleine Steinchen
- Gesteine unterscheiden sich durch Mineralbestand, chemische Zusammensetzung, physikalische Eigenschaften (z.B. Dichte) und Gefüge voneinander:

Gefüge: Struktur und Textur (innerer Bau)

Struktur: z.B. Größe und Form der Mineralkörper oder Rundungsgrad

Textur: räumliche Anordnung und Verbindung der mineralischen Bestandteile

Ordnen sie folgende Eigenschaften folgenden Gesteinen zu:

Granit, Basalt, Kalk, Gneis

Vulkanit (Basalt), Karst (Kalk), Ozean (im Ozean entstanden: Kalk, Ozeanboden: Basalt),

Silitiumdioxidgehalt (SiO_2 , Kieselsäure, Silikate: sauer, Granit viel, Basalt wenig), **Tiefengestein** (Basalt nicht, Granit schon)



Granit: hell, viel Quarz, sauer (felsisch), hoher SiO_2 Gehalt, Plutonit (grobkristallin), Metamorphit, Tiefengestein, Rhyolith gleiche Zusammensetzung aber andere Entstehung



Basalt: dunkel, wenig Quarzgehalt, Vulkanit (feinkristallin), basisch, wenig SiO_2 Gehalt, Metamorphit, Ozeanboden aus Basalt, kein Tiefengestein, mafisch (viel Magnesium und Eisen)



Kalk: Karst, Sedimentgestein (im Ozean entstanden), CaCO_3 , durch Metamorphose entsteht Marmor, hoher Anteil an Calcit, Alpen bestehen daraus



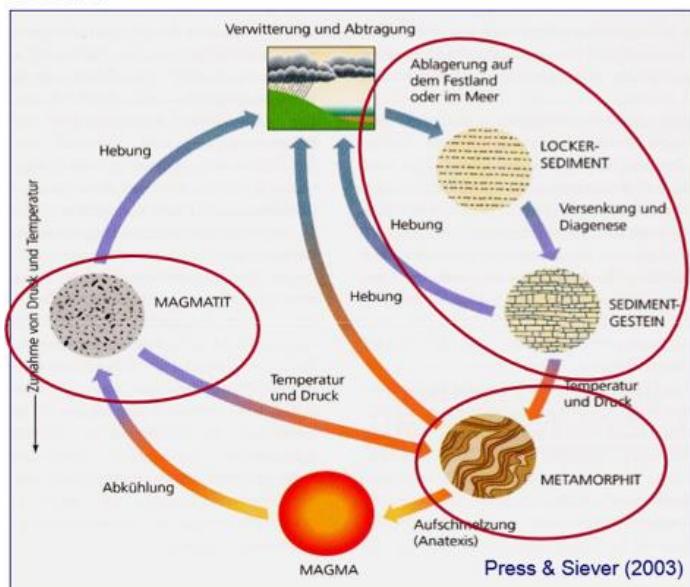
Gneis: Metamorphit (entsteht unter hohem Druck + Temperatur), Parallelstruktur, abwechselnd helle und dunkle Bänder, hoher Anteil an Feldspat

Vulkanit: Effusivgestein

Plutonit: Intrusivgestein

SiO ₂ Gehalt steigt (Magnesium/ Eisen sinkt)			
Vulkanite	Basalt	Andesit	Rhyolith
Plutonite	Gabbro	Diorit	Granit
Magmaart	basisch	intermediär	sauer
Farbe	dunkel		hell

Gesteinskreislauf:



Gestein: Verwitterung/ Transport

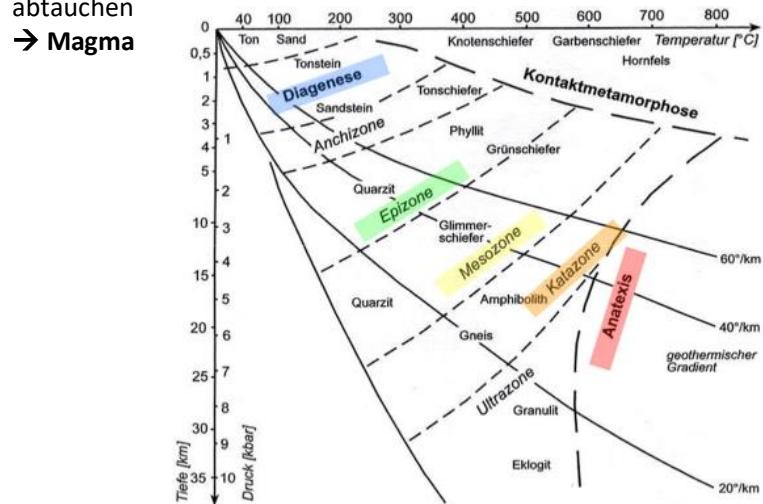
→ **Sediment** (Sand): **Diagenese** (Verfestigen: durch Druck)
→ **Sedimentit** (Sandstein): anheben (wieder von vorn) oder weiter abtauchen: **Metamorphose** (Umwandlung durch Druck und Temperatur)

→ **Metamorphit** (Schiefer): anheben (wieder von vorn) oder weiter abtauchen: **Anatexis** (Aufschmelzen durch Steigen von Druck und Temperatur)

→ **Magma:** Abkühlung

→ **Magmatit:** anheben (wieder von vorn) oder weiter abtauchen

→ **Magma**



- Druck immer einhergehend mit Temperaturzunahme
- ohne gewisse Temperatur kann Druck noch so groß sein
- ab einer gewissen Temperatur ist Druck egal

Einteilung der Gesteine:

Magmatit

- Aufschmelzung von Gestein tief im Erdinneren

- Kristallisation (Erstarrung):

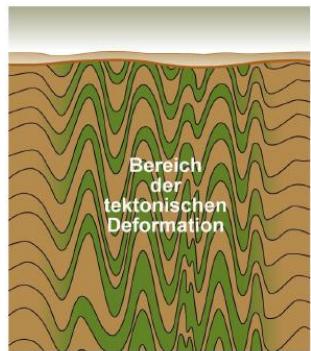
- **Plutonite** (erstarrt langsam unter der EOF: große Kristalle): Granit (saure Lava), Diorit, Gabbro (basische Lava):

Intrusivgestein

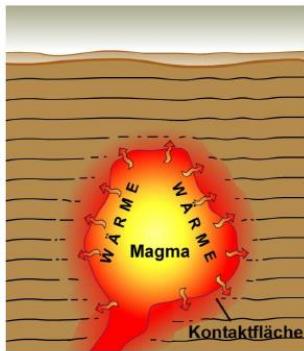
- **Vulkanite** (erstarrt schnell an EOF: homogen, „Verglasung“): Rhyolith (saure Lava), Andesit, Basalt (basische Lava): Effusivgestein

Sedimentite (Paragesteine)

- Verwitterung und Abtragung an EOF
- Ausgangsgesteine: Magmatite, Metamorphe
- Sedimentation, Versenkung, Diagenese
- Ablagerungsgestein
- Klastische Sedimente (zerbrochen; aus Gesteinstrümmern): Sandstein, Breccie
- chemische Sedimente (aus Verwitterung): Kalkstein
- biogenen Sedimente (aus Verwitterung, oft Fossilien): Kohle

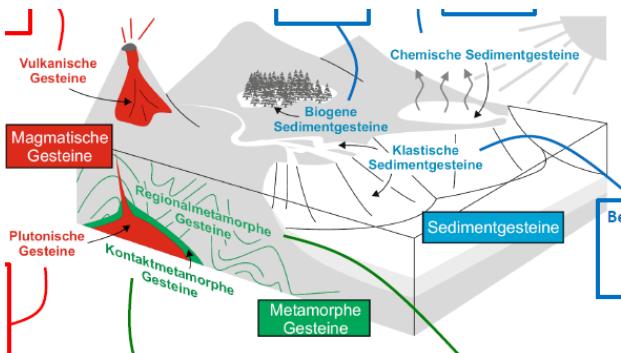
Metamorphit

a) Regionalmetamorphose



b) Kontaktmetamorphose

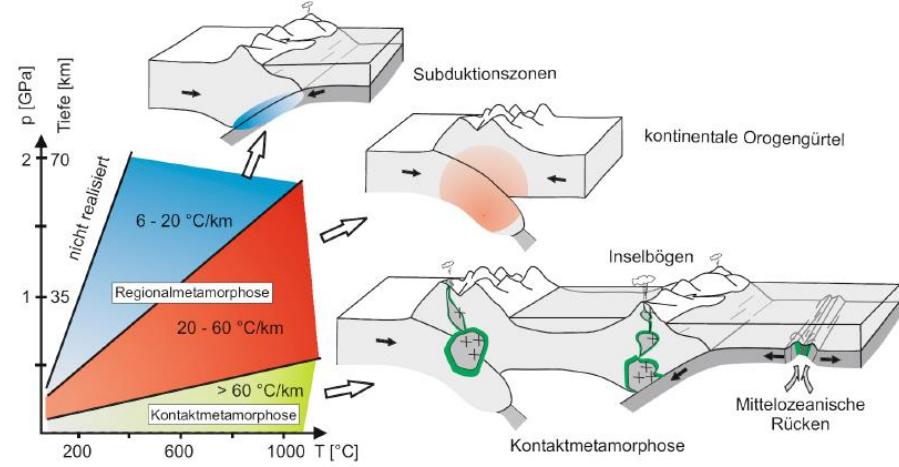
- Umwandlungsgestein
- unter hohen Temperaturen und Drücken in tiefer Kruste und oberem Mantel
- Rekristallisation neuer Minerale in festem Zustand
- Alpenbildung: Urmeer (Sedimente): Plattenkonvergenz: Sedimente -> Metamorphe
- a) Gebiete tief in Kruste, die stark deformiert werden, unterliegen Metamorphose infolge der damit verbunden Temperatur- u. Druckzunahme
- b) Kontaktzonen, die Magmenintrusionen umgeben, unterliegen Metamorphose ausschließlich durch Temperaturzunahme infolge der Intrusion

Gesteinsgruppen:**Arten der Gesteinsmetamorphose:**

- Biogene Sedimentgesteine: z.B.: Kohle, Schillkalk
- Regionalmetamorphe Gesteine: Glimmerschiefer, Gneis
- Vulkanische Gesteine: Obsidian, Basalt, Tuff
- Plutonische Gesteine: Granit, Gabbro, Peridotit
- Chemische Sedimentgesteine: Kalk-Oolith, Sinterkalk
- Klastische Sedimentgesteine: Sandstein, Tonstein, Konglomerat
- Kontaktmetamorphe Gesteine: Marmor, Quarzit

Relative Häufigkeit der wichtigsten Sedimentgesteine:

Sandsteine und Konglomerate (11%)



Prozesse und Formen der exogenen Morphodynamik

- Differenzierung zwischen Relief (evtl. vorzeitliche Genese) und rezenter Morphodynamik
- Exogene <-> endogene Dynamik
- Keine klimazonale Einordnung der endogenen Dynamik (Bsp. Vulkanausbruch in Arktis unbedeutend für Tropen)
- Exogene Dynamik mit Konvergenz zur Klimazonierung

Verwitterung

- unter atmosphärischem Einfluss stattfindende chemische und/oder physikalische Veränderung von Gesteinen und Mineralen
- Bereitstellung zum Transport (Erosion, Denudation), kein Materialtransport
- **Verwitterung** zerkleinert / löst auf
- **Erosion:** Abtragung des Materials das zerkleinert wurde
- **Denudation:** oberflächenhafte Abtragung ohne Transportmittel (Flächenbildung nach genug Abtragung)
- beide Verwitterungsarten: Regolith: loses Lockermaterial, schützt unterliegendes Gestein vor weiterer Verwitterung

Morphologische Wertigkeit eines Gesteins:

Widerstandsfähigkeit eines Gesteins gegen Verwitterung und Abtragung
Faktoren:

Wasserdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Aufbau, Lagerungsverhältnisse, Gesteinsgefüge (Struktur, Textur), Grad der diagenetischen Verfestigung, Klüftung, Bankung

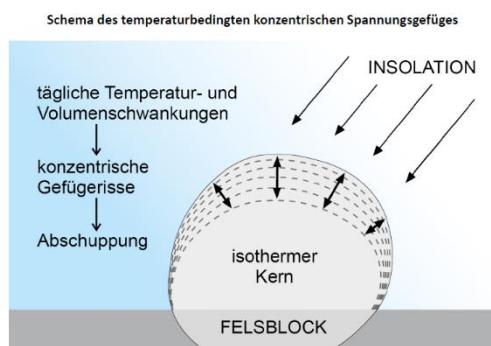
Physikalisch-mechanische Verwitterung:

(zerteilt Gestein (schafft größere OF): zwischen Teilchen Platz für chemische Reaktionen, zerkleinernd, keine chemische Veränderung der Zusammensetzung)

- > Nur an Stellen, die Verwitterungselementen ausgesetzt sind
- > intensiver, wenn extreme Kräfte auftreten

Salzsprengung:

Salze an OF kristallisieren: Druck (sprengen) + Salz quillt mit Wasseraufnahme: Quellungsdruck, Salze dehnen sich bei Wärme stärker aus als Silikate

Temperaturverwitterung/ Insulationsverwitterung:

- Voraussetzung: starke Temperaturschwankungen
- Gesteine haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit: sehr starke Erwärmung an OF
 → große Unterschiede zwischen OF und Innerem:
 → Spannungen nahe der OF: Gefügerisse (Kernsprünge infolge sehr starker und schneller Temperaturwechsel):
 → Risse und Abschälen
 Feinabschuppung (thermische Abschuppung): Desquamation

Kluftbildung durch Entlastung:

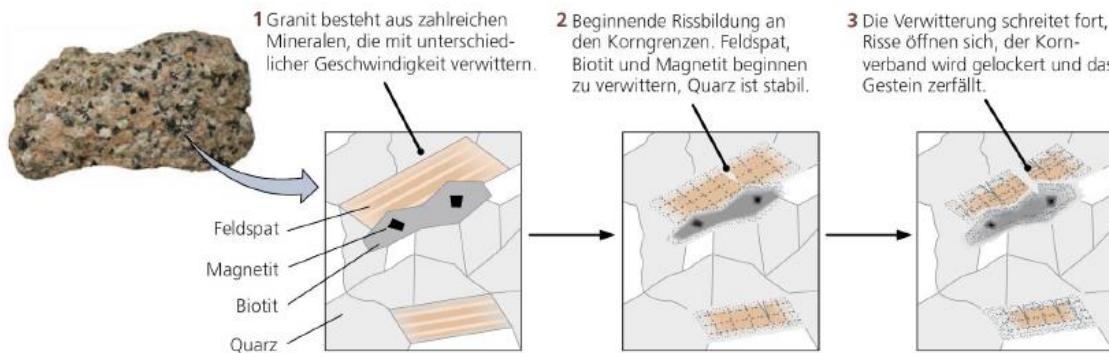
- Grobabschuppung (durch Druckentlastung): Exfoliation
- Druck und Temperatur anders an EOF als im Erdinneren bei Magmatiten (Druckentlastung bei emporgestiegenen Tiefengesteinen)

Sedimentäre Fazies	Komgröße klastischer Sedimente/ Beispiele	Typische Eigenschaften
Fluss fluviatil	Steine → Kies → Sand Flussschotter	gut sortiert Schrägschichtung
Gletscher glazigen	Blöcke bis Ton Geschiebemergel Geschiebelhm mit Findlingen	unsortiert keine Schichtung
Schmelzwasser glazifluviatil	Kies, Sand	gut sortiert Schrägschichtung
Schmelzwasser marin	Kies Sand Schluff Ton Küste ↓ tiefermarin Transgressions-konglomerat Sandsteine, Tiefseeton Chemische Sedimente	gradiente Schichtung Meeresfossilien küstennah: Schrägschichtung Wellenrippeln
Meer (Kontinentalhang) äolisch	Grauwacke-Tonschiefer-Wechsellaagerung	schlecht sortiert
Wind	Feinsand, Schluff Löss	sehr gut sortiert Schrägschichtung
Seen limnisch	Feinsand, Schluff, Ton Biogene Sedimente Sapropel Torf	organogene Beimengungen

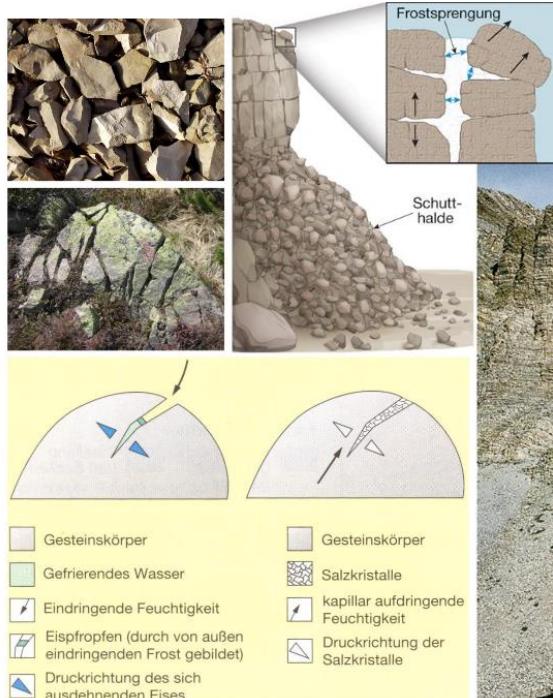
Biologisch-mechanische Verwitterung: Wurzelsprengung

- schafft keine Hohlräume, sie erweitert vorhandene
- Wurzeln geben Säuren ab: Nährstoffe werden durch Organismen herausgezogen

Zergrusung/körniger Zerfall:



Kryoklastik/ Frost sprengung:



- Wasser im Stein: abkühlen und gefrieren
- ausdehnen um 9 % beim Gefrieren
- Vergrößern von Rissen durch Sprengwirkung
- Durch Frostwechsel gefördert
- > Gesteinsschutt

Druckwirkung physikalischer Verwitterungsprozesse (durchschnittliche Belastungsfähigkeit von Gesteinen ca. 25 MPa):

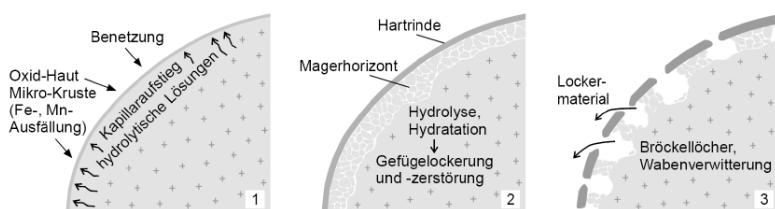
Verwitterungsprozess	Maximale Druckwirkung [MPa]
Insolationsverwitterung	50
Frostsprennung	200
Salzsprengung	30
Pflanzenwurzeln	1,5

Wollsackverwitterung:

- Steinsquader aufeinander
- Risse werden größer durch chemische Verwitterung: mehr Feuchtigkeit wird gespeichert
- Bodenmaterial kommt nach
- chemische Verwitterung wirkt weiter nach außen (zusätzlich physikalische Verwitterung)

Wabenverwitterung:

Schema der Bildung von Bröckellochern über die Anlage einer Hartrinde mit subutanem Magerhorizont



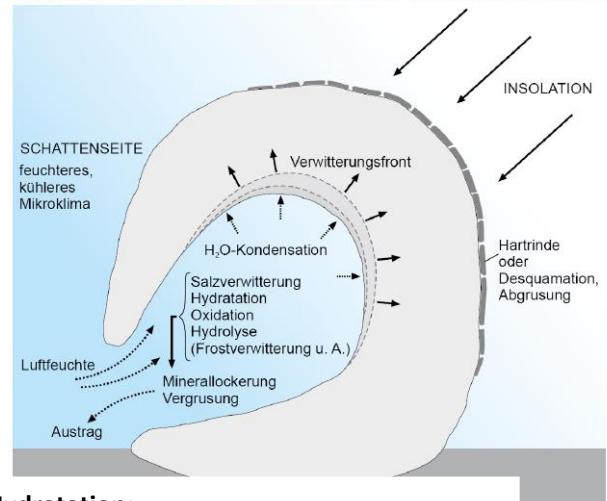
- Magerhorizont: Verdunstung und Anlagern der Minerale (wie Schutzmantel)
- Bröckellocher: Verwitterung kann nach innen greifen

Durchfeuchtung → hydrolytische Verwitterung → Verdunstung und Kapillaraufstieg mit Fe-Ionen u. a. → Ausfällung als Hartrinde. Der darunter liegende Mineralbereich wird gelockert und kann aus Löchern herausrieseln

Tafonierung:

- Hohlraumverwitterung
- Aushöhlung
- Tafonie: Vielzahl an Bröckellochern
- Ansammeln von Feuchtigkeit

Schematische Darstellung der Entwicklung eines ausgehöhlten Gesteinsblocks

**Chemische Verwitterung:** (Materialändernd)

- Biologisch-chemische Verwitterung
- Oxidation
- Lösungsverwitterung
- Lösungsverwitterung z.B. Karst
- Hydrolyse/ Hydratation
- Chelatation

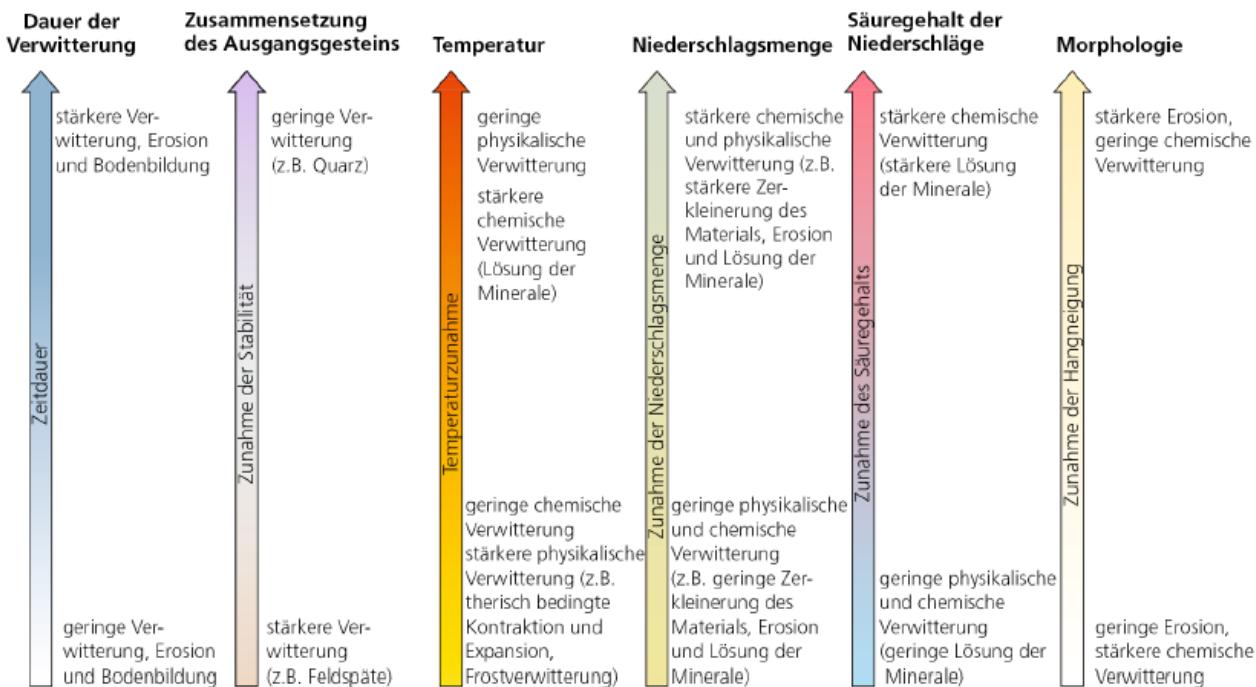
Abhängig von: pH- Wert, Temperatur, Feuchtigkeit, Gesteinszusammensetzung

Hydratation:

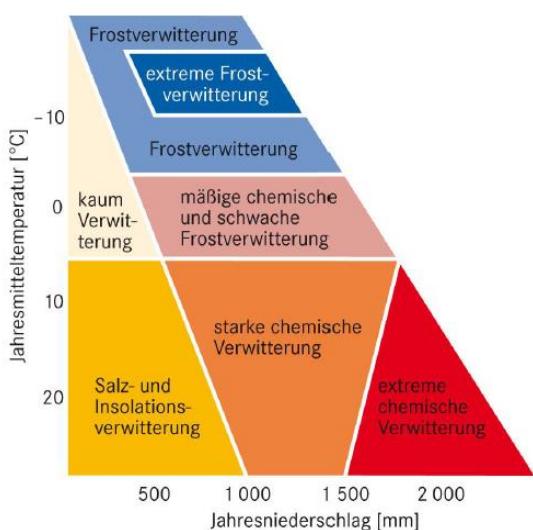
Kationen ziehen H_2O Dipole an: Bilden einer Wasserhülle: Volumen steigt: Drucksprengung

Hydrolyse:

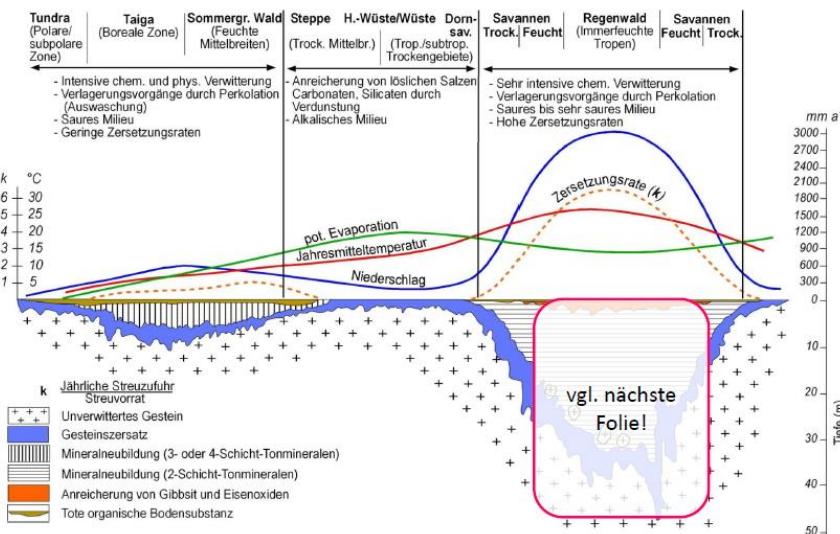
Auflösen des Kristallgitters (Carbonate und Silikate werden ersetzt): Destabilisierung: Verbinden mit Gestein

Faktoren der Verwitterung:

Abhängigkeit der vorherrschenden Verwitterungsprozesse vom Klima



Verwitterungstiefe in Abhängigkeit von Klima und Vegetation



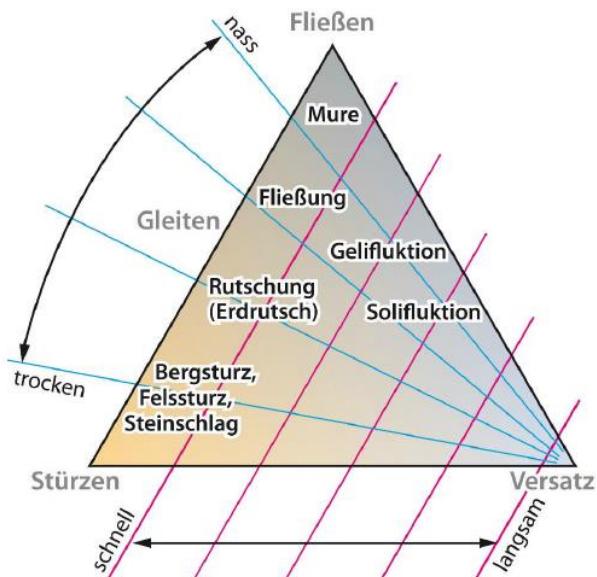
- Wasser: Lösungsmittel
- hohe Temperatur beschleunigt chemische Prozesse

Gravitative Massenbewegungen

Schwerkraftwirkung am Hang:

- Hangabtriebskraft (Schubkraft) wird durch Hangneigung (und natürlich m) beeinflusst
- In Natur ist Hangneigung i.d.R. statisch
- Veränderungen werden durch andere Prozesse, wie bspw. Hangunterschneidung erzeugt

Typisierung von gravitativen Massenbewegungen:

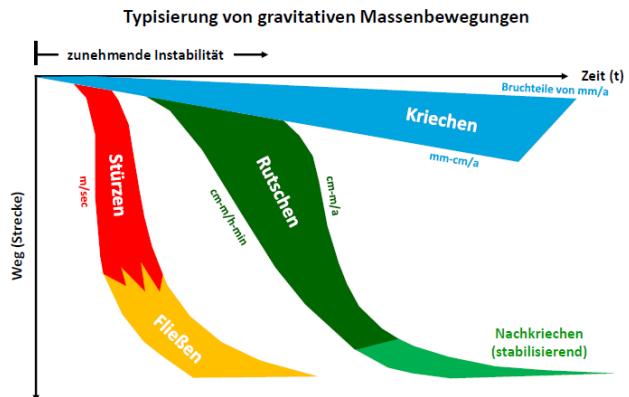


- Stürzen: trocken und schnell: Material zerfällt
- Gleiten: mittelnass und mittelschnell: Zusammenhalt
- Fließen: nass und schnell: Material zerfällt
- Versatz: langsam

Auslösende Faktoren von gravitativen Massenbewegungen:

- Durchfeuchtung
- Frostwechsel (nur bis in geringe Tiefen wirksam)
- Wasserdruck
- Austauschen von Permafrost
- Fluviale Unterschneidung und Versteilung eines Hanges
- Erdbeben
- Wurzeldruck
- Bodentierarbeit

Typisierung von gravitativen Massenbewegungen



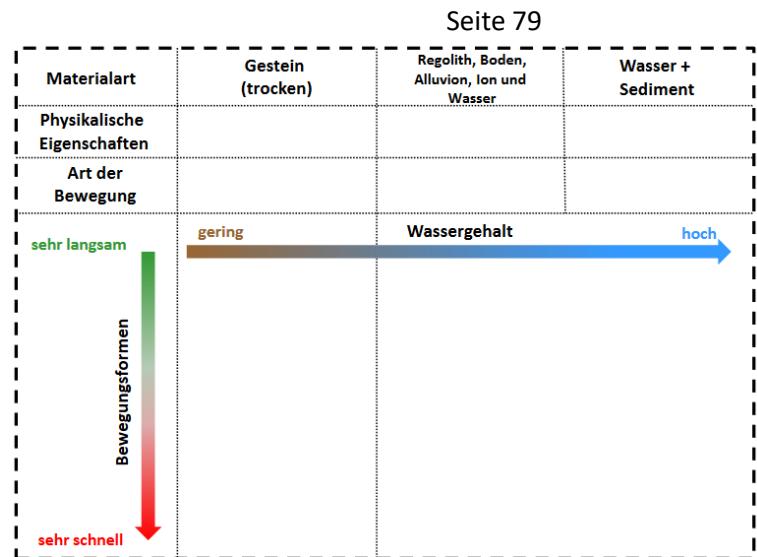
Sturzbewegungen

Differenzierung in:

- Stein- und Blockschlag (saisonales Auftreten)
- Felssturz (saisonales Auftreten)
- -> beide hohe Frostwechseldynamik
- Bergsturz

Entscheidend sind:

- Komponentendurchmesser
- Kubatur der bewegten Masse
- Ablagerungsfläche

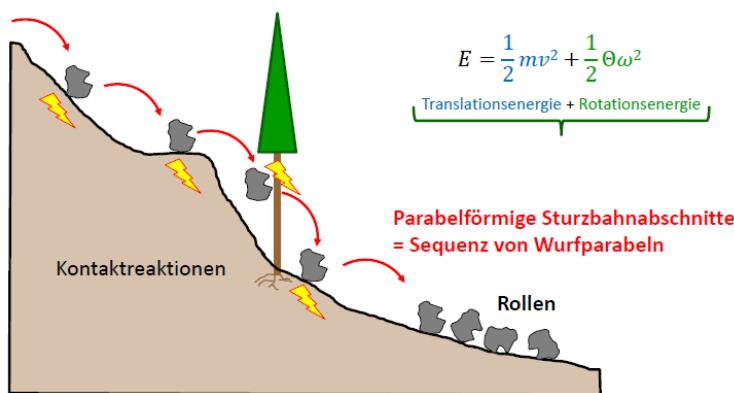


Klassifikation nach Abele:

	Druchmesser	Größe der bewegten Masse	Ablagerungsfläche
Steinschlag	< 1m	< 1 Mio m ³	< 10 ha
Felssturz	> 1m	< 1 Mio m ³	< 10 ha
Bergsturz	> 1m	> 1 Mio m ³	> 10 ha

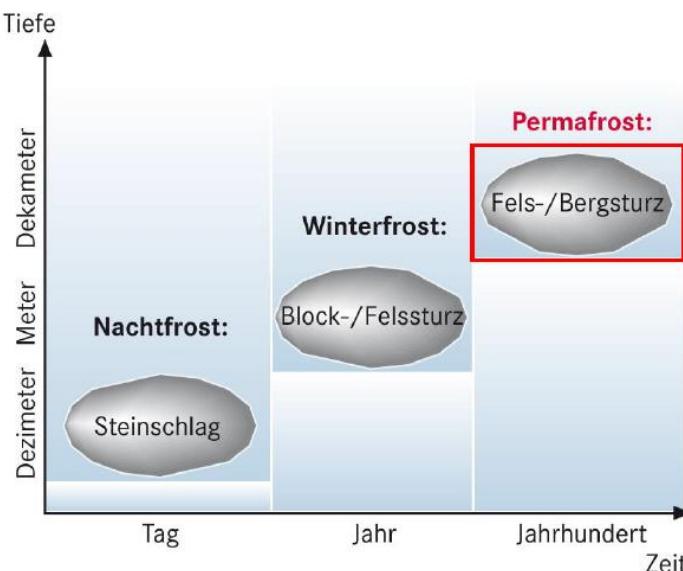
Sturzprozesse:

Verlust von kinetischer Energie bei Aufprall:



Sturzbewegungen: Fels-/Bergstürze

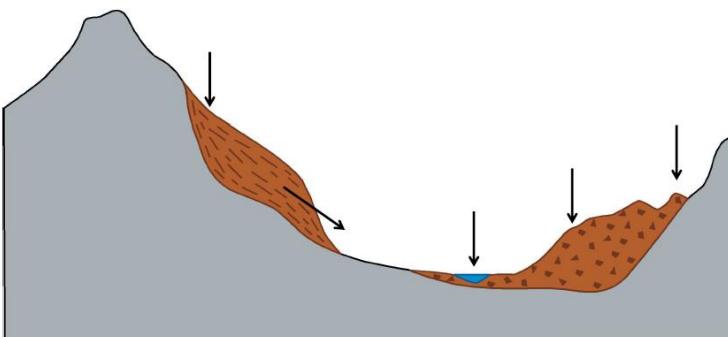
- Durch Verteilung der kinetischen Energie auf Splitter
- Durch plastische Deformation der Aufschlagfläche (Boden bspw.)
- Auslöser: abhängig von Gestein und Lagerung, Klima und Witterung, Wassersättigung des Gesteins, Auftauen von Permafrost, Erdbeben, Unterschneidung des Hangs (durch Flusserosion oder Straßenbau)



- steile Hänge als Voraussetzung
- Schutt: Sortierung nach Größe (große Blöcke: weiter Transportweg)

Schema eines Bergsturzes: am Beispiel Bergsturz Grainau:

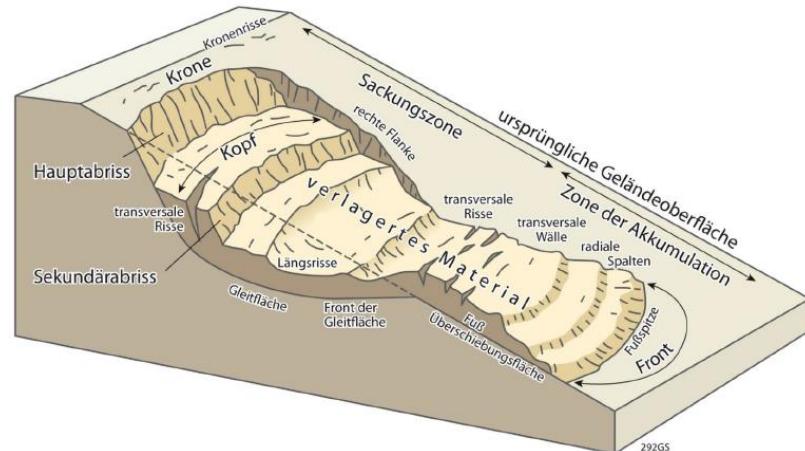
Abrissnische Sturzbahn See Tomalandschaft Brandungswälle

**Tomalandschaft:**

- Chaotisch-regellos abgelagerte Bergsturzmassen
- unregelmäßige Oberfläche
- Häufig mit großen Gesteinsblöcken durchsetzt
- Teilweise nachträglich fluvial oder glazial überformt
- bilden von Luftpolstern unter Steinen: Reibungsreduktion: weitere Strecke (Luft kann besonders im Tal nicht so schnell entweichen)

Sturzbewegungen: Rutschprozesse

Sackungs- und Akkumulationszonen einer gleitend-rutschenden Massenbewegung

**Blaiken:**

- Anriss: Entblößung des Untergrunds
- Landschaftsschädigend
- Zunahme auf nicht mehr beweideten Flächen der Alpen (Extensivierung)
- Langhalmige Gräser wachsen
- Gras friert im Schnee ein
- Tauen: Rutschung: Gräser mit Wurzeln rutschen mit
- wasserdurchsetzter Boden: Blaike wird größer

Gleitung:

- Auf vorgeformten Gleitflächen
- Weitgehende Erhaltung des Ursprünglichen Gesteinsgefüges

Rutschung:

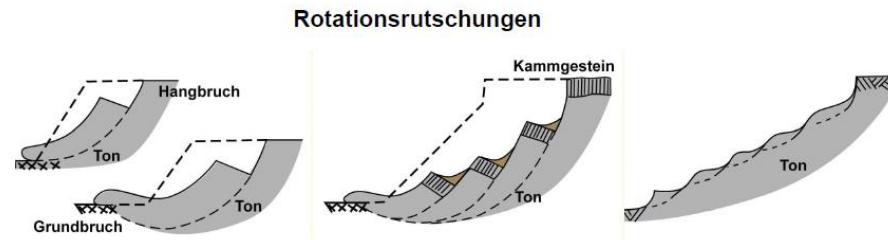
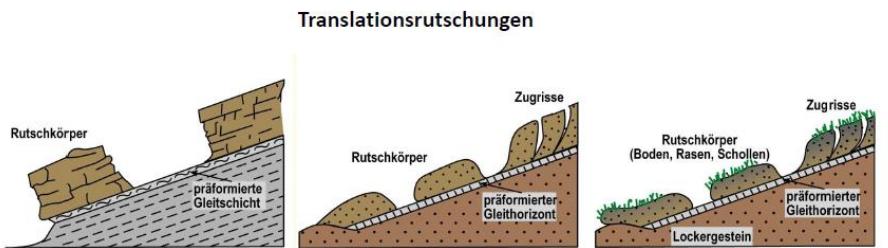
- Meist an keine vorgeformte Fläche gebunden
- Plastische Deformation der Gesteinsmasse

Ursache: Feuchtigkeit (Material wird instabiler): Wasser kann bald nicht mehr abfließen (Porenvolumen) und Material wird immer schwerer

Bergrutsch:

- Erd-/ Kalk- oder Gesteinsschicht rutscht auf wasserundurchlässiger Tonschicht (als Voraussetzung) den Hang hinab
- Große Wassereinwirkung: Tonschicht wird instabil (auch durch Zunahme der Vegetation: mehr Gewicht)
- Gleiten als Einheit (ganze Schicht)

•



Translationsrutschungen: (geradlinig)

auf Gleitfläche mit

Rutschmassendurchmischung

- Wasseransammlung: Ton wird aufgeweicht (Schmierschicht)
- 1: Blockrutschung im Festgestein
- 2: Schollenrutschung im Lockergestein

Rotationsrutschungen: (Drehung)

Rutschbewegung mit hangparalleler Rotation gegen den Hang, Hangabtriebskraft abhängig von Masse und Steigung

- 1: einfach, 2: multipel, 3: sukzessiv
- oft in Schichtstufenlandschaften: weiche, verformbare Schicht unter fester Schicht

Sturzbewegungen: Fließprozesse

Muren:

- Schnell fließendes Gemisch aus Wasser und Feststoffen (Feststoffanteil 30 -60%)

- Voraussetzungen:

- Umfangreiche Schuttakkumulation (großporig)
- Hoher Feinmaterialanteil (feinporiger Boden)
- Stoßweise Zufuhr von Starkregen- oder Schmelzwasser: Reibung minimiert: hohe Viskosität
- Großes Gefälle
- Ablauf: feinporige Böden füllen sich mit Wasser (positiver Porenwasserdruck)
- Murkegel (Ablagerungsgebiet, unsortiert und leicht geschichtet, heterogen), Murbahn/-kanal (Transportbahn), Entstehungsgebiet verzweigt
- Rand: Wasseraustritt: Reibung steigt und Viskosität sinkt: langsamer: fester und dickflüssiger (Murendämme)

Spektrum potentiellen Murrmaterials nach Korngrößen und deren Verteilungsverhältnissen

(A und B entsprechen den Grenzbedingungen)

mittlere Korngröße



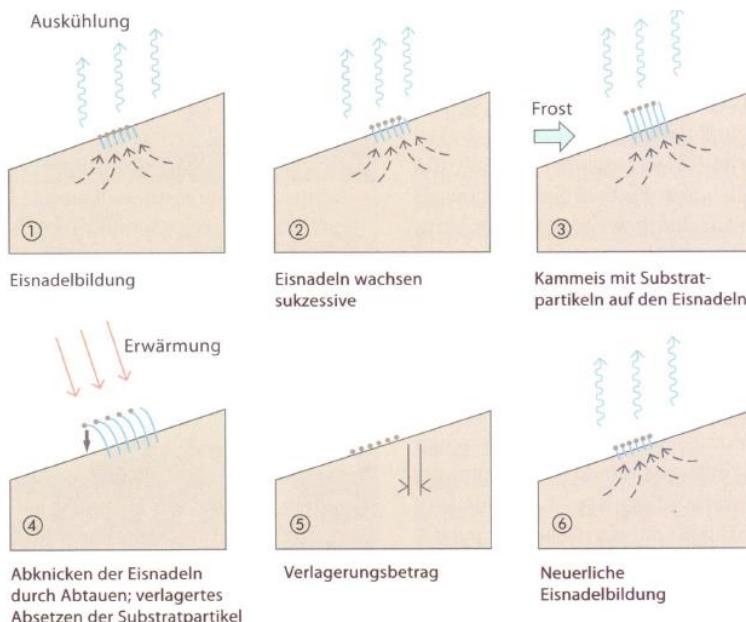
- sortiert: keine Muren möglich: zu geringe Durchlässigkeit: homogenes Material: Poren zu klein (negativer Porenwasserdruck)

- heterogenes Material: positiver Porenwasserdruck (zu viel Wasser: Aneinanderdrücken der Teile)

Kriechprozesse:



- Bodenkriechen: (schleichend): Hangdenudation (Flächenbildung)
- Bodenfließen (Solifluktion) Frosteinfluss und schnelle Bewegung, feuchtgetränkt: Boden sinkt terrassenförmig ab, feines Material
- Schuttströme: groberes Material
- Einfluss: Bodenart, Vegetationsdichte, Klima, Hangneigung



- 1: Porenräume: Wasser wird festgehalten (Boden nicht permanent gefroren: Wasser im Boden flüssig, OF kalt, gefrieren sobald an OF)
- 3: Eisnadel wächst senkrecht heraus (Kammeis): Feinmaterial (z.B. Sandkorn) wird mit geliftet
- 4: Abschmelzen: Korn fällt hangabwärts
- 5: Kriechbewegung
→ steiler Hang wird nach und nach flacher/ Hang kann z.B. unterschnitten werden → Bodenkriechen
- schiefer Boden (trotzdem senkrecht Wachsen): gehobenes wird kleines Stückchen transportiert

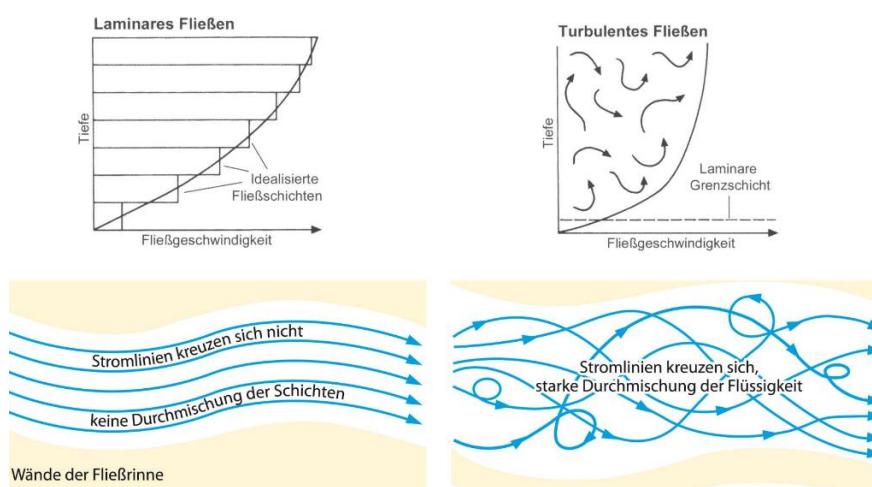
	Geschwindigkeit	Substratdurchmischung	Hangneigung	Wasseranteil	Gleitschicht notwendig	Bsp.
Stürzende MSB	Hoch	Sehr stark	Senkrecht - überhängend	Gering	Nein	Bergsturz Felssturz
Gleitende MSB	Mittel-hoch	Gering	Mittel – steil	Gering – hoch (Gleitschicht)	Ja	Schollengleiten Schlipf
Rutschende MSB	Mittel-hoch	Stark	Mittel- steil	Hoch	Nein	Bergrutsch, Erdrutsch
Fließende MSB	Hoch	Sehr stark	Mittel – steil	Extrem hoch	Nein	Mure, Schlammstrom
Kriechende MSB	Gering	Gering	Flach geneigt	Gering - hoch	Nein nein ja	Bodenkriechen Solifluktion Gelisolifluktion

Fluviale Morphodynamik:

Fluvialer Formungskreis:

- linear- konvergierender OF- Abfluss (in Tiefenlinien des Reliefs konzentriert): Talausbildung
- Flächenpülzung (OF- Abfluss in Schichtfluten)
- Erosion, Sedimentation und Transport in Flusssystemen

Laminarer und turbulenter Fluss:



Laminares Fließen:

- Wasser bewegt sich in idealisierten Fließschichten
- Minimale Reibung an Gewässersohle
- stromlinienparallel, keine Durchmischung
- in natürlichen Flüssen örtlich und zeitlich begrenzt

Turbulentes Fließen:

- laminares Fließen geht durch Beschleunigung in turbulentes über
- Mischbewegungen überlagern die allgemeine Fließrichtung: starke Durchmischung: erosive Wirksamkeit durch Ablösen und Transportieren von Feststoffen
- „Stromliniensalat“: schnell, unsystematisch

Typen des turbulenten Fließens:**-Strömen**

Fließgeschwindigkeit des Wassers geringer als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen

-Schießen

Fließgeschwindigkeit des Wassers größer als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen (häufig mit Turbulenz verbunden): Dynamik und Materialumlagerung

-Fallen

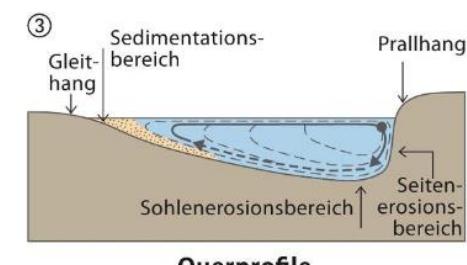
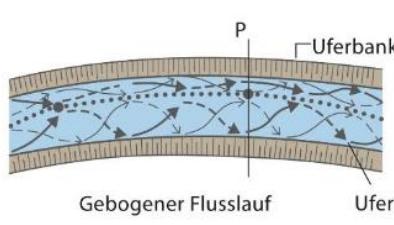
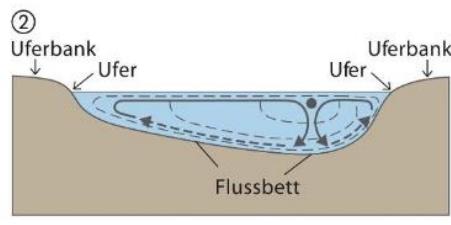
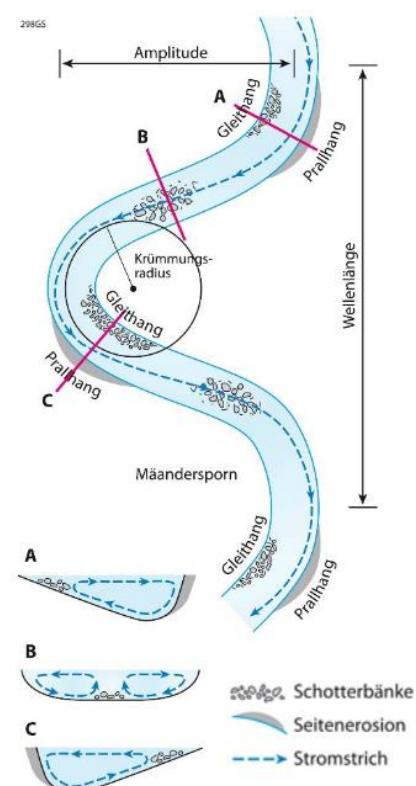
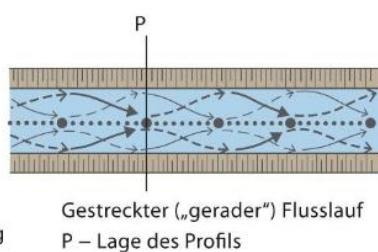
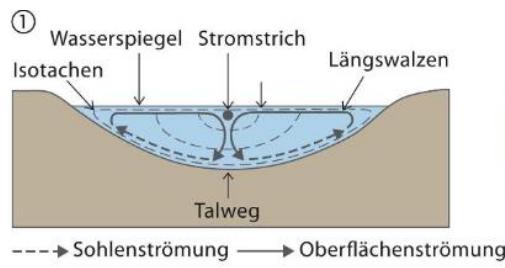
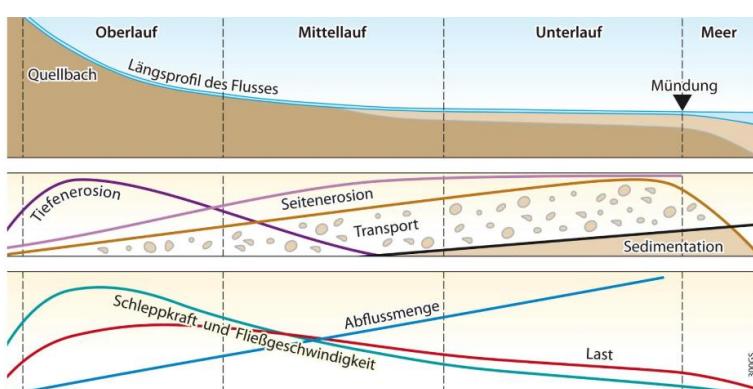
z.B. Wassefall

- Talweg: tiefster Punkt

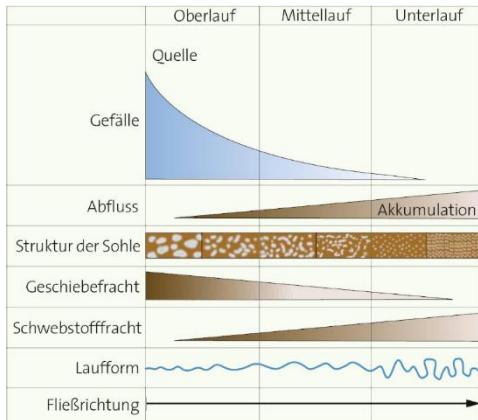
- **Prallhang:** größte Erosivität, viele Turbulenzen: unterspülen und abbrechen der **Uferbank**

- **Gleithang:** Sedimentation und Ablagerung

→ Kräfte verteilen sich unterschiedlich im Fluss

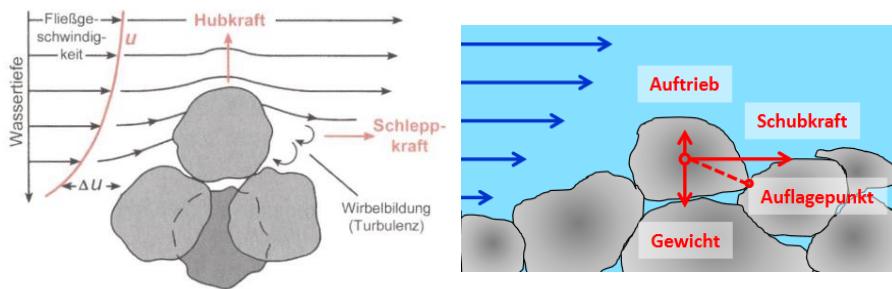
Turbulentes Fließen in verschiedenen Flussabschnitten:**Fluvialer Transport:****Erosionskompetenz eines Flusses:**

- Belastungsverhältnis $BV = L/S$ (L : Last/Fracht, S : Schleppkraft) < 1 : Abtrag, > 1 : Akkumulation
- nimmt vom Ober- zum Unterlauf zu: je weiter zum Meer (Erosionsbasis), desto mehr Ablagerung:
 - Oberlauf: hohe Reliefenergie da viel Wasser auf wenig Fläche (schnell)
 - Seitenerosion: Fluss wird immer breiter (bis hin zu Delats): wenig Waser auf großer Fläche (langsamer)



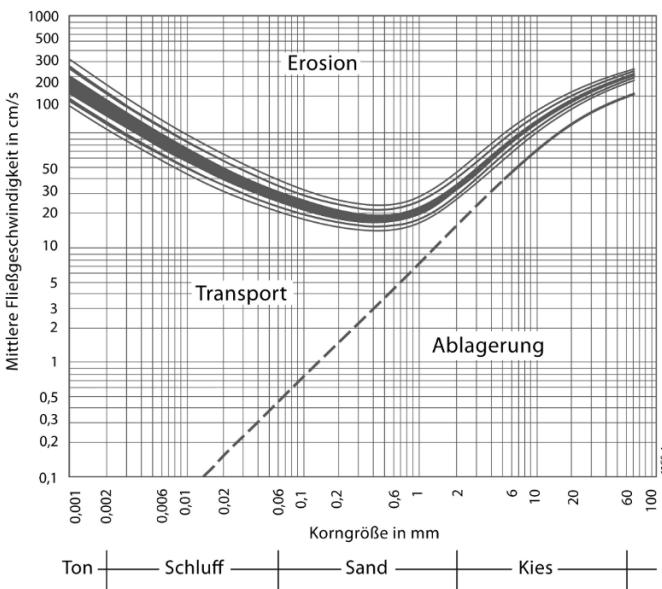
- **Schwebstofffracht:** Feststoffe, die schwebend transportiert werden (bis zu Kies)

Ablösung eines Partikels von der Gewässersohle:



- Erosive Wirkung umso größer, je turbulenter und unregelmäßiger der Abfluss
- abhängig von Verkeilung (Einbinden in Sohle), Partikelgröße (Gewicht), ausreichend Schlepp-/ Schubspannung
- Verhältnis entscheidend: Erosion, Sedimentation, Transport

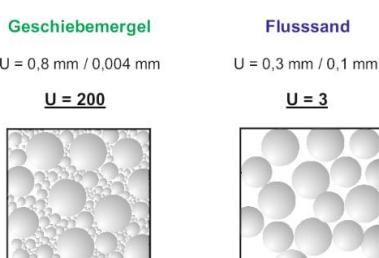
Hjulström Diagramm:



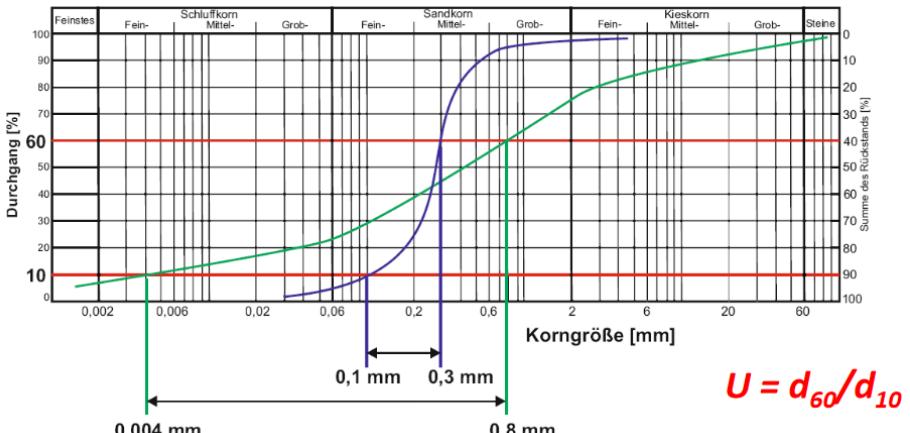
- Beziehung zwischen Korngröße und Fließgeschwindigkeiten für Erosion, Transport und Ablagerung
- **Kohäsion:** Atomare Bindungskraft, wirkt zwischen gleichen Partikeln, je kleiner Teile desto stärker
- oberhalb der Kurve: Erosion (hohe Geschwindigkeiten)
- links: mittlere Geschwindigkeit: Transport
- rechts: Ablagerung
- Bogen der Erosionskurve: Feine Korngrößen: hohe Geschwindigkeit nötig aufgrund der Kohäsionskräfte
- Große Korngrößen; höheres Gewicht: erhöhte Geschwindigkeit nötig
- kritische Fließgeschwindigkeit: Erosion setzt gerade ein
- verschiedene Linien der Erosionskurve: Materiallagerung: locker oder stark verpresst und Form: rund oder eckig
- keine Ablagerung für sehr kleine Teilchen: zu fein und leicht: erst Ablagerung bei stehendem Gewässer (Fluss kann nie stehen)
- Bsp.: 0,2 mm (Sand): ca. 20 cm/s: Erosion, < 1,5 cm/s: Ablagerung

Ablagerung, dazwischen Transport

Summenkurve von Korngrößen:



- **homogene Fracht:** baustatisch bessere Tragweite (durch Korngrößensorтировung)
- **heterogene Fracht:**



Abtragswerte in verschiedenen Klimabereichen:

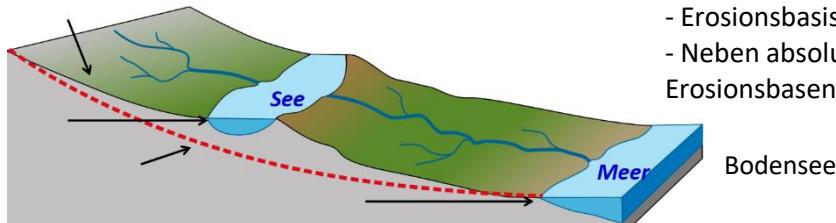
Klimabereich	Abtrag/ka in [mm]	Prozentanteil		
		gelöst	suspendiert	Sand/Geröll
Flachland Gebirge	Höhere bis subpolare Breiten	5 – 30	80 – 95	5 – 20
		300 – 800	5 – 50	5 – 50
Flachland und mäßiges Gebirge mit viel Ackerkultur	Humide Mittelbreiten	10 – 40	75 – 95	5 – 15
		40 – 100	40 – 60	30 – 50
Hochgebirge		200 – 700	10 – 45	40 – 70
		10 – 60	10 – 35	40 – 90
Geringes bis mäßiges Relief Gebirgsland	kont. niedere Mittelbreiten	100 – 500	5 – 20	65 – 95
		200 – 400	?	?
Wechselfeuchte Randtropen	feuchte innere Tropen	10 – 30	ca. 70	ca. 30
		ca. 100	ca. 30	ca. 45
Geringes bis mäßiges Relief Hochgebirge		ca. 20		

- **Lösungsfracht:** chemisch gelöstes
- **Suspensionsfracht:** Feststoffe, die mit Wasser in Gleichgewicht stehen oder durch Turbulenzen in Schwebefestigkeit gehalten werden
- **Geröll/ Flussgeschiebe:** Feststoffe, die an der Gewässersohle transportiert werden (rollen, schieben)
- **Tropen:** chemische Verwitterung: viel Lösungsfracht
- **Humide Mittelbreiten:** Vergletscherung: sehr viel grobes Material

Natürliche lokale oder regionale Erosionsbasen:

An die lokale Erosionsbase angepasste Gefällskurve

Ideale
Erosionsbasis:
Alpenrhein:



Theoretische
Gefällskurve bei ausgelaufenem See
(Ausrichtung des Flusses auf
Meeresspiegel als Erosionsbasis)

- Erosion eines Flusses kann nicht tiefer gehen als die Höhenlage seiner Mündung
- Erosionsbasis als Moor für Erosionskraft
- Neben absoluter Erosionsbasis können lokale Erosionsbasen zwischengeschaltet sein

Absolute Erosionbasis (Niveau, das ein Fließgewässer anstrebt, Rhein: Nordsee)

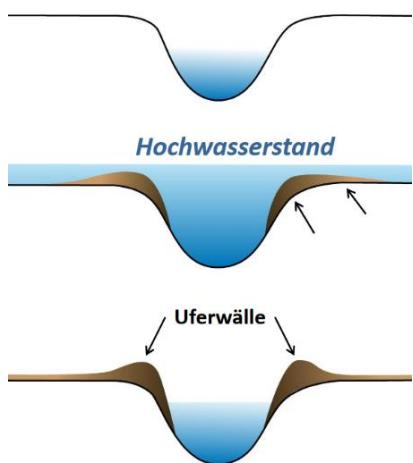
Tiefenerosion im Oberlauf eines Flusses gering? Nein, da

Fluss frisst sich ein (Klamm): je weiter Fluss fließt: Seitenerosion über V-Tal zum ausgeweiteten V

1. Vor dem Hochwasser
2. Während des Hochwassers: Ablagerung feinkörniger und grobkörniger Sedimente

Physische Geographie I

Entstehung natürlicher Uferwälle

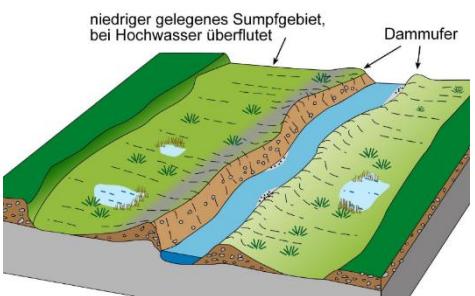


3. Nach vielen Hochwassern:

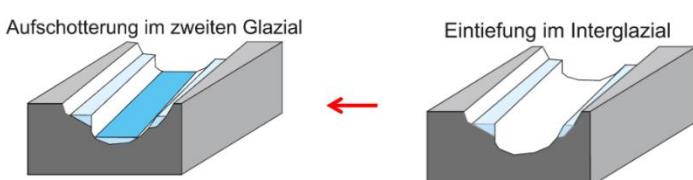
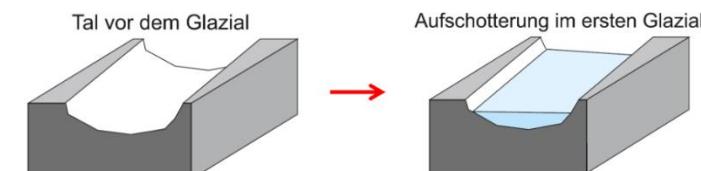
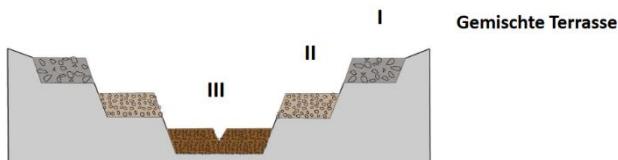
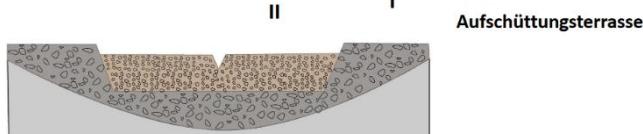
Dammuferfluss: mehr Wasser als normal:
Schutz (andere Flüsse können teilweise
nicht einmünden: Dämme als
Relieferhöhung im Weg, Bsp. Donau
-> verschleppte Flussmündungen: fließen
erst nebenher)

Seite 86

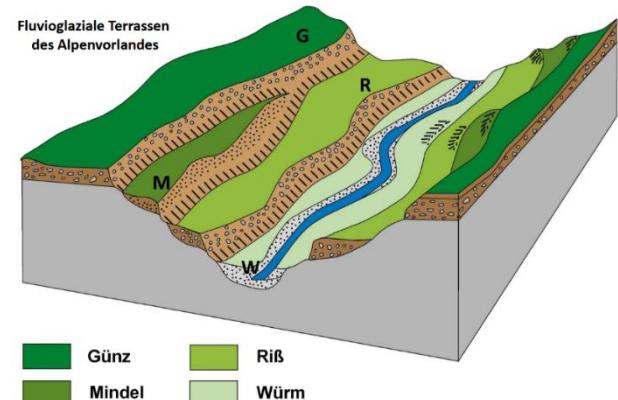
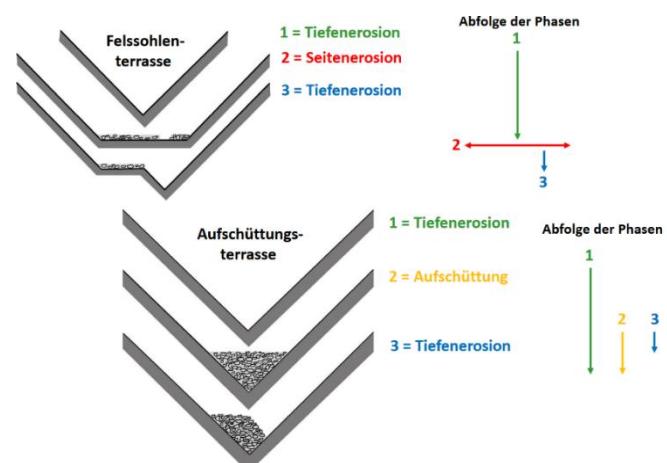
Dammuferfluss



Flusslängsverlauf: Bsp. Victoria Falls: Zerklüftetes Gestein (Kluftnetz): Fluss muss diesem Netz folgen



1. Die älteste Talsohle (I) wurde durch Tiefenerosionen außer Aktion gesetzt und bildet nun eine Felsterrasse
2. Der älteste Aufschüttungskörper (I) wurde durch Tiefenerosion zur Schotterterrasse. Im jüngeren Schlental wurde ein jüngerer Schotterkörper akkumuliert.
3. Durch Tiefenerosion wurden erst der ältere Schotterkörper (I) und der Sockel zerschnitten. Nach Aufschüttung des mittleren Schotterkörpers (II) wurde auch dieser und dessen Sockel zerschnitten. Im jüngsten Schlental liegt der jüngste Schotterkörper (III).



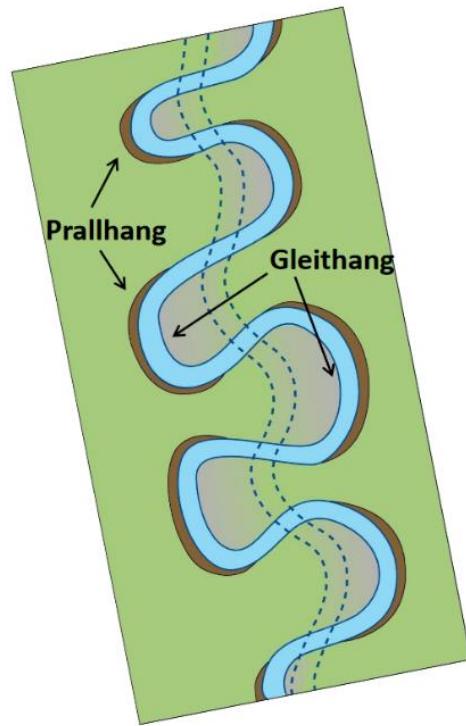
Aufschotterung durch Sedimente

- Eintiefung: Tiefenerosion: Erwärmung: Fließwasser: 1. Stufe bildet sich
- insgesamt 6 Glaziale
- Normal: je tiefer, desto älter
- Hier: Durch Einschneiden des Flusses (Abtragen):
- > Eiszeit: Ablagerung
- > Einschneiden usw.

- ! Blickrichtung festlegen

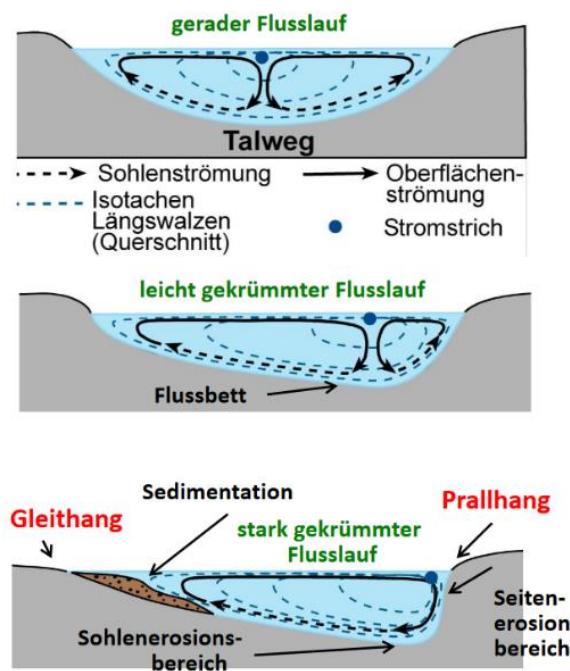
Physische Geographie I

- zwischen Mäander: irgendwann
- Bereich des Durchbruchs
- **Prallhang:** Seitenerosion
- **Prallufer:** Geschwindigkeit hoch: ausgraben: Erosion: steiler
- **Gleithang:** Sedimentation/ Akkumulation: Sandbank
- **Gleitufer:** Geschwindigkeit niedrig an OF: Ablagerung: flach
- Fluss mäandriert: Mäander werden größer
- Ausbilden eines Profils: Zentrifugalkraft/ Trägheit
- **Kiesbanken:** Fluss wird breiter (Seitenerosion): Geschwindigkeit sinkt: mehr Ablagerung
- Wechsel von Erosion und Ablagerung
- Flussbegradigung: Hochwassergefahr und höhere Fließgeschwindigkeit
- Stromstrich: gibt Fließgeschwindigkeit an
- kurz vor Kurve: Bereich der stärksten Strömung

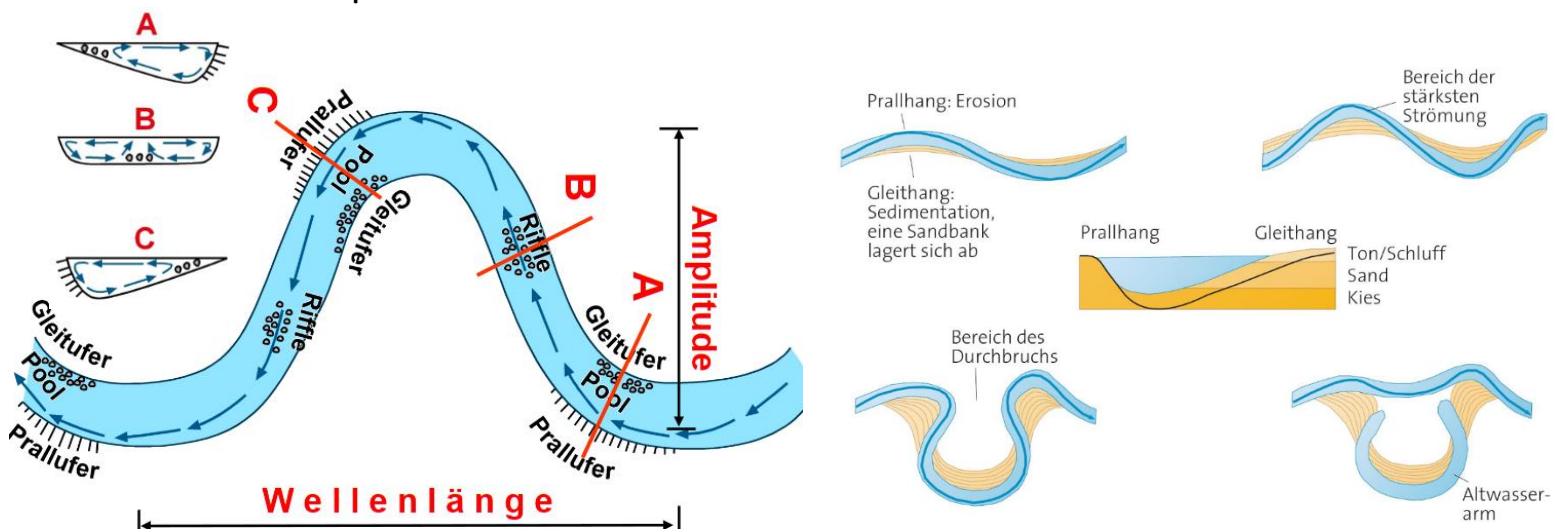


Seite 87

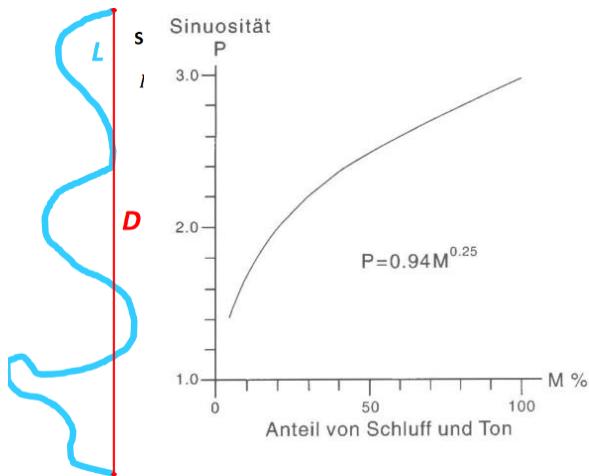
Stromstrich: Verbindungsline der Punkte höchster Oberflächengeschwindigkeit



Grundriss und Gerinnequerschnitt eines mäandrierenden Gewässers



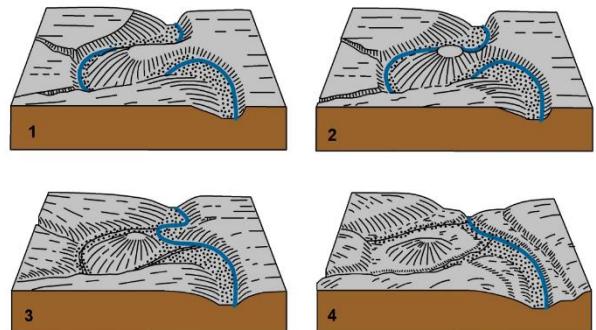
Beziehung zwischen der Sinuosität und dem Anteil von Schluff und Ton im Material des Flussbetts



- **Sinuosität:** Häufung der Mäander pro Streckeneinheit $p = L/p$
- Material hat großen Einfluss auf Mäanderbildung
- $p > 1,5$: kaum Kohäsion: Breitenerosion statt Mäanderbildung
- hohe Sinuosität: Kohäsive und standfeste Uferänder: Seitenerosion erfolgt nur in ufernahen Stromstrichbereichen

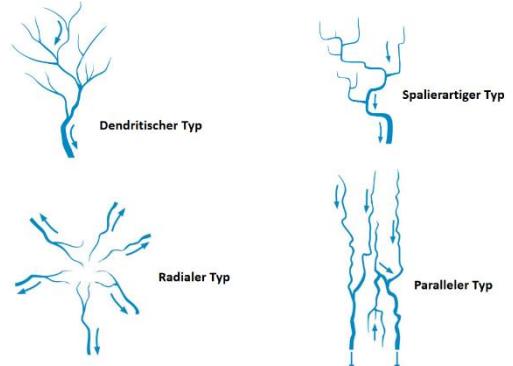
Entstehung eines Umlaufbergs:

- zwei Mäander fressen sich ein: Umlaufberg
- zwei Prallhänge: durch Erosion annähern (inselartig)
- Durchbruch: nahezu geradliniger Fluss
- Trockentalbildung



Flussnetztypen:

- Vogelperspektive
- Dendritisch: Hauptvorfluter, z.B. in Mittelgebirgen, baumartig
- spalierartig: v.a. bei Schwächezonen: tektonisch Flussrichtung vorgegeben
- Radial: z.B. Vulkan: Abfließen an Hängen, auch umgedreht (nach innen): Beckenstruktur
- Parallel: Alpenvorland (Mindel, Lech, ...)



Tal

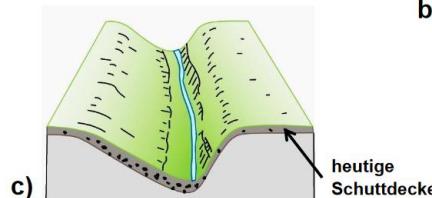
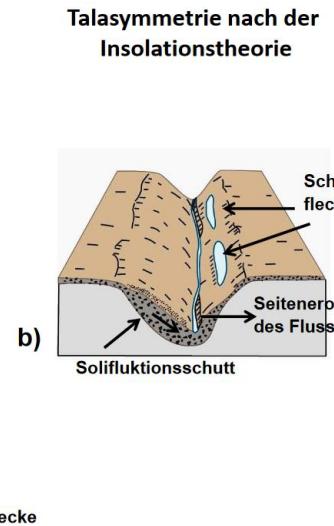
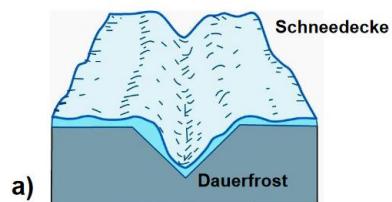
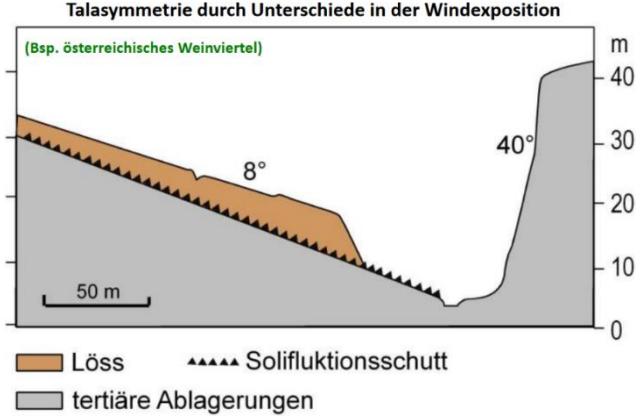
- als eine langestreckte, nach einer Seite hin offene Hohlform gleichsinnigen Gefälles
- vom Fluss geschaffen und durchflossen (außer Trockental)
- Talbildung: Hangabtragung und fluviale Linearerosion (Steilheit und Breite- Tiefe- Verhältnis)
- abhängig von: Vegetation, Transportmaterial, Gefälle, Art und Stärke der Wasserführung, Klima, Tektonik, Gestein
- glaziale oder fluviale Entstehung
- Elemente: Talhänge, Flussbett, Talboden

Sind Hängetäler Kerbtäler? Nein, da

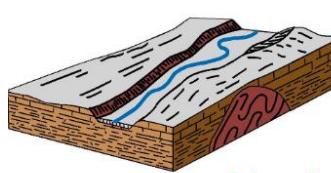
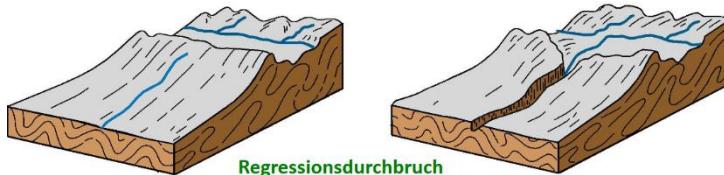
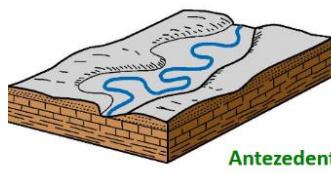
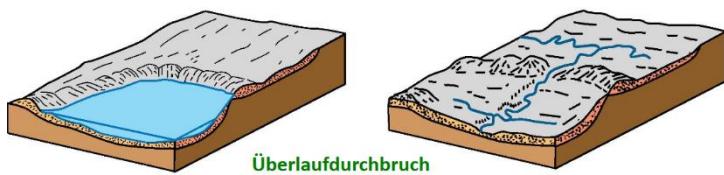
Hängetal=Muldental (glazial entstanden: immer ein Trogtal), Kerbtal fluvial entstanden: fluvial immer ein V- Tal (Fluss frisst sich immer tiefer ein)

Glazial entstandene Täler (Gletscher ständig in Bewegung: schürft Material und gräbt ein): Haupttal (Gletscher in Mitte: durch Gewicht weiter eingegraben) und Seitental (kleinere Seitengletscher fließen zu: Minitrogtal: Hängetal: weniger Gewicht: Talboden liegt weiter oben)

→ fluvial entstandenes Tal: gleiche Höhe beider Täler (nachträglich noch fluvial geprägt: Klamm im Seitental bei ursprünglichem Hängetal)



Entstehung von Durchbruchstälern:



Überlaufdurchbruch:

- Anstauen von Wasser (Zungenbeckensee) hinter Endmoränenwall: Überlaufen am niedrigsten Punkt
- hohes Gefälle + hohe Geschwindigkeit: Überlauf durch rückschreitende Erosion vertieft (Trockenlegung des Zungenbeckensees) → Flussüberlaufstal

Regressionsdurchbruch:

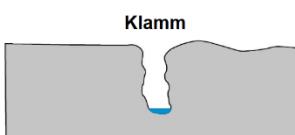
Tiefenerosion nach hinten: rückschreitende Erosion: Quelle frisst sich in Hang ein (Tal, Anzapfen des Flusses)
→ Regressionstal

Antezedenter Durchbruch:

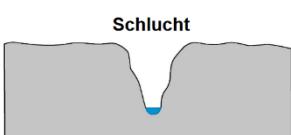
- tektonische Hebung: Orogenese (Aufwölbung): Einschneiden in beginnendes Gebirge: „Einfressen“: Erosive Tätigkeit durch langsame Tektonik
- Flusslauf existierte in seiner heutigen Form vor Gebirgshebung
- Fluss erodierte Lauf in das sich hebende Gebirge (behält Position bei und erzeugte Tal, in dem er seitdem das Gebirge durchquert)

Epigenetischer Durchbruch:

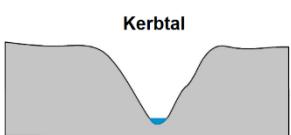
- Fluss fließt in wenig widerständigem Gestein (bereits leicht eingeschnitten)
- Im wenig widerständigen Gesteins befindet sich Härtling
- Hebungsprozess: Fluss kann seinen Lauf nicht mehr verlegen → schneidet in widerständigen Schichten ein

Talformen: (abhängig von Steilheit der Hänge und Breite- Tiefe- Verhältnis)

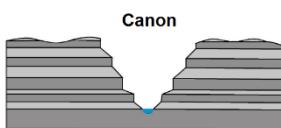
- Tiefenerosion (Abschnitt oben und unten gleich lang)
- v.a. bei Gletscherschmelze: Fließgewässer Richtung Haupttal: tiefes Einschneiden
- Hänge grenzen direkt an Flussbett (kein Talboden)
- Teilweise überhängende Hänge



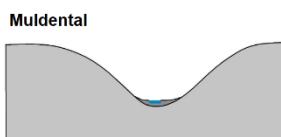
- Denudation und Tiefenerosion
- Abbruch der vorher überhängenden/ steilen Gesteine
- Hänge grenzen direkt ans Flussbett (kein Talboden)



- Denudation nimmt zu und Tiefenerosion (abhängig von Widerstandsfähigkeit des Gesteins, Wasser, Zeit)
- Hänge grenzen direkt ans Flussbett (kein Talboden)
- Tiefenlinie bei abgehendem Wasser vollständig geflutet



- Heterogenes Gestein: weiches Gestein (Denudation), hartes Gestein (Tiefenerosion)
- > verschieden erodierbar: Schichten
- Strukturunterschiede werden herausgearbeitet

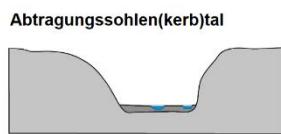
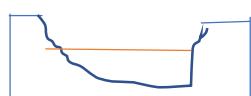


- Seitenerosion und Denudation
- flache konkave Hänge (Neigung < 20 Grad)



Sehr breite Talsohle, verschiedene steile asymmetrische Hänge

- mit Sedimenten zugeschüttet
- Aufgetragenes wird wieder abgetragen
- Breite abhängig von Fließgeschwindigkeit des Flusses

**Trotgtal:**

- durch Gletscher geformt
- rund
- „Knick“ in Neigung (ehemalige Gletscher- OF)

Talgrundrissarten:

- gestreckt: starkes Gefälle und geringer Abfluss: entlang tektonischer Schwächezonen, schwach entwickelter Geschiebetrieb
- verwildert: Starkes Gefälle und schwankender Abfluss: stark entwickelter Geschiebetrieb, kein begrenztes Bett, Aufspalten in zahlreiche Rinnen, beständige Laufverlagerung, dazwischen instationäre Kiesbänke
- Mäandrierend: schwaches Gefälle und schwankender Abfluss: bogenförmig geschwungene Krümmungen, Ausbildung von Prall- und Gleithängen, meistens unverzweigt (Hochwasser: Überschwemmungsfläche)

Flächenbildung:**Schichtflächen/ Schichtstufenlandschaft:**

- asymmetrisches Profil
- fast ebene Stufenflächen und steile scharf abgesetzte Stufenhänge
- Voraussetzung: Wechsel von leicht geneigten Schichtfolgen mit unterschiedlicher Verwitterungsresistenz
- schwach resistent: wasserstauend und kluftarm: leichter abtragbar
- selektive Abtragung: Stufen entstehen:
- stark resistenter Gestein als Stufenbildner (schützt erhabene Teile der Schichtstufe (stufenrandnahe Stufenfläche und oberer Abschnitt des Stufenhangs) vor Abtragung) und schwach resistenter Gestein als Sockelbildner

→ Wie kommt es zu den Schichten?

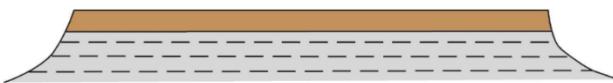
- Schichten im Ozean durch Sedimente entstanden, tektonisch angehoben
- nicht waagrecht, leicht verkippt (Fallen und Streichen) → Schichttafel
- Schichten wurden durch Erosion/ Verwitterung „angeschnitten“
- Ausbildung der Stufe: Erosion bis zur unterliegenden nachgiebigeren Schicht: Selektive Abtragung
- ! Erosion trotzdem von oben

→ Von Schichttafel zur Schichtstufe**Begriffe:**

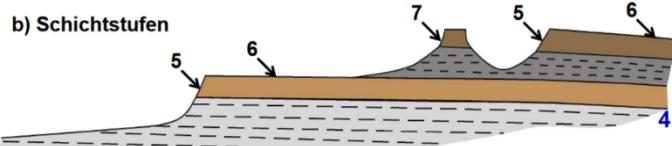
- **First:** höchster Punkt einer Stufe
- **Trauf:** Kante zwischen Hang und Fläche, nicht immer ausgebildet
- **Walm:** Bereich zwischen First und Trauf, runde Übergangsböschung

Stufenarten:

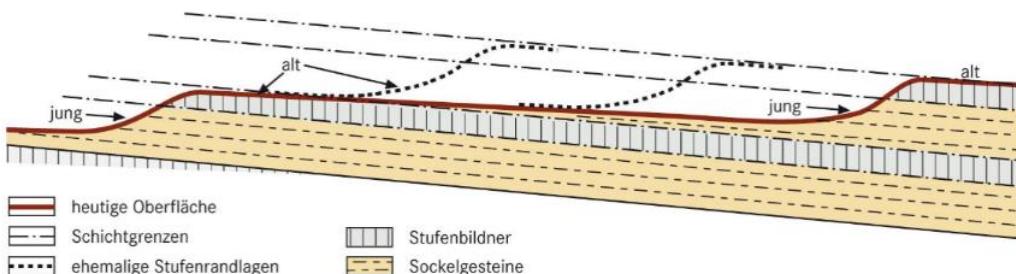
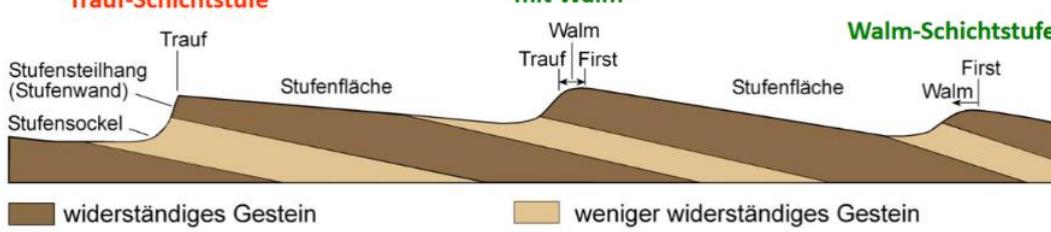
- **Traufstufe** (Traufstufe ohne Walm, Firststufe): First und Trauf fallen zusammen
- **Walmstufe:** Runde Übergangsböschung vom First zum Hang, kein Trauf ausgebildet
- **Trauf-Walm-Stufe** (Traufstufe mit Walm): runder Stufenhang verschneidet sich mit Walm zu einer scharfen Stufenkante

a) Schichttafel

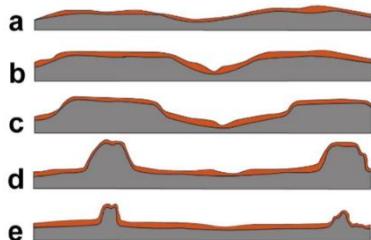
a: Schichttafel: schützt Untergrund bis zum Abtragen/
tektonischer Verschiebung
b: Schichtstufen: Bsp. Schwäbische Alp



1+3 Stufenbildner (Kalk, Sandstein)
2+4 Sockelbildner (Ton)
5 Stufenhang (oberer: vom Stufenbildner gebildeter Teil,
unterer: vom Sockelbildner gebildeter Teil)
6 Stufenfläche
7 Zeugenberg

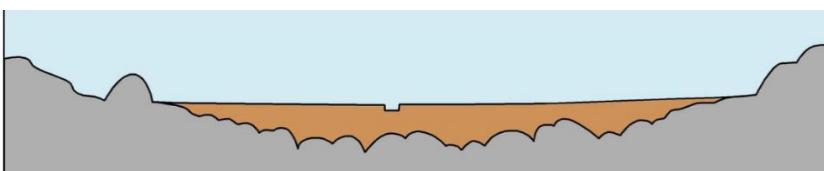
Schichtstufenlandschaft:**Trauf-Schichtstufe****mit Walm**

Rumpfflächen- Zertalung und Flächen- Aufzehrung In den wechselfeuchten Tropen

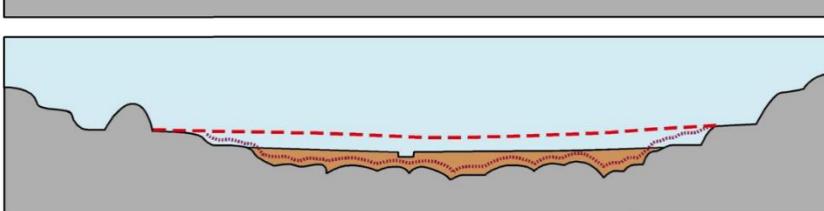


- Rumpfflächen: Land OF, die unabhängig von geologisch- tektonischen und pertographischen Gegebenheiten als leicht gewellte Ebenheiten den festen Gesteinsuntergrund kappen
- Bildungsmöglichkeiten: doppelte Einebnung, Pedimentation, marine Abrasion, Endstadium der Zyklentheorie nach Davis
- a: ursprünglicher Zustand, Tieferlegung bis e: Talbildung
- Theorien: Büdel: Theorie der doppelten Einebnung (Spülfläche mit Spülmulde), Louis: Spezielle Form der Talbildung (Flachmuldental mit Rampenhängen)

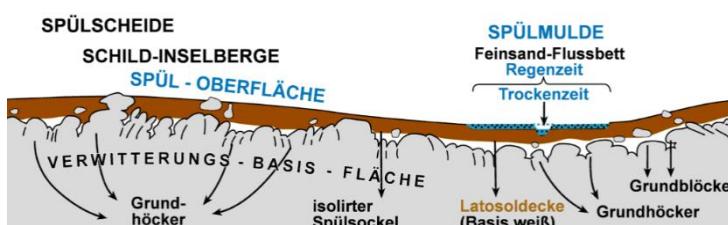
Doppelte Einebnungsfläche in den wechselfeuchten Tropen:



- Auf zwei Ebenen findet Einebnung statt
- Grau: Gesteinszersatzzone: Verwitterung, v.a. durchfeuchter Regolith
- sukzessive Tieferlegung
- Spül- OF: regelmäßige Abtragung
- Kombination aus chemischer Tiefenverwitterung und Spülenduation

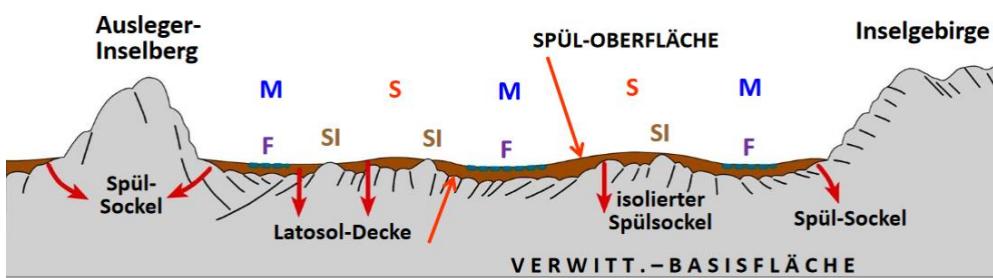


Obere Einebnungsfläche = Spüloberfläche
Untere Einebnungsfläche = Verwitterungs-Basisfläche oder Grundhöckerfläche



- Spülmulde: Flachmuldental
- Spül- OF: Wasser trägt ab

Querschnitt Rumpffläche mit Inselberg und -gebirge (typischer Querschnitt der Tamilnad- Fläche, Südinien):

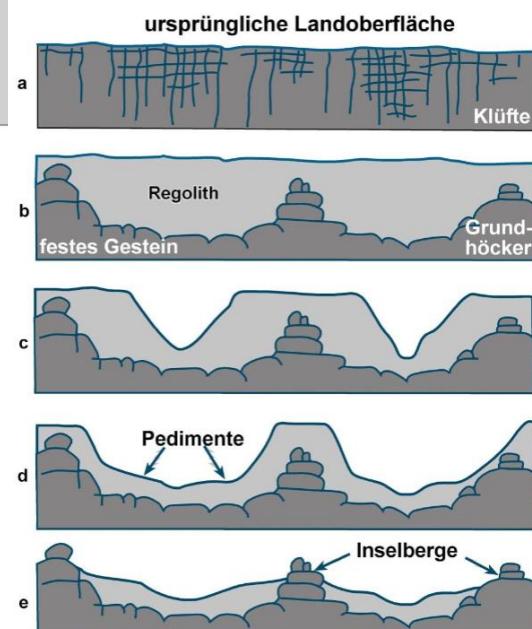


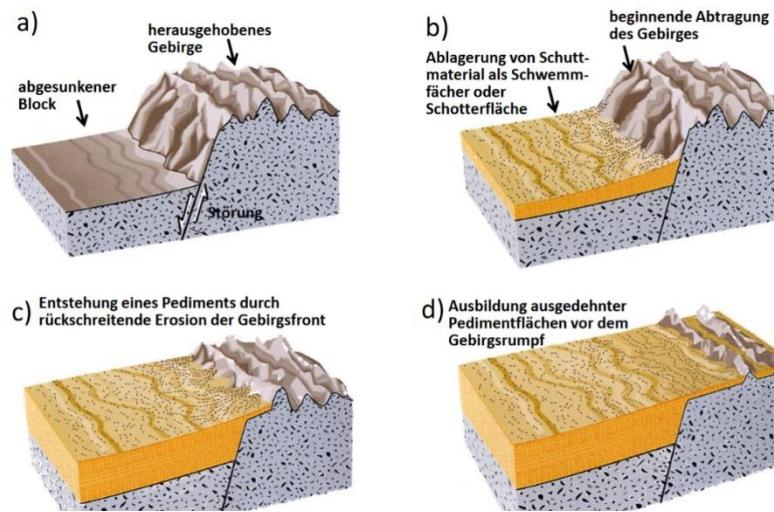
M - Spülmulde
S - Spülscheide

SI - Schildinselberg
F - von Feinsand erfülltes Regenzeit-Flussbett

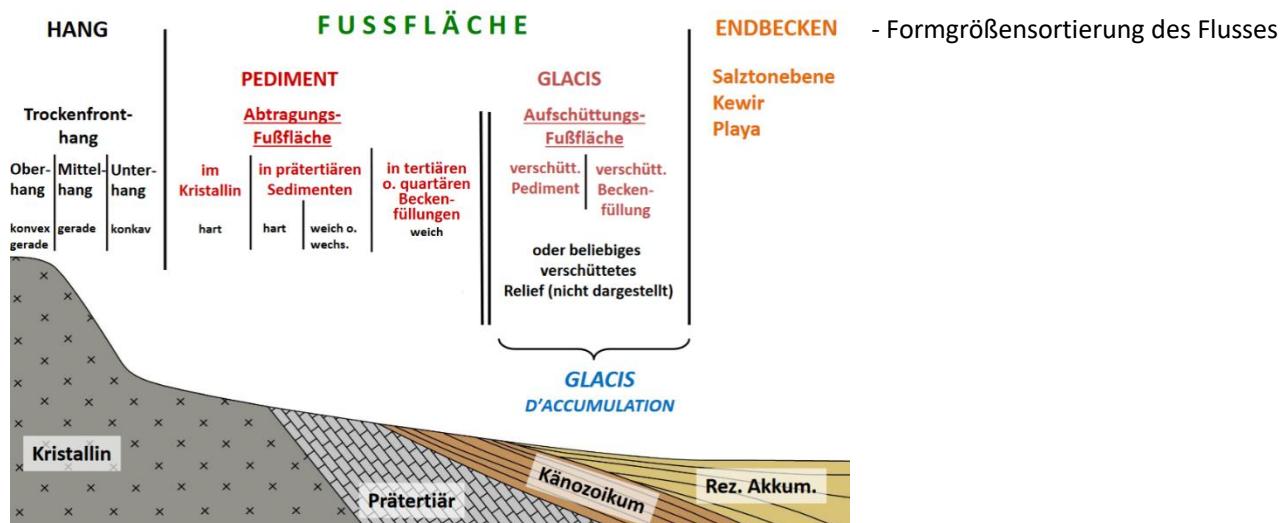
Entstehung von Inselbergen aus Grundhöckern:

- a: Schwächezonen, v.a. dort Verwitterung (Wasserdringt ein: Hydrolyse)
- b: Regolith: Gesteinszersatzzone: locker, Grundhöcker: keine Klüfte
- c: doppelte Einebnung + Rumpfflächenbildung: sukzessives Tieferlegen

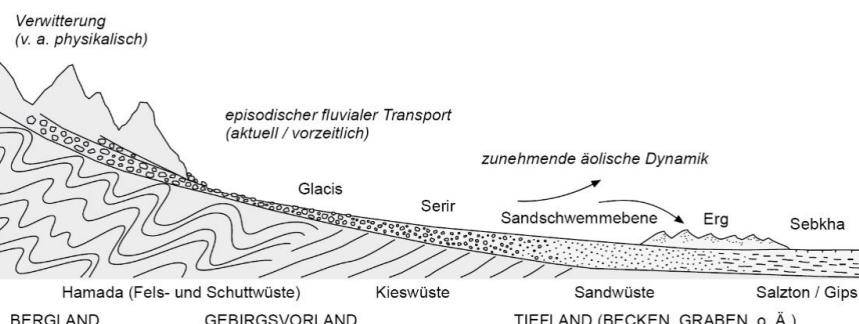




- Fußflächen: Pedimente
- Gegen ein höheres Gebirgsrückenland oder höhere Geländestufe abgesetzte und geneigte Ebene
- Ursachen/ Steuerungsfaktoren:
 - hinreichende und der Abtragung vorarbeizende Schuttbereitstellung
 - schüttere bis fehlende Vegetationsdecke (fehlender Schutzfläche)
- Starkregen mit Schichtfluten
- Wechselfeuchtes Klima

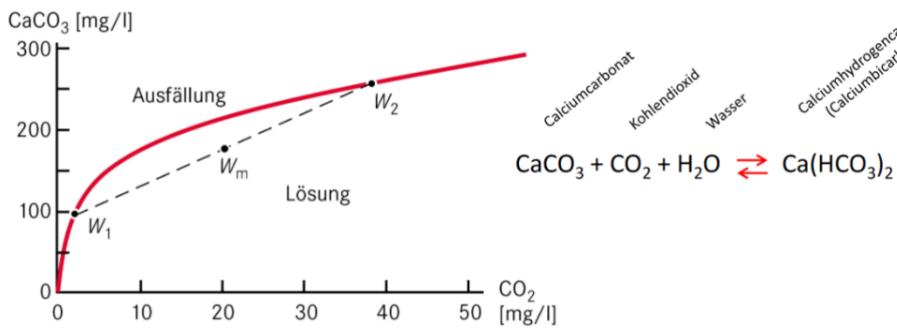


Arid- morphologische Catena:



- räumliche Abfolge von Bodenvergesellschaften
- Bewegung von Hangmaterial nach unten
- **Hammada**: Steinwüste, kantiger Schutt
- **Piment**: Felsfußfläche, schuttfrei, nur von Schuttschleier bedeckt
- **Glacis**: Transport-/ Übergangsbereich, geringere Neigung, mehr grobkörniges Material
- **Serir**: Kiesflächen, vegetationslos, keine größeren Steine
- **Sandschwemmebene**: Sandwüste
- **Erg**: Dünenfelder
- **Sebcha**: Salztonebene (sortiert von grob nach fein: Korngrößensortierung)



**Mischungskorrosion:**

- verschiedene Wässer mit unterschiedlicher Temperatur können unterschiedlich viel Kalk lösen
- zusammenführen: unterschiedlicher Kalk-/CO₂-Gehalt: Mischungswasser kann weder Kalk lösen (Mittelwert von CO₂ und CaCO₃ ausrechnen): unterhalb der Kurve: Lösung: Kalk wird bis zur Sättigung aufgenommen, oberhalb der Kurve: Kalk setzt sich ab

Allgemeines:

- Calciumcarbonat: Kalk
- Wasser allein kann Kalk nicht lösen: nur zusammen mit CO₂: nur Transportmittel
- reversibler Prozess: Lösen von Gestein: Lösungsformen: Karst und Ausfällungsformen: Sinterung (Absetzen)
- kalkgesättigt: Wasser kann keinen Kalk mehr aufnehmen
- unterhalb der Erde: Hohlräume bilden sich
- kalkhaltiges Wasser nicht sauber: keine Filterung, da schon vorgeformte Karsthöhlen, die als Tunnel funktionieren
- Wm: Mischungskorrosion
- **Sättigungskurve:** es kann nicht mehr gelöst werden
- Bedeckter Karst: subkutan (unter OF), nackter Karst (an OF)
- Karstwasser nicht nutzbar (zu hoher Kalkanteil)
- Anlagerung von Kalk: Kalkakkumulation
- Kaltes Wasser kann mehr CO₂ speichern

Voraussetzungen für Karstentstehung:

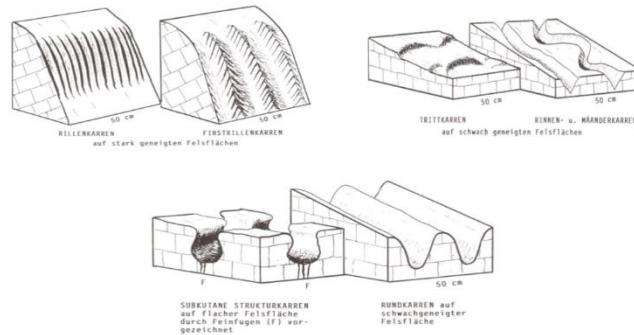
- verkarstungsfähiges Material, mineralogisch rein (wenig unlöslicher Ton)
- flüssiges Wasser
- durchlässiges Gestein

CO₂ Verlust durch:

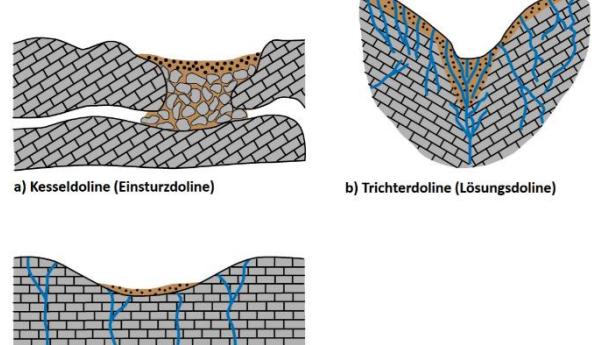
- Turbulenzen
- steigende Temperatur: Wasser kann weniger CO₂ halten
- Druck sinkt: CO₂ Gehalt sinkt: Kalk fällt aus

Karren:

- entstehen durch Verwitterung und flächenhafte Benetzung
- feine Rinnen geformt durch Regenwasser
- Arten: Rillenkarren, Firstrillenkarren, Trittkarren, Rinnen- und Mäanderkarren, Subkutane Strukturkarren, Rundkarren
- z.B. Gottesackerplateau

**Dolinen:**

- Größe: 10m² bis einige Hektar
- a: unterirdisch eingestürzt: Lösung im Untergrund
- b: Lösung des Gesteins an OF
- c: Lösung des Gesteins an OF
- einzelne Stellen eingebrochen: Kluftnetz: unterschiedlich stabil

**Trockentäler:**

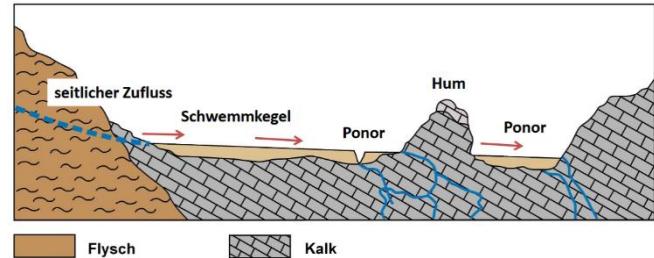
- häufig in Karstgebieten
- OF-Wässer versinken in Untergrund: unterirdische Entwässerung, Wasserführung nur nach NS
- Entstehung durch ursprüngliche Tiefenerosion
- Speilöcher: nach längerem Regen sind Karstgefäß im Untergrund vollständig gefüllt

Merkmale von Karstlandschaften:

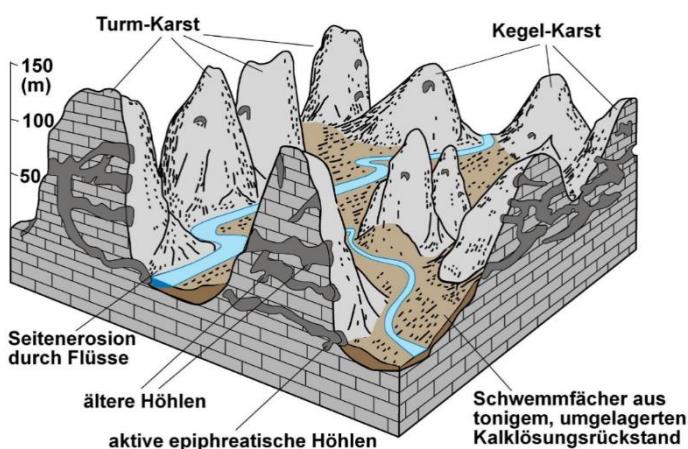
- oft geringe Bodenmächtigkeit
- Gewässerarmut an OF
- Klein- und Großformen
- Flussschwinden und Karstquellen
- Höhlensysteme im Untergrund
- Dolinen
- Heterogene Grundwasserhöhlen

Entstehung eines Polje:

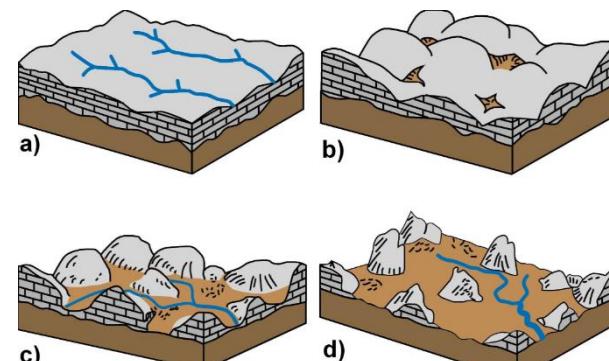
- Beckenartig geschlossene Hohlform in Karstgebieten
- Ponor: Schlucklöcher: OF Wässer gelangen in Untergrund des Karstsystems, können zu Dolinen erweitert werden
- Boden besteht aus lehmigem Lösungsrückstand: Landnutzung
- häufig episodische Überflutung bei Regenfällen, manchmal Poljenseen
- Poljen werden oft von Flüssen durchlaufen (Karstquellen und Ponore)
- durch laterale Lösung Wachstum der Poljen
- Kalktuffschlote: Hylben: Wasser sammelt sich dort (kann nicht abfließen) konzentrische Siedlung/ Landwirtschaft
- im OF-Bereich: keine Gewässer: Trockengebiet (edaphische: durch den Untergrund bedingt): Auswirkung auf Landschaft, Landwirtschaft, Siedlung

**Ausfällungsformen:**

- Stalagmiten: von Decke fällt kalkgesättigter Tropfen: CO₂ diffundiert in Luft (Turbulenzen) + Wasser verdunstet: Kalkausfall
- Stalagtiten: Verdunsten + Wasser vorher unter Druck (an Decke): frei an Luft: Druck sinkt: Kalkausfall
- Stalagnate: Zusammenwachsen
- Sinterterrassen: Kalkterrassenlandschaft
- Uracher Wasserfall: Sinternase: Vorbau durch Fluss gebildet (bricht nach Zeit ab)
- Schwäbische Alb: Verkarstete Hohlfäche (Wasser sammelnde Schicht darunter), viel Wasser aus verkarstetem Untergrund an OF: CO₂ diffundiert (+ Vegetation: CO₂ sinkt): Kalkablagerung
- Steinerne Rinne: Karstquelle: kalkgesättigtes Wasser fließt entlang und schüttet in Rinne Kalk aus (spezielle Hangneigung: sehr langsame Fließgeschwindigkeit + Moos entzieht Wasser/ braucht CO₂: + Fließen von Wasser (Turbulenzen): Kalkfällt aus)

Tropischer Karstformenschatz:

- Widerspruch: Warmes Wasser kann weniger CO₂ speichern
- Tropen nicht vergletschert: Formen viel älter und größer
- Viel NS + Biomasse: (viele organische Säuren) gleicht geringe Aufnahmefähigkeit von CO₂ aus
- höhere Temperatur: chemische Prozesse laufen schneller ab
- Hohlformenkarst: Vertiefung: Vollformenkarst
- Divergierende Verwitterung: NS v.a. in tieferen Lagen (nicht an Steilwänden): wenig Erosion an Steilformen
- Vollkarst: eine Art Berg in der Landschaft, EOF höher: Karst bleibt stehen, auch in DTL: Relikt aus früheren Warmzeiten

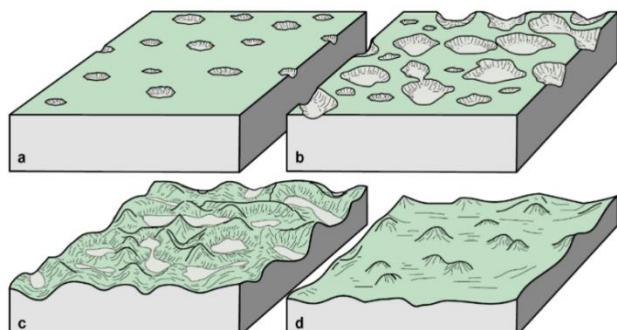
**Karstentwicklung in Tropen:**

- a: Cockpit-Karst: Kluftnetz: Wasser sammelt sich: Hohlformen bilden sich
- b: Kuppenkarst: nur noch Wände von Dolinen übrig: Verwitterung
- c: Kegelkarst
- d: Turmkarst
- Tiefenwachstum endet im Niveau der Vorflut, ab da: laterale Lösung und Hangversteilung

Flussschwinden der Donau:

- in Karstgebieten können Flüsse abschnittsweise verschwinden (Austritte erfolgen an Karstquellen in anderen Gebieten)

Karstzyklus:

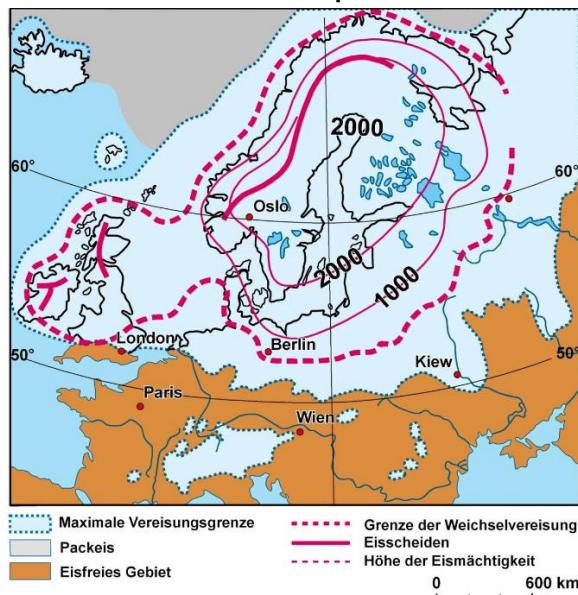


- a: junger Karst, zwischen Dolinen noch Urform erkennbar
 - b: spätjunger Karst mit vielen größeren, z.T. zusammengewachsenen Dolinen
 - c: Cockpitlandschaft mit reifem Karst, Urform verschwunden, große Dolinen zwischen Cockpithügeln
 - d: Cockpitlandschaft mit altem Karst, eingeebnetes Land zwischen Hügeln (ragen isoliert über werdende Rumpffläche)

Glaziale Morphodynamik:

- glaziale Formung durch Wechselwirkung zwischen: schuttbelastetem Gletschereis und Erosionswiderständigkeit, Topographie, Reibungswiderstand und Gefälle des Untergrunds, abhängig von Gletschereigenschaften
 - Gletscher wirken abtragend durch das sich bewegende Eis, mitgeführte Gestein, Schmelzwässer
→ Gletscherschliff/ Gletscherschrammen: **Detorsion**
 - **Exaration:** Abtragung von Lockersedimenten/ wenig widerständigem Gestein: Zungenbecken und Stauchmoränen
 - glaziale Großformen: Gletscher, Endmoräne, Trogtal, Zungenbecken, ...

Verbreitung und Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises in Nordeuropa



- bis zu 2,6 km dicke Eisdecken
 - Vergletscherung: Meeresflächen viel Wasser entzogen: Sinken des Meeresspiegels
 - Periglazialer Raum: Permafrostbedingungen

Gliederung des Eiszeitalters in Mitteleuropa:

Zonierung

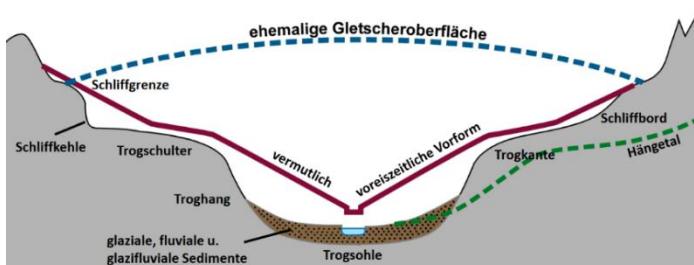
Eisstromnetze:

Findlinge: („Alter Schwede“ bei Hamburg, Dengelstein bei Kempten) magmatische Gesteine

→ Ferntransport durch Eis: Rekonstruktion des Einzugsgebiets durch charakteristische Leitgeschiebe

Trotal:

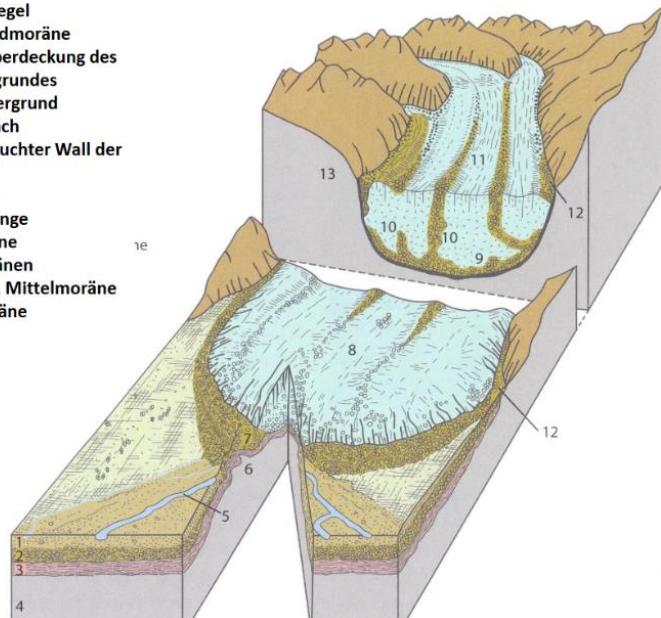
Schematischer Querschnitt durch ein Trotal



- auch U-Tal
- durch Glazialerosion übertiefe und verbreiterte präglaziale Kerbtäler / Kerbsohlentäler
- ebener Talboden aus glazifluvialen / fluvialen Ablagerungen
- steile Talflanken: glazialerosive Trogwände, bis an die ehemalige Schliffgrenze des Gletschereises
- oberhalb der Schliffgrenze: Talhänge durch periglaziale Formungsprozesse gestaltet rau Fels-OF, scharfkantige Grate, mächtiger Felssturz- und Steinschlagkegel
- Seitentäler münden mit Gefällsbrüchen als Hängetäler

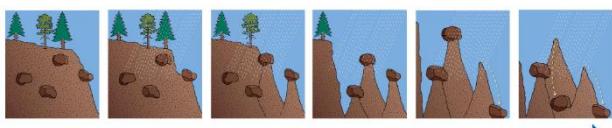
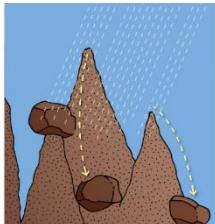
Moränen in und um einen Gletscher:

- 1: Schwemmkegel
- 2: Ältere Grundmoräne
- 3: Sedimentüberdeckung des älteren Untergrundes
- 4: Älterer Untergrund
- 5: Gletscherbach
- 6: Leicht gestauchter Wall der Endmoräne
- 7: Endmoräne
- 8: Gletscherzungue
- 9: Grundmoräne
- 10: Innenmoränen
- 11: Ober- bzw. Mittelmoräne
- 12: Seitenmoräne
- 13: Trotal



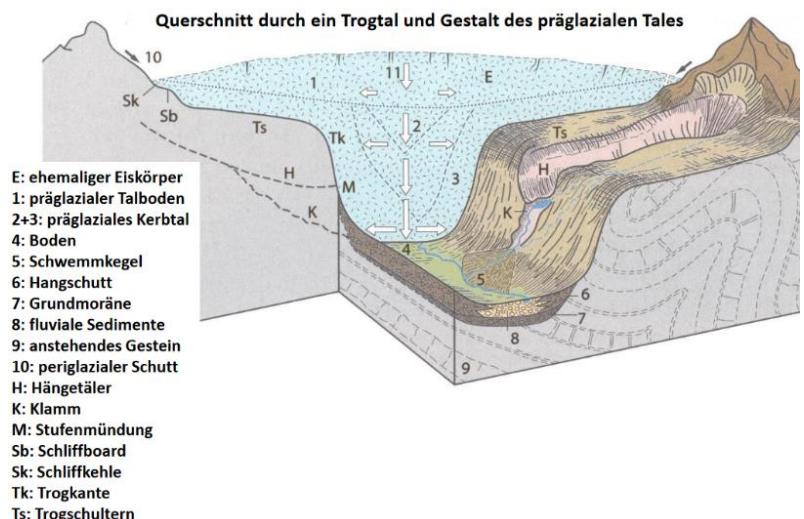
- Periglaziale Flussnetze: Durch Hebung der Alpen eingeschnitten: Talbildung
- Eiszeit: an Talsohle: Gletscher leistet Arbeit: Täler zurechgeschnitten: Moränenmaterial: Gestein u. Ä. wurde mitgenommen (unsortiert, verschiedenste Größen)
- Endmoräne: markiert max. Bereich der Vergletscherung (nach Abschmelzen bleiben Steine liegen)
- Moränenunterscheidung je nach Ablagerungsort (Seiten-/ Endmoräne)
- Satzendmoräne: Gletscher stößt an Hindernis/ anderen Gletscher
- Moräne: keine Materialsortierung
- Moränenwälle: Sammeln von Schutt am Rand des Gletschers wegen Fließbewegung und Ablation
- Grundmoräne besteht aus Schutt, der beim Abschmelzen des Gletschers entsteht

Erdpyramiden:



- z.B. Rodung: Erosion von Seitenmoränenmaterial: Erdpyramiden

Glazialer Formenschatz:



- Auf Spitze: Decksteine: Selektives Abtragen: Fluss/
NS nicht genügend Kraft + Stein wirkt wie
Regenschirm: Schutz vor Erosion

- Till: Moränenmaterial
- Tillit: diagenetisch verfestigt
- Präglazialer Talboden: vor Vereisung
- Präglaziales Kerbtal: Durch Hebung von Alpen: Erosionsbasis niedriger: Talbildung
- am Boden: Eisdruk viel größer
- H rechts: Einschneiden von Wasser: Druck größer: Klammbildung
- Trogtal: U- Tal
- Ebene Talböden: U teilweise aufgefüllt mit Schutt
- Glazialerosive Prozesse

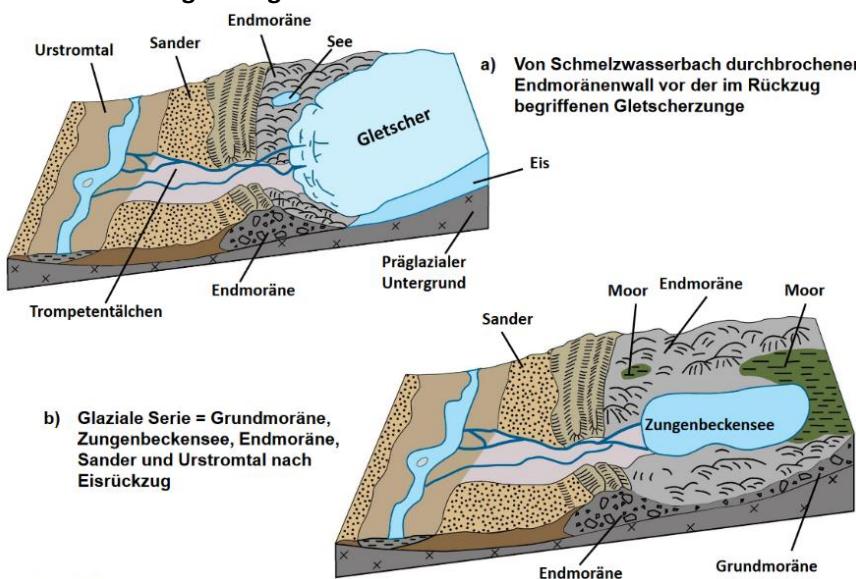
Glaziale Serie:

- Albrecht Penck

- **Modell:** Abfolge von glazialer Erosion und Akkumulation und deren Sedimentationstypen
- Beschreibung der typischen hinterlassenen Landschaftsformen der Inlandvereisung in NDTL und Vorlandvergletscherungen am Alpennordrand
- NDTL: Sanderflächen von Urstromtälern begrenzt (sammeln Schmelzwässer der Gletscher und der sommerlichen Zuflüsse aus dem Periglazialraum, da Weg zur Ostsee durch Eis blockiert), keine Schotter: Eismächtigkeit in NDTL viel größer
- SDTL: Schotterflächen (Bsp. Lechfeld)
- Ostsee: vor 16,000 a entstanden, Inlandseiskörper drückt skandinavisches Festland in Erdkruste: Abschmelzen: Anstieg des Meeresspiegels
- verschiedene Reichweiten der Gletschervorstöße: verschiedene glaziale Serien (ältere Ablagerungen sind weniger deutlich aufgrund der periglazialen Prozesse)
- übertieftes Gletscherbecken (durch Exaration entstanden: glaziale Erosion), heute oft Seen
- **Zungenbecken** (lange noch Toteismassen: hielten sich länger)
- Bestandteile der idealen, vollständigen glazialen Serie:

- **Grundmoränenlandschaft mit Zungenbecken** (Sedimente an OF vom Abtauen der Gletscher, erst tiefer Grundmoränenmaterial, mit Drumlins (Ursprung glaziale Erosion und Akkumulation))
- **Endmoränenkette** (bogenförmig um Zungenbecken) mit **Endmoränenwall** (Gefälle ändert sich: Moränensedimente gehen von fluvioglazialem Schotter in Sander über (durch fluvialen Transport feinere Komponenten wie Ton und Schluff, ebene Flächen (spiegeln ehemaligen Abfluss wider)))
- **Schotterfeld / Sanderebene** vor der Endmoränenkette
- **Urstromtal** (Abfluss der Schmelzwässer der Gletscher): **Übergangskegel**

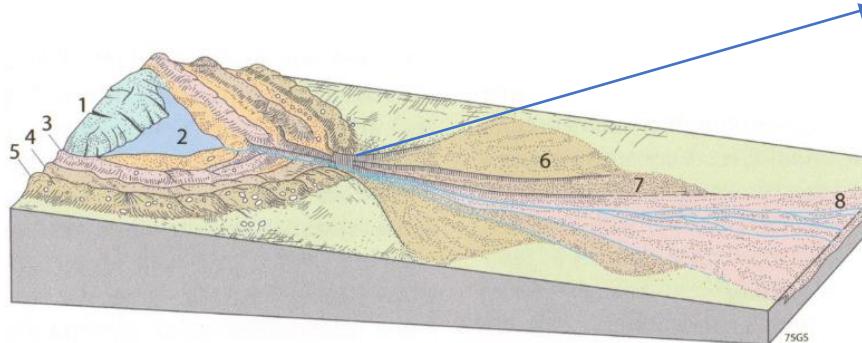
Entstehung einer glazialen Serie:



- Innensaumformen: ehemals vergletscherte Formen
- Außensaumformen: durch Schmelzwässer

Trompetentälchen und Zerschneidung von Eisrückzugsstadien

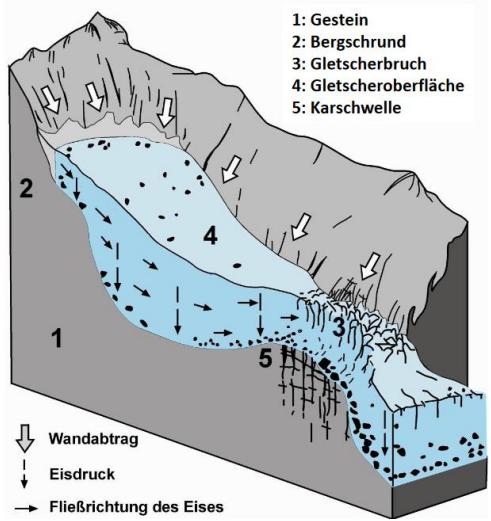
- Ein Beispiel glazialer und glazifluvialer Reliefgenerationen -



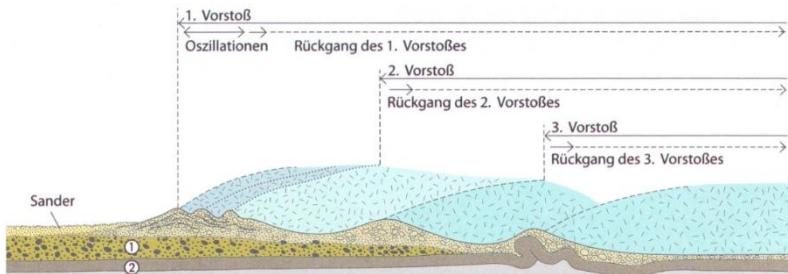
- 1: Gletscher
2: Eisstausee
3: Letzte Endmoräne
4: Mittlere Endmoräne
5: Äußere Endmoräne
6: Ältester Schwemmkegel
7: Mittlerer Schwemmkegel
8: Jüngster Schwemmkegel

- nur in SDTL
- Trompetentälchen
- oberhalb: Innensaumformen
- unterhalb: Außensaumformen
- Bildung: Zerschneiden eines Schotterkegels durch Schmelzwässer

Schema eines Kargletschers



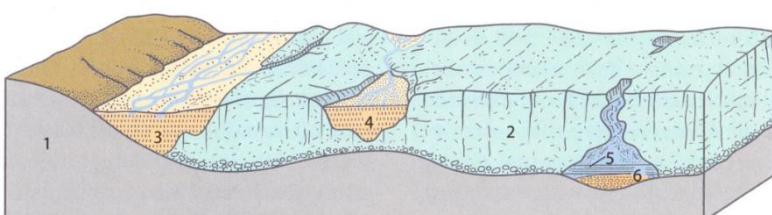
Gletscherbewegung und Eisstillstandslagen



- 1: ältere Grundmoräne
2: altpaläozäner Untergrund
3: präpaläozäner Untergrund

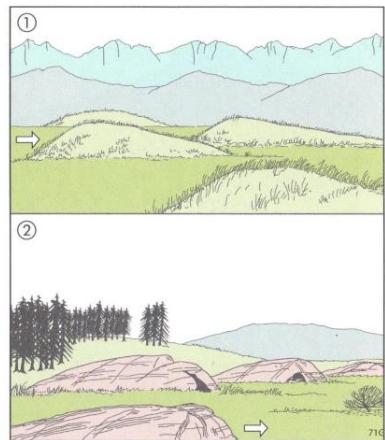
- Gletscher zieht sich zurück:
schmilzt ab: Material wird abgesetzt
- Bei Vorstößen/ Rückgängen wird alles vorherige mitgenommen
- Vorstoß des Gletschers: Material wird mitgenommen, Landschaftsformen zerstört
- Abschmelzen: Schmelzwasser
- Eiszerfallslandschaft

Os- und Kamebildung am Rand eines großen Eiskörpers

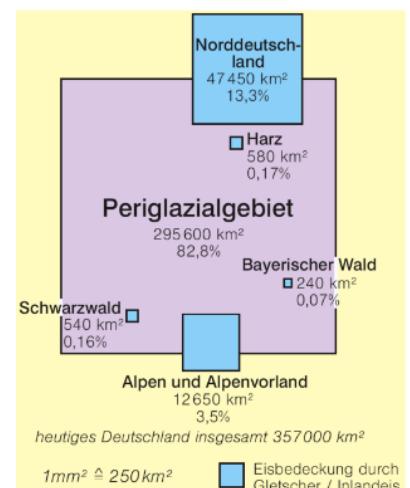


- 1: Felssockel
2: Gletscher
3: Schotterkörper
4: Glazifluviales Sediment auf dem Gletscher
5: Subglazialer Gletscherbach
6: Sedimentstrang
8: Hohlformen
9: Kames
10: Os
11: Grundmoränenlandschaft

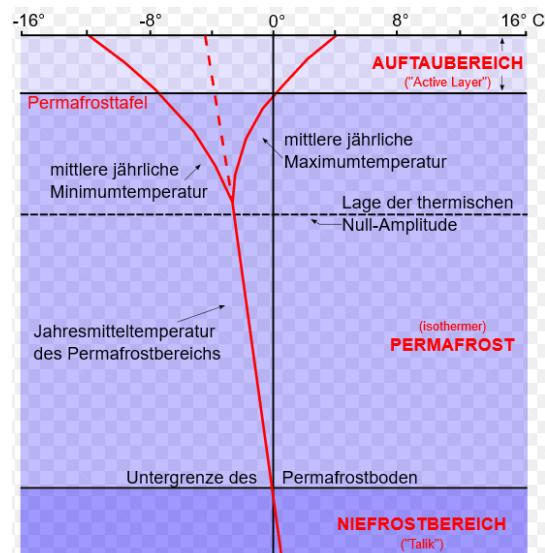
- Gletscher: eigenes Fließgewässersystem
- Ablagerung eines subglazialen Fließgewässers (in und unter Gletscher mit Material)
- **Toteis:** Eisschollen, die vom Gletscher abgespalten sind: überschottet mit Kiesel
- **Toteislöcher** (Toteiskessel/ Sölle): isoliert und später abschmelzen: Sedimente, die auf Toteis abgelagert wurden: abflusslose kreisförmige Hohlformen
- **Oser:** lange, geschwungene wallartige Rücken mit steilen Hängen, Akkumulationsformen aus geschichteten Sanden und Kiesen (von Schmelzwässern mitgeführt und abgelagert)
- **Kames:** Formen aus geschichteten Schmelzwassersanden und -kiesen, Ablagerung zwischen Talhang und Außenrand des Gletschers/ auf Toteis
- Oser + Kames: Sortiertes Material

**Drumlin vs. Rundhöcker**

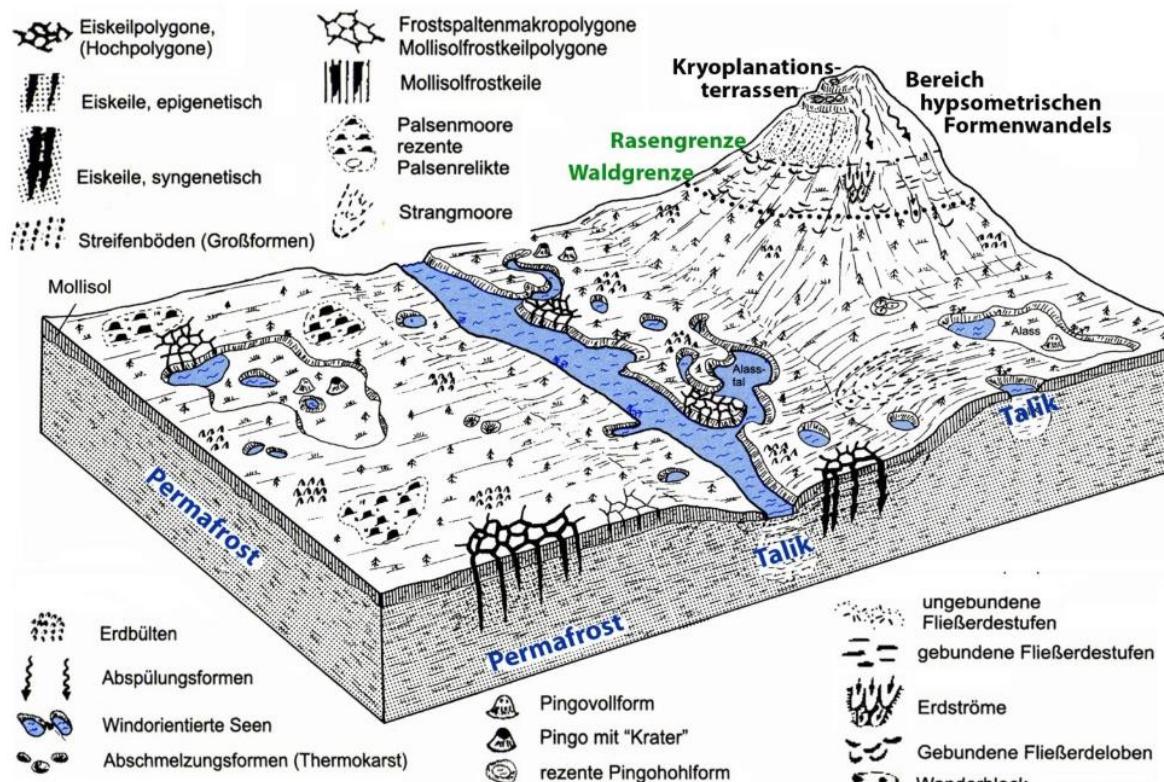
- Luvseite: Bewegungsrichtung des Eises zugewandte Seite
- **Drumlin:** steile Luv- und abfallende Lee- Seite, Lockergestein/- substrat (durch Fließen des Gletschers über Hügel verformt), kommen in Gruppen in Grundmoränenlandschaft vor
- **Rundhöcker:** Flache Luv- und steile Lee- Seite, Festgestein, Luv: Detorsion (Abschleifen durch Druck: Druckzunahme beim Anströmen: Schleifwirkung), Lee: Herausreißen von Gesteinsstücken (Detraction: Anfrieren (Wasser fließt in Rillen:) und Herausziehen von Bruchstücken), kommen im Bereich der Endmoräne vor

Flächen der Eisbedeckung vor 20.000a**Periglaziale Morphodynamik: (Umland der Gletscher)**

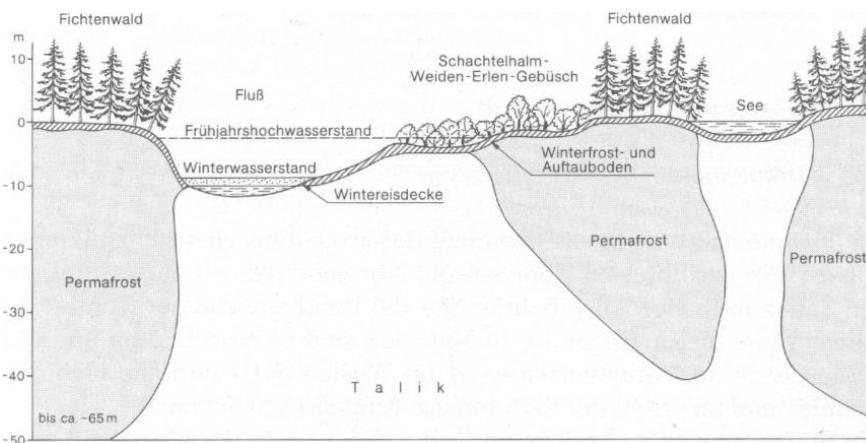
- periglaziale Formen entstehen durch Frost im Untergrund
- Frostwechsel charakteristisch
- deren Dynamik hängt von klimatischen Bedingungen ab (→ Tiefe des Frostes):
 - Tageszeitenfrost (tropische Hochgebirge)
 - Jahreszeitenfrost/ Dauerfrost (höhere Breiten)
- Entscheidend: Nähe zur Schmelztemperatur, Eisgehalt der gefrorenen Schicht im Untergrund (kann Porenvolumen überschreiten: Eisübersättigung): bestimmt mechanisches Verhalten des gefrorenen Materials (Hebung/ Setzung, Festigkeit, Kriechen, Rissbildung)
- Tageszeitenfrost: Volumenexpansion durch Gefrieren: kleine Korngrößen als Verwitterungsprodukt

Permafrost:

Schematisches Blockbild zur Formengesellschaft der boreal-periglazialen Zone

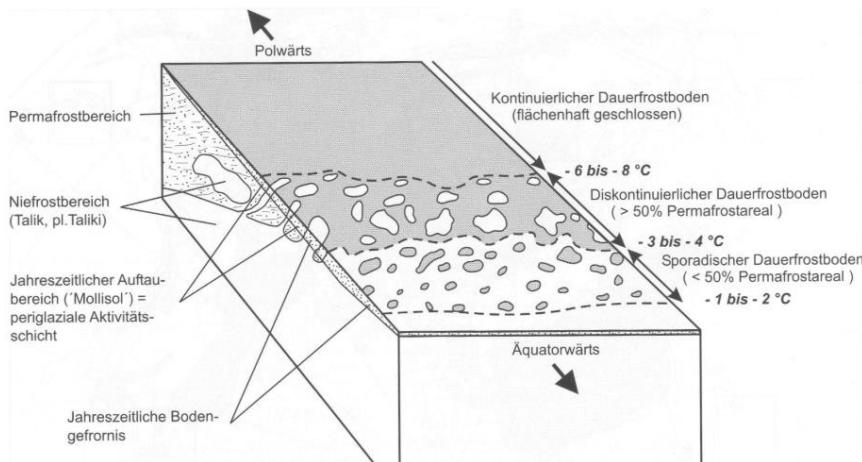


Profil durch eine typische boreale Tallandschaft in der kontinuierlichen Permafrostzone

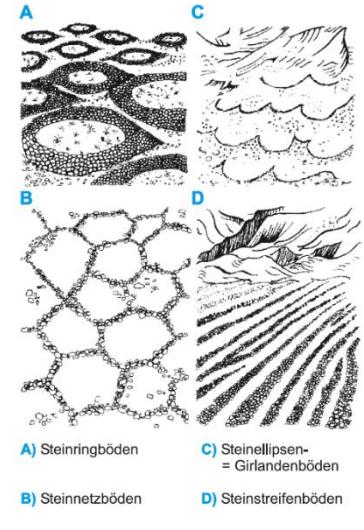


- Permafrosttafel
- Permafrost unter Nadelwald
- Talik (Tallik/ Taliki: nie gefroren im Permafrost, knapp unter OF) unter Gewässern
- Thermokarsterscheinungen an Uferbereichen durch Auftauprozesse (Thermokarstseen)
- Thermale Lateralerosion durch warme Fließgewässer aus südlicher Richtung („nagen“ am Ufer: schnell) → Verbreitern von Ufern

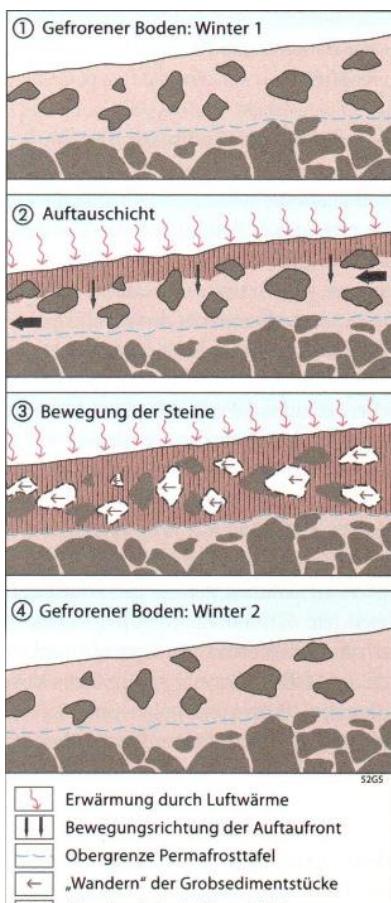
Dauerfrostverbreitung:



- Zonale Darstellung
- Infrastrukturelle Probleme: Pipelines (warm) in Russland: thermale Unterschiede
- organische Materialien eingeschlossen (enthalten CO₂): entweichen beim Schmelzen: Klimawandel wird verstärkt
- Permafrostbereich = Permafrosttafel

**Frostmusterböden:**

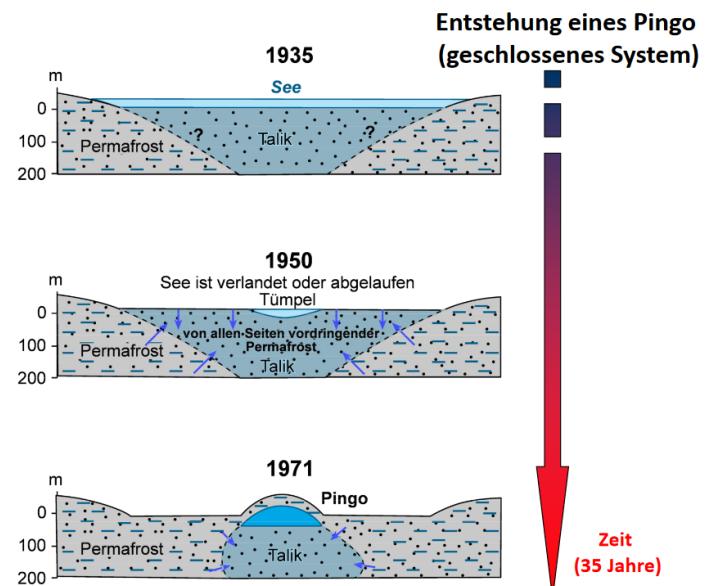
- OF- Form
- Sortieren von Gesteinen
- Strukturböden durch Materialsortierung in flachen Gebieten durch Frier- Tau- Prozesse
- Volumenerweiterung beim Gefrieren und Druckentlastung beim Auftauen

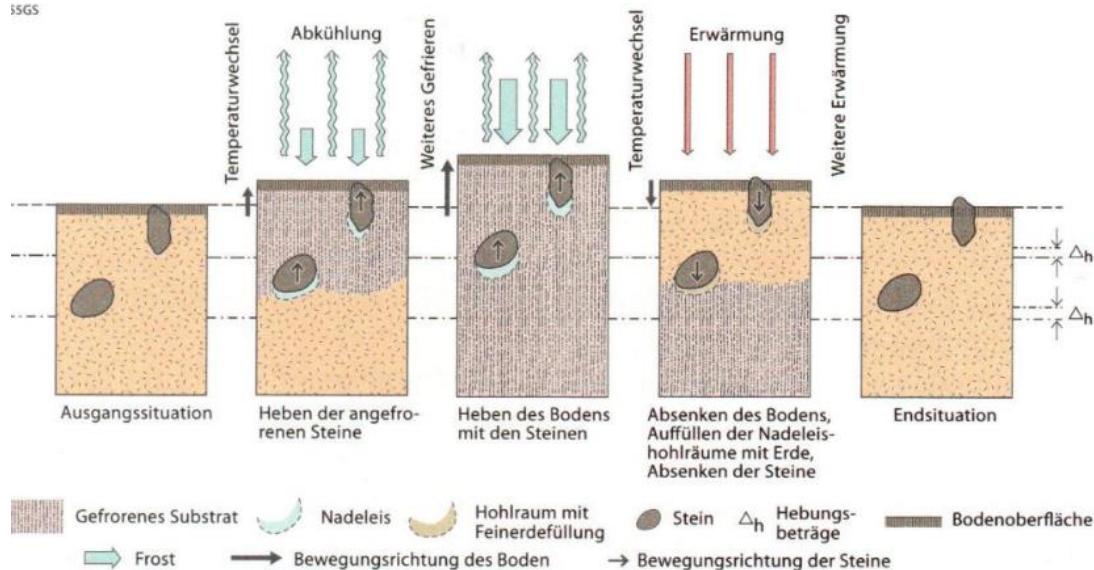
Kryoturbation und Solifluktion:

- Versatz von Material (sehr langsam): Vegetation kann reagieren (z.B. Säbelwuchs)
- **Solifluktion:** Hangabwärtige Bewegung von wassergesättigtem Material (Bodenfließen) durch Frier-Tau- Prozesse (Wasser kann nicht in gefrorenen Boden abweichen)
 - geregelte/ ungeregelte Solifluktion
 - gebundene/ ungebundene Solifluktion
 - Jahres-/ Tageszeitensolifluktion
- **Turbationsprozesse:** Durchmischen von Boden
- **Kryoturbation:** Umsatz von Material: Substrat- Durchbewegung infolge widerholten Gefrierens und Wiederauftauens

Pingos:

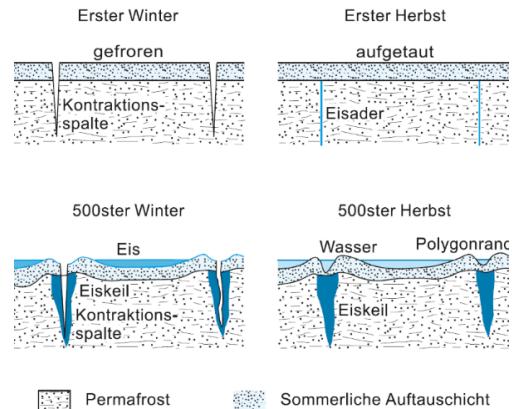
- Pingos: Eiskernhügel (Eiskern + isolierende Schicht)
- bis zu 100 m hoch
- Abtragung der mineralischen Deckschicht ermöglicht den An-/ Auftauprozess
- Kern aus (Blank-) -Eiskörper im Lockersedimentmaterial
→ ggf. saisonaler See
- Formen: Pingovollform, Pingo mit Krater, rezente Pingohohlform
- Wasser an OF verhindert Forsteindringen: Eis im Untergrund schmilzt → Thermokarstseen
- Entleeren: Permafrost dringt von OF her wieder in aufgetauten Untergrund ein
→ Porenwasser wird unter Druck gesetzt und gegen OF gedrückt: Eisbildung und Wölbung der OF: Frosthub, Wasserschichten gefrieren nacheinander





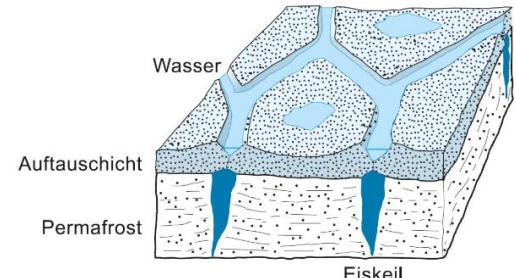
Auffrieren: Heben der angefrorenen Steine

Entstehung von Eiskeilen:



- Kontraktionsspalten
- in ausgedehnten kalten Flachländern: geringe Abtragsraten: Ablagerung von Feinmaterial aus Frostverwitterung
- Gefrieren der feinkörnigen Sedimente (Zusammenziehen: Material kommt von oben nach): große Eisgehalte entstehen
- geringe Schneedeckung und schnelle Abkühlung: Kontraktionsrisse (füllen sich v.a. im Frühjahr mit Eis, wächst in Dicke durch Wiederholen des Vorgangs über Jahre) → großräumige Netze von Eiskeilen

Eiskeilpolygone: (im Sommer)



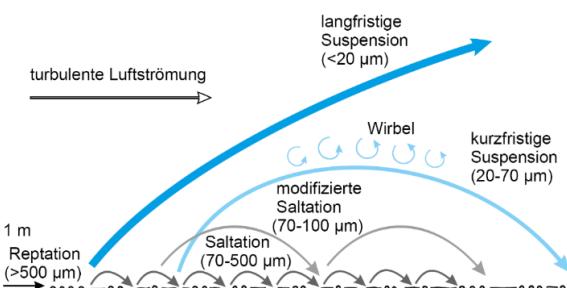
Äolische Morphodynamik:

- v.a. in Gebieten mit Wassermangel (semiarid/ arid): fehlende Vegetation als Schutz und trockenes, leicht zu transportierendes Material
- Äolische Aufnahme von Lockermaterial abhängig von Relief, Windgeschwindigkeit, Vegetationsdichte, Korngrößenverteilung und Feuchtigkeitsgehalt des Untergrunds
 - flächenhafte Abtragung: Deflation
 - Wind kann nur kleine Partikel bewegen (geringe Dichte/ Viskosität), Ausnahme extreme Winde
 - Körner aus Schluff und Ton brauchen wegen Kohäsionskräften wie im Wasser auch stärkere Kräfte
 - durchfeuchte Materialien: kapillare Kräfte wirken der Deflation entgegen
 - Luft kann größere Strecken bergauf gegen Schwerkraft strömen: Ausblasung geschlossener Hohlformen (Deflationspfanne/-wannen) und Akkumulation von freien Dünen
 - Transport von Partikeln: kritische Schubspannungsgeschwindigkeit muss erreicht werden: Felssmassive allein können nicht deflatiert werden, nur aufbereitete Partikel (z.B. durch Verwitterung)
 - Akkumulationsformen: steilere Luv- als Leeseite

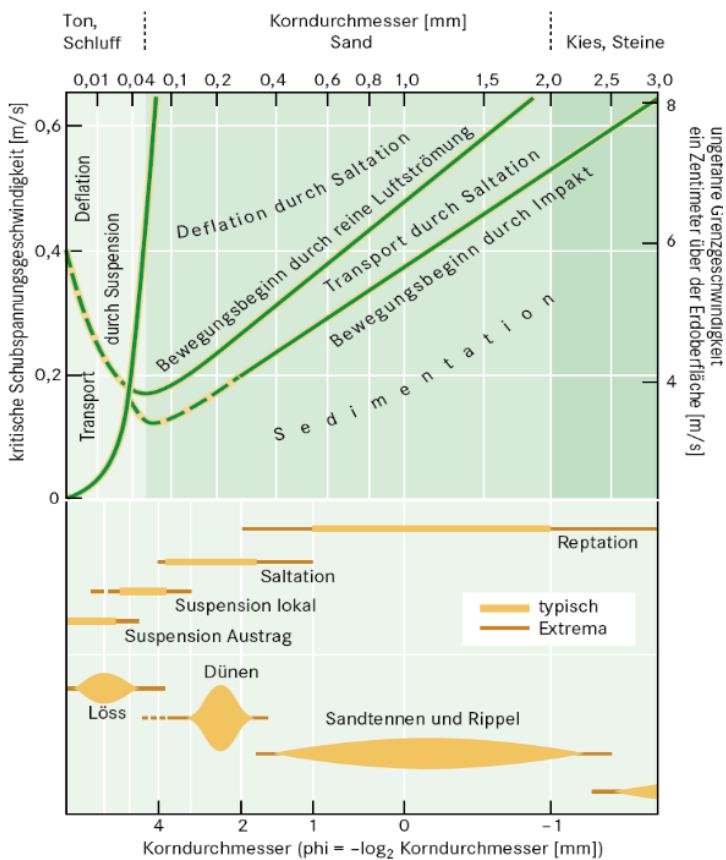
Mechanismen des Windtransports bei Sand-, Schluff- und Tonpartikeln

- v.a. in Trockengebieten: Wüsten, Eiswüsten, Periglazial
- Vegetation als Stabilisator gegen Wind (feuchter)

Trockengebiete: Überwiegt Flächenspülung? Ja, da
Wüstenboden trocken: plötzlich Wasser (kurze und sehr intensive NS):
Wasser fließt oberflächlich ab (Keine sofortige Versickerung, dauert)

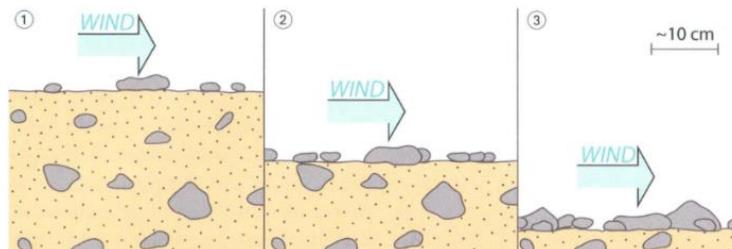


Kritische Schubspannungsgeschwindigkeiten verschiedener Korngrößen für Deflation, äolischen Transport und Sedimentation in Abhängigkeit von Korngrößen sowie typische Formungsbeispiele



- Wind als Antrieb: Sandbewegung
- **Korrasion:** Winderosion, Windschliff im Luv
- **Akkumulation:** Anwehung, Aufwehung
- **Deflation:** Auswehung
- **Saltation:** Springen der Teile, beim Landen: Reptation
- Abhängigkeit von Korngröße und Windgeschwindigkeit
- Wind arbeitet selektiv: nach Korngröße sortiert
- **Suspension:** Transport kleinster Teilchen (Staubtransport), in Schwebeflucht halten
- **Reptation:** rollend oder stoßweise Bewegung (Körner stoßen sich gegenseitig an, durch Saltation entstanden)

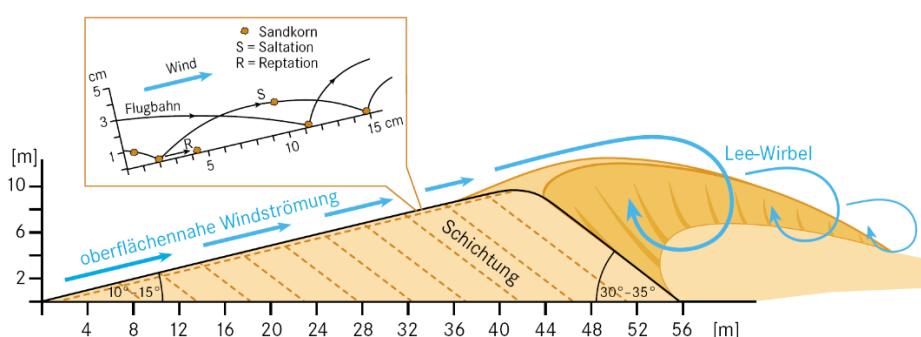
Faktion	Korndurchmesser	Windgeschwindigkeit in m/Sek.
Staub	bis 0,01	0,10
Feinsand	bis 0,03	0,25
	bis 0,04	0,50
	bis 0,10	1,0–1,50
	bis 0,12	0,6–1,70
Mittelsand	bis 0,25	1,8–3,30
	bis 0,40	3,4–20,00
	bis 0,50	5,3–40,00
Grobsand	bis 0,75	7,5–9,80
	bis 1,00	9,9–12,40



Entstehung eines Steinpflasters durch selektive Deflation:

- relative Anreicherung größerer Komponenten
- Hamada- (kantiger Schutt), Serirflächen (runder Schutt), Mischung: Reg
- OF durch Wind mit groben Steinen gepflastert: keine weitere Auswehung mehr möglich
- residual: große Steine bleiben liegen
- porasiv: zurechtschleifend
- selektiver Windschliff/ Korrasion: Bsp. Pilsfelsen: eine Seite des Felsens ist stärker ausgeschliffen: Polygenetische Form: durch Passatwinde und chemische Verwitterung (Schatten: andere Temperatur + Kälte nachts: Feuchte hält sich länger)

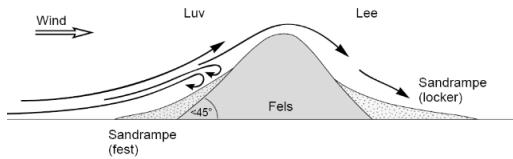
Querschnitt durch einen Barchan (einschl. der dominierenden Sandbewegungen)



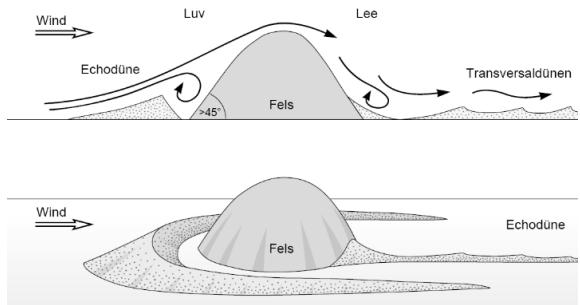
- Luv: Deflation: Aufwärtstransport von Sandkörnern
- Lee: Rückströmung: abwärts rutschen und ablagern: Wanderdüne
- auch Sicheldüne
- einzige echte Wanderdüne: komplette Sandmasse wird umgewälzt und in Windrichtung verlagert
- scharfer Dünenkamm
- Voraussetzung: mäßige Sandzufluss,

Windrichtung dreht höchstens bis 20 Grad, fester, vegetationsfreier Untergrund

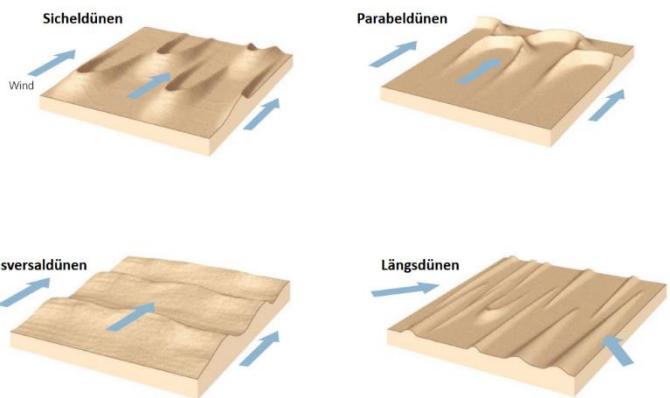
- Sandmasse an Hörnern geringer als in der Mitte: eilen voraus



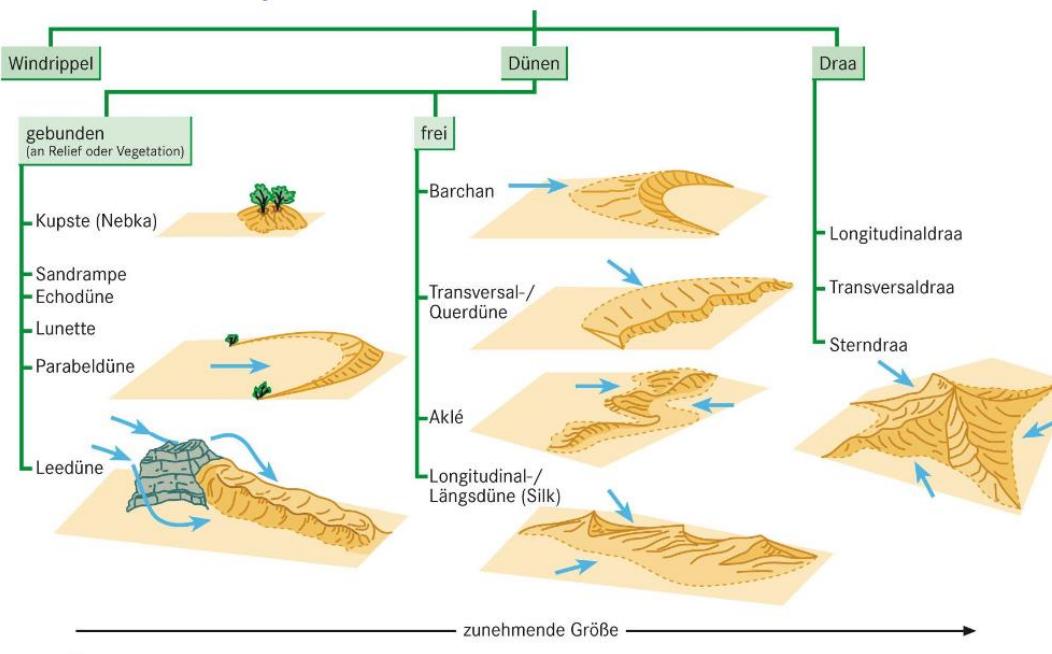
- 1: Sandrampe: Ablagern am Felsen, an Luv: Rückwerfen
- 2: Echodüne: Höhere Windgeschwindigkeit: Rampe weiter davor, Felsen „ertrinken“ nach und nach im Sand



Dünenformen:



Systematik äolischer Akkumulationsformen



- Tamarisken: salzverträgliche Pflanzen: scheiden Salz aus: Sand bleibt kleben
- frei: Mobilität: Wanderdünen
- Draa: Riesendünen (im Pleistozän entstanden)
- Dünen: größere Akkumulationsformen aus Sand
- Windrippel: kleinste äolische Akkumulationsform bilden sich in kurzer Zeit durch Reibung und Turbulenzen