



uni

Universität  
Augsburg  
University

Vorlesung

# Physische Geographie Teil 1

## Teilgebiet Geomorphologie

Prof. Dr. Andreas Philipp

# Geomorphologie

---

## Inhalt

1. Einführung, Erdaufbau und Gesteine
2. Endogene Dynamik: Tektonik, Vulkanismus, Erdbeben
3. Exogene Formungssysteme: **Verwitterung & Karst,**  
Massenbewegung, Fluvial, Glazial & Periglazial, Äolisch, Litoral
4. Großformen des Reliefs
5. Klimatische Geomorphologie

# Verwitterungsprozesse

## Was ist Verwitterung?

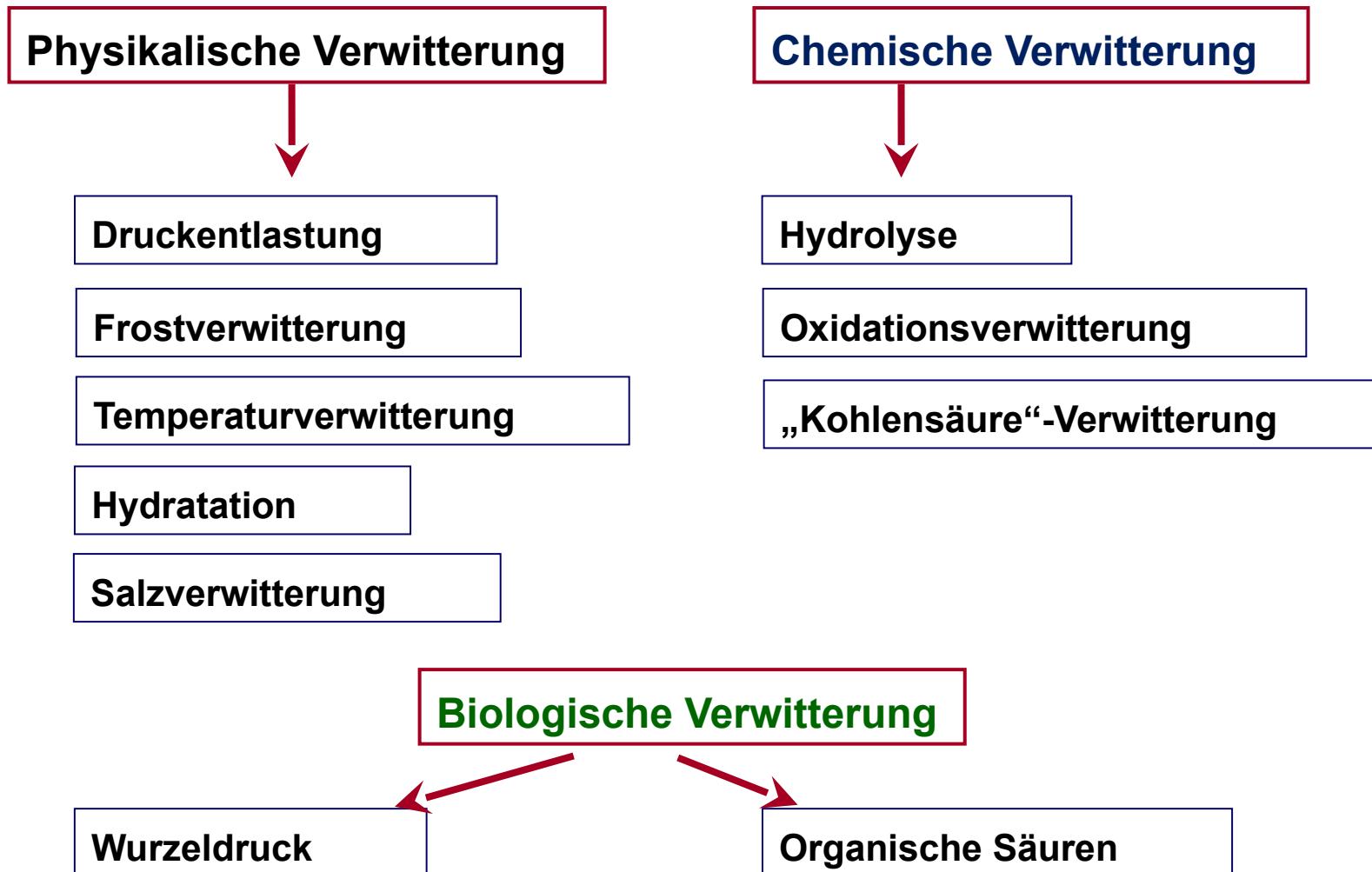
### Definition:

Verwitterung ist die **Aufbereitung, Veränderung, Zerstörung und Umwandlung** von Gesteinen und Mineralien im Bereich des **oberflächennahen Untergrundes** unter den Bedingungen der Atmosphäre

- Voraussetzung für **Transport (Erosion i.e.S.) & Sedimentation**
- Voraussetzung für **Bodenbildung**
- Voraussetzung für **Pflanzenwachstum**
- Verwitterung ist **Anpassung** der Gesteine an Umweltbedingungen

# Verwitterung

## Arten der Verwitterung



# Verwitterung

## Druckentlastung



**Exfoliation** von Granit durch Druckentlastung

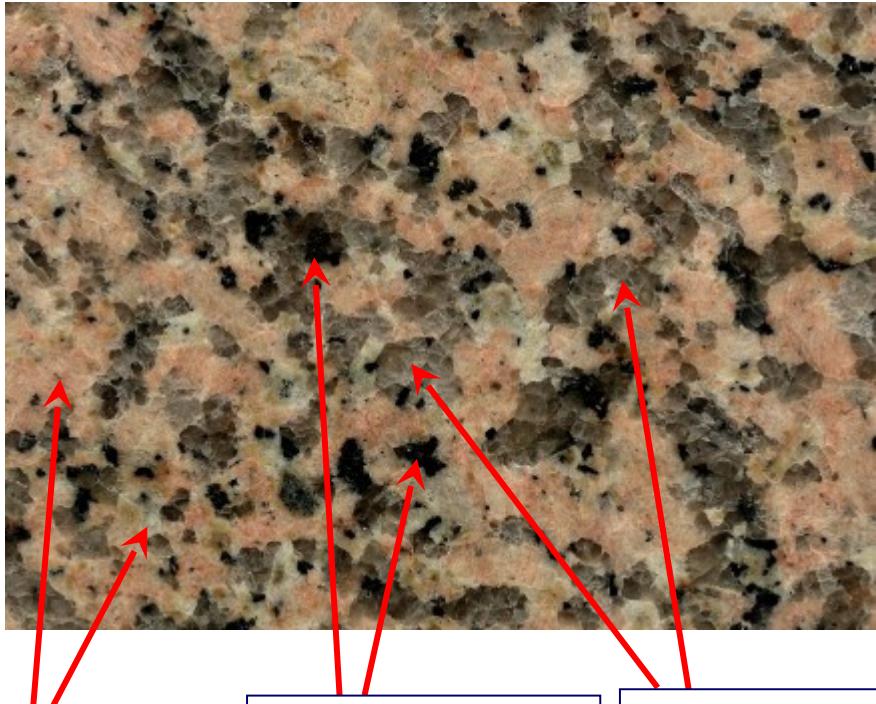
Haarrisse aufgrund von  
Druckentlastung

- Durch Erosion werden Gesteine von **Auflast** befreit
- Folge: Gesteine **dehnen** sich aus
- Folge: im Gestein entstehen feine **Risse**
- Haarrisse sind **Ansatzpunkte** für die weitere Verwitterung



# Verwitterung

## Insolations-/Temperaturverwitterung



- Starke Temperaturschwankung auf Oberfläche
- Folge: Abschälung/Abschuppung  
= **Desquamation**

- Jeder Festkörper dehnt sich bei **Temperaturzunahme** bei Einstrahlung aus
- Ausdehnung ist **materialspezifisch**
- Minerale haben unterschiedliche **Ausdehnungskoeffizienten**



# Verwitterung

## Insolations-/Temperaturverwitterung

Desquamation



Exfoliation



(oft auch in Kombination von Insolations- mit Druckentlastung & Frostsprengung)

# Verwitterung

## [Äolische Verwitterung / Korrasion / Abrasion]

Oft nur zu Erosion gezählt, nicht zu Verwitterung!

Windgetragene Partikel (Staub, Sand) zerstören Gesteinsoberfläche



**Windschliff**  
Hoher Atlas, Marokko  
(Spirifer Minerals)



**Tafoni**  
Kalkfelsen  
Oase Farafra, Ägypten  
(Christine Schul)



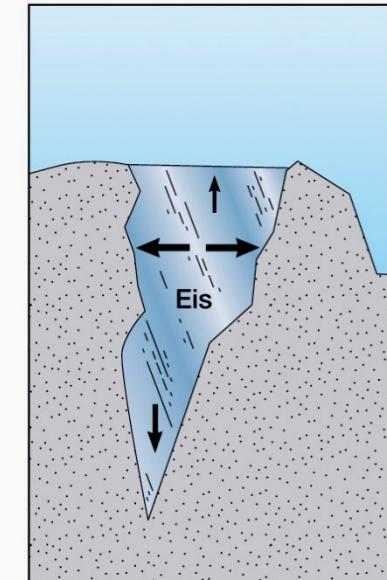
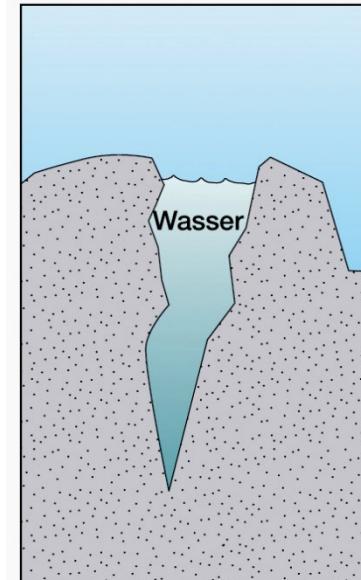
**Windkanter**  
Brunsberg, Lüneburger Heide  
(Gerhard Schöne)

**[vgl. ebenso Marine Korrasion / Abrasion]**

# Verwitterung

## Frostverwitterung

- Frostverwitterung beruht auf der **Ausdehnung** von Wasser beim Gefrieren um 9 %
- Der **Kristallisationsdruck** beträgt bis  $2100 \text{ kg/cm}^2$
- Unter Abschluss besonders wirksam

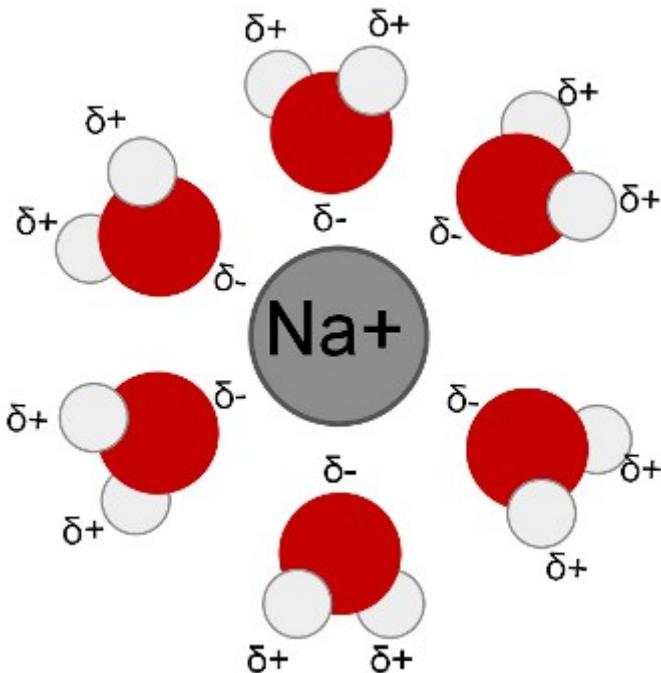


Mc Knight & Hess (2009)

- Resultat ist **scherbig- kantiger Gesteinsschutt**
- Dominant im Hochgebirge und in polarer Zone → **Frostschnittzone**

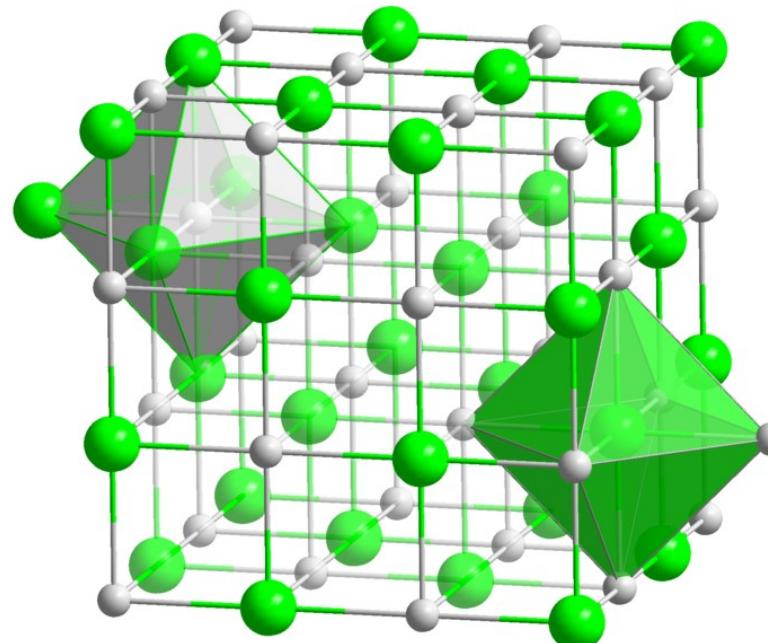
# Verwitterung

## Hydratationsverwitterung



Hydratisiertes  $\text{Na}^+$ -Kation

- Wassermoleküle **umlagern** Anionen und Kationen
- Mineralverband wird **aufgelöst**
- Prozess ist **reversibel**
- **Keine chemische Veränderung !**

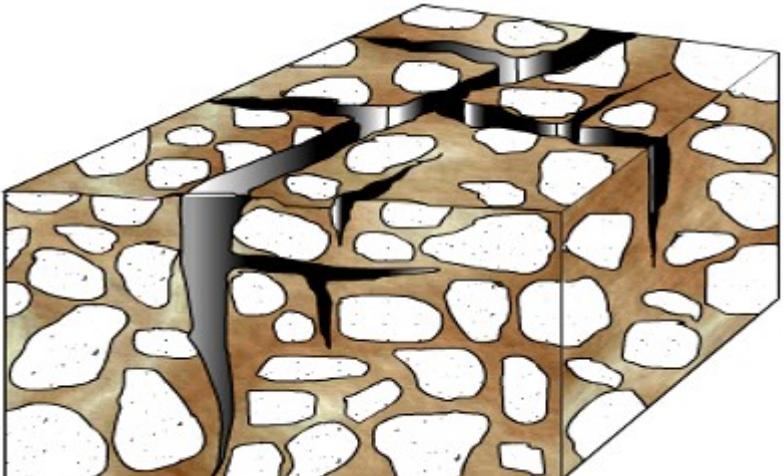


Kubisches Kristallsystem von Halit ( $\text{NaCl}$ )

# Verwitterung

## Salzverwitterung

- In ariden Gebieten Anreicherung von **Salzen** an der Oberfläche
- Salze **kristallisieren** auch aus gesättigten Lösungen im Gestein
- Dabei entsteht **Kristallisationsdruck**
- **Salzsprengung**: Druck wie bei Frostverwitterung

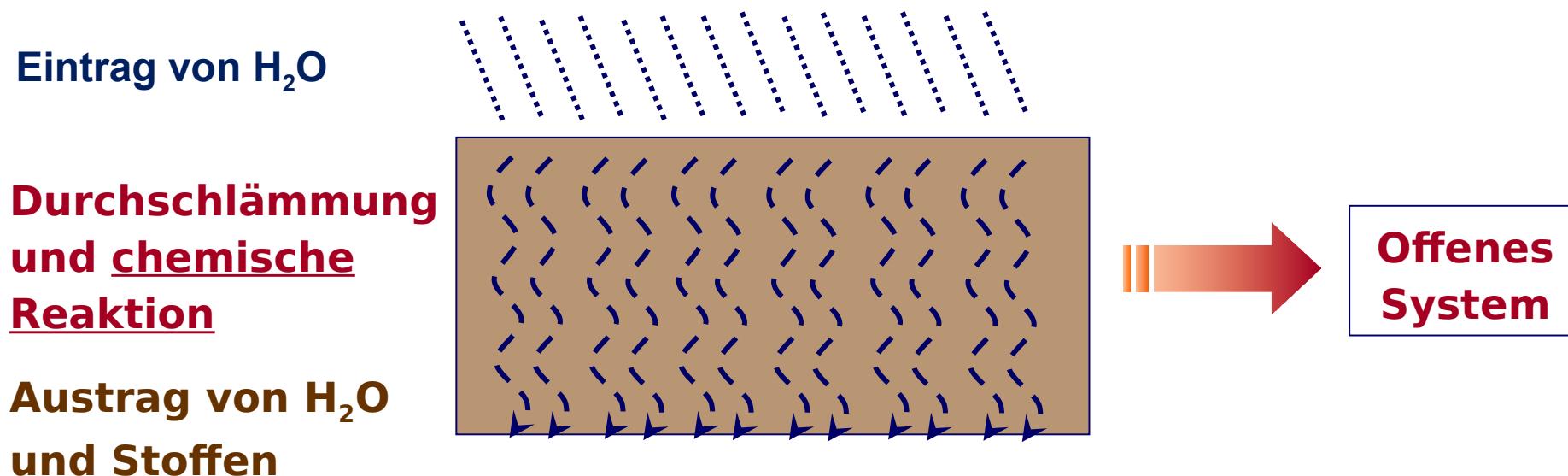


- Salze im Gestein wachsen bei **Wasseraufnahme** (z.B.  $\text{CaSO}_4$  (Gips),  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (Glaubersalz))
- Dabei **hydratisieren** Salze (quellen) → hoher Quellungsdruck!
- Schutt ähnlich Frostschnitt → **Formenkonvergenz**

# Verwitterung

## Chemische Verwitterung

- Bei der chemischen Verwitterung findet eine **stoffliche Veränderung** des Ausgangsmaterials statt
- Abhängig vom Ausgangsmaterial
- Abhängig von **Wasserverfügbarkeit** und **Wasserqualität** (pH, O<sub>2</sub>-Gehalt)
- Chemische Verwitterung vor allem in **offenen Systemen** wirksam



# Verwitterung

## Voraussetzung für Hydrolyseverwitterung: Selbstdissoziation von H<sub>2</sub>O

Reines Wasser liegt zu einem gewissen Anteil in **dissoziierter Form** ( $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ ) vor.

**amphoteres Verhalten** von Wasser:

Wasser reagiert daher sowohl wie eine **leichte Säure** als auch wie eine **Base** mit den Gesteinen ( $\text{H}^+$  = Wasserstoffkation,  $\text{OH}^-$  = Hydroxid-Anion).

### Das Ionenprodukt von Wasser (const. für best. Temperatur)

$$\text{Konz. } \text{H}^+ * \text{Konz. } \text{OH}^- = 1,008 * 10^{-14} \text{ Mol}^2 \cdot \text{l}^2$$

falls: Konz.  $\text{H}^+$  = Konz.  $\text{OH}^-$  (neutral: Säureaktivität = Basenaktivität)

$$\text{Konz. } \text{H}^+ = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1} = 0,0000001 \text{ mol/l}$$

pH = -log(H<sup>+</sup>) = **negativer** dekadischer Log der H<sup>+</sup>-Konzentration → **pH = 7**

→ **pH von reinem Wasser pH 7**

# Verwitterung

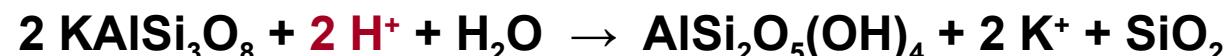
## Verwitterung durch Hydrolyse = z.B. Silikatverwitterung

### Was sind Silikate?

Silikate sind die Salze der **Ortho-Kieselsäure** ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ )

- Silikate sind die **häufigsten Minerale** der Erdkruste (90%). Beispiele: Quarz, Feldspat, Glimmer, Olivin, Kaolin, ...
- Silikatgesteine werden alle **Gesteine** genannt, die aus Silikat-mineralien aufgebaut sind (z.B. Granit, Schiefer, Quarzsandstein)

Hydrolyse von **Feldspäten**, Beispiel Orthoklas:



Orthoklas

Kaolin

Verwitterung eines Feldspates, **Ionenaustausch**, Bildung von Kaolin, Freisetzung von K und Abfuhr von  $\text{SiO}_2$

# Verwitterung

## Oxidationsverwitterung

- Betrifft vor allem die **Oxidation** und **Reduktion** von Fe und Mn
- Bei Sauerstoffzutritt **Elektronenabgabe**
- Übergang von 2-wertiger in 3-wertige Form ( $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ : rotbraun) → Zerstörung der Kristallgitter



- Oxide sind **voluminöser**
- Scheiden sich ab

Die Oxide und Oxidhydrate des Eisens sind:

**Brauneisenerz/Limonit**  $\text{FeO(OH)} \cdot \text{H}_2\text{O}$

**Goethit**     $\text{FeO(OH)}$

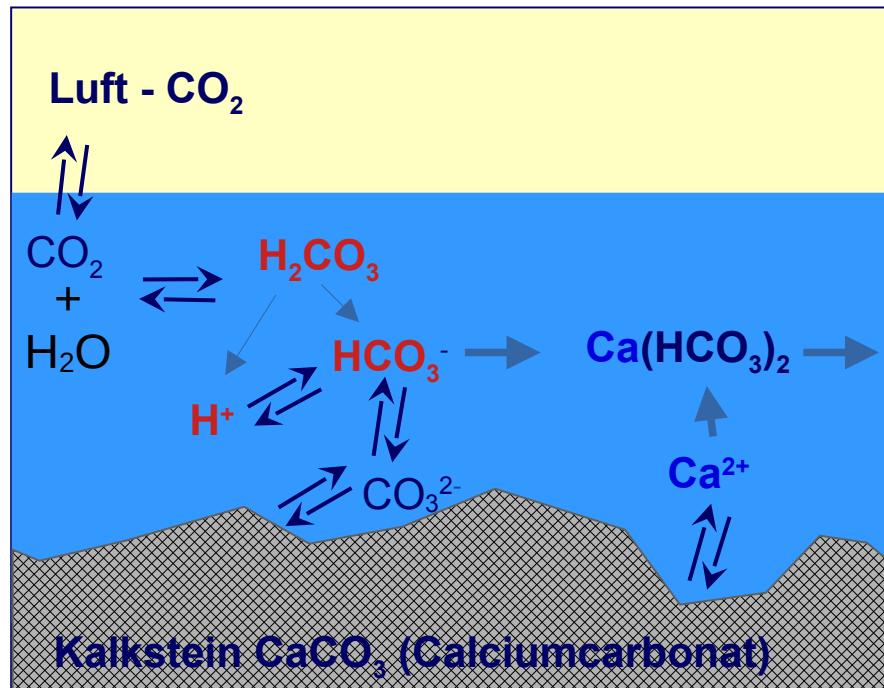
**Hämatit**     $\text{Fe}_2\text{O}_3$

# Verwitterung

## Kohlensäureverwitterung



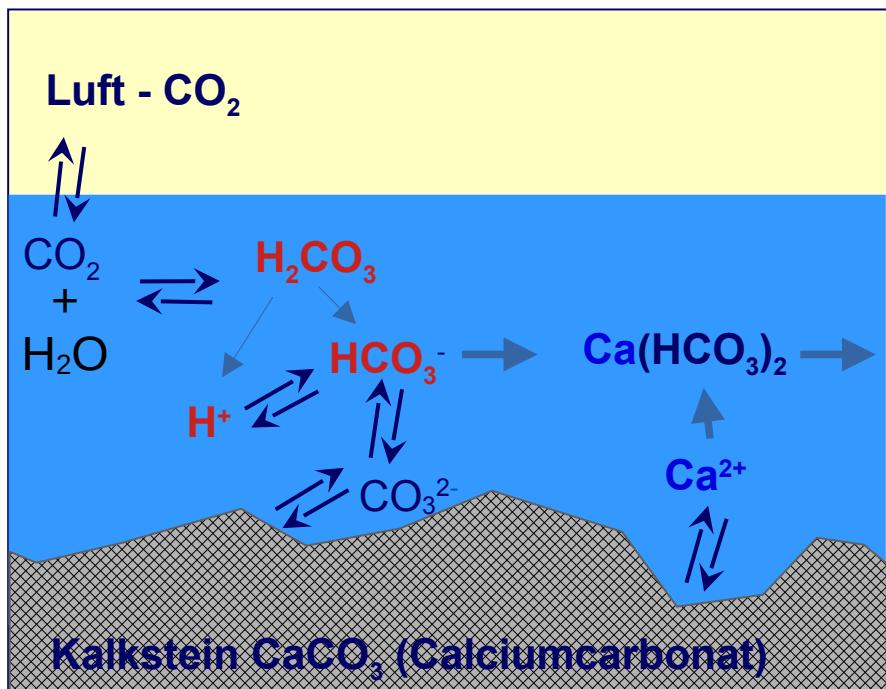
- Die Atmosphäre enthält ca. **0,041 % CO<sub>2</sub>**
- CO<sub>2</sub> löst sich **physikalisch** in H<sub>2</sub>O (s. Mineralwasser)
- Teil davon verbindet sich **chemisch** zu **H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**
- **H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Kohlensäure)** liegt als starke Säure **dissoziiert** vor



- Kalkstein CaCO<sub>2</sub> zerfällt durch **Hydratation** in Ca<sup>2+</sup> und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Carbonatanion)
- Ca<sup>2+</sup> verbindet sich mit **HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** zu **Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>** **Hydrogencarbonat** (wasserlöslich)
- Kohlensäure führt zur **Beschleunigung** des Prozesses (Protonenangebot)
- Folge sind **rasche Lösungsprozesse** und Lösungsformen auf Kalk

# Verwitterung

## Kohlensäureverwitterung



- Kalkstein CaCO<sub>2</sub> zerfällt durch **Hydratation** in Ca<sup>2+</sup> und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Carbonatanion)
- Ca<sup>2+</sup> verbindet sich mit HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> **Hydrogencarbonat** (wasserlöslich)
- Kohlensäure führt zur **Beschleunigung** des Prozesses (Protonenangebot)
- Folge sind **rasche Lösungsprozesse** und Lösungsformen auf Kalk

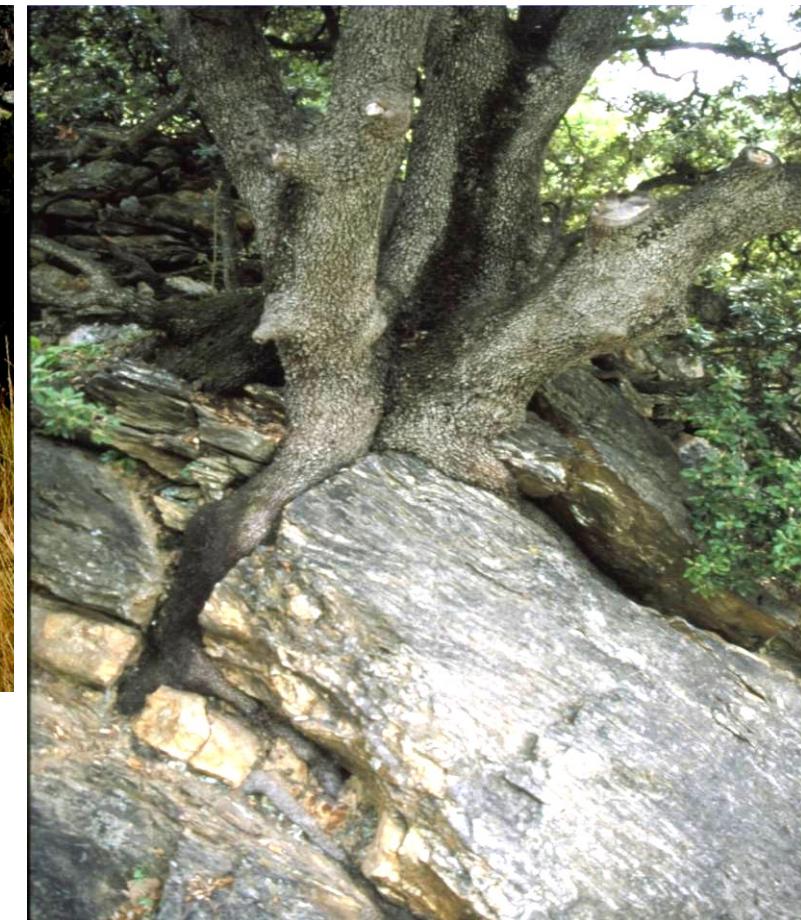
# Verwitterung

## Biologische Verwitterung

durch:

a) Freisetzung organischer Säuren durch Pflanzenwurzeln → chemische Lösung von Nährstoffen aus Gestein → Zerfall der Kristallgitter

b) Mechanische Beanspruchung von Gesteinsmaterial durch Wurzeldruck

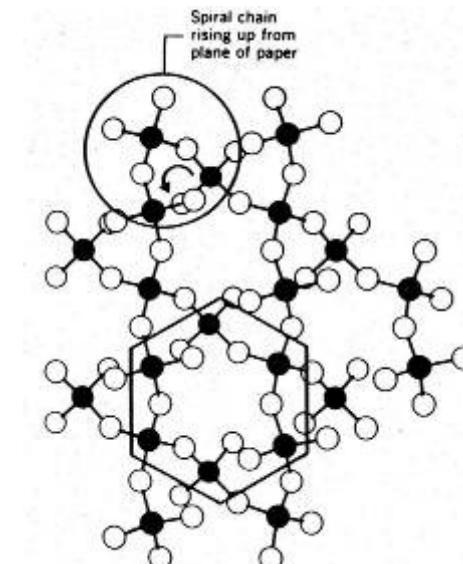
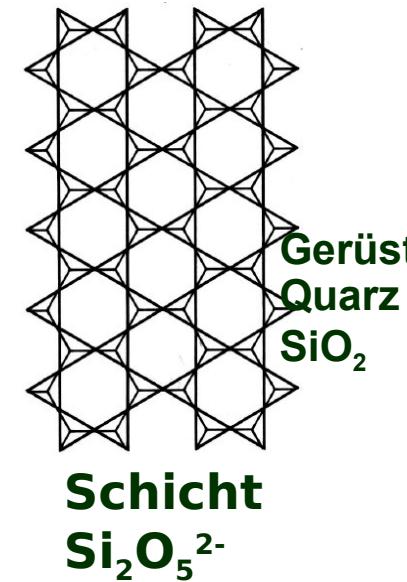
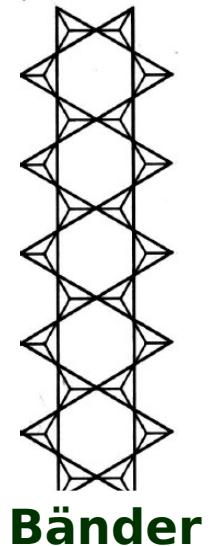
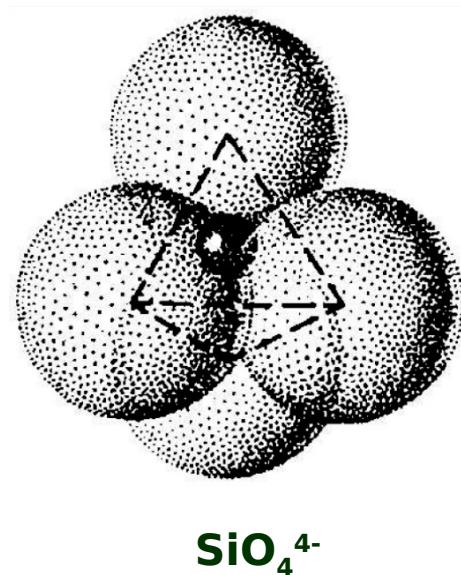


Bsp: **Flechten** sind Lebensgemeinschaften von Algen und Pilzen. Durch Säuren erfolgt **Lösung** von Nährstoffen aus dem Gestein

# Verwitterung

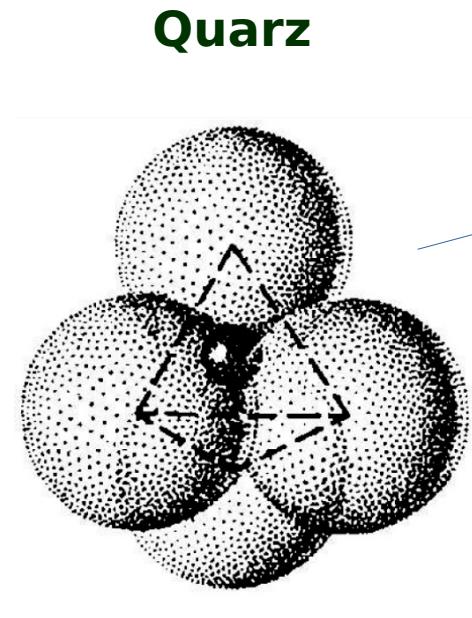
## Verwitterungsresistenz:

- Gesteine verwittern **unterschiedlich schnell** (vgl. historische Gebäude)
- **Verwitterungsgeschwindigkeit** hängt von gesteinsbildenden Mineralien ab:
  - **Spaltbarkeit** der Minerale (Kristallgitter)
  - **Wasserlöslichkeit** (leicht lösliche Salze > Gips > Calcit > Dolomit)
  - **Struktur** der Silikate
  - Fe(II)-Gehalt → **Oxidierbarkeit** (Biotit > Muskovit)



# Verwitterung

## Resistenz gegen Verwitterung



### Rangfolge der Verwitterungsanfälligkeit

- |                                  | widerständig | anfällig |
|----------------------------------|--------------|----------|
| Eisenoxide                       |              |          |
| Aluminiumoxide                   |              |          |
| Quarz                            |              |          |
| Tonminerale                      |              |          |
| Muskovit (weißer Glimmer)        |              |          |
| Orthoklas (Kalifeldspat)         |              |          |
| Biotit (schwarzer Glimmer)       |              |          |
| Albit (Natronfeldspat)           |              |          |
| Amphibole                        |              |          |
| Pyroxene                         |              |          |
| Plagioklase (Kalknatronfeldspat) |              |          |
| Anorthit (Kalkfeldspat)          |              |          |
| Olivin                           |              |          |

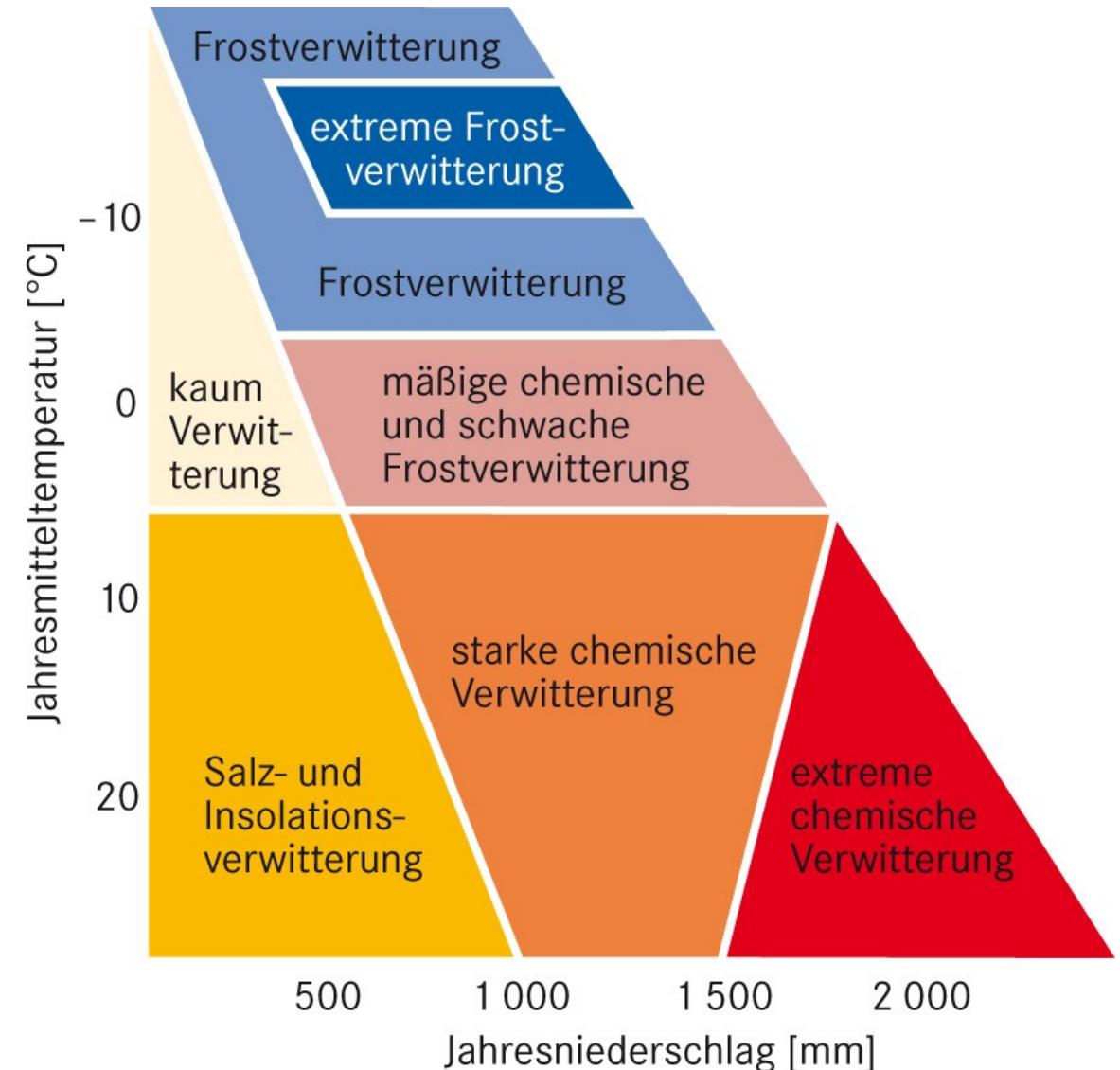
widerständig

anfällig

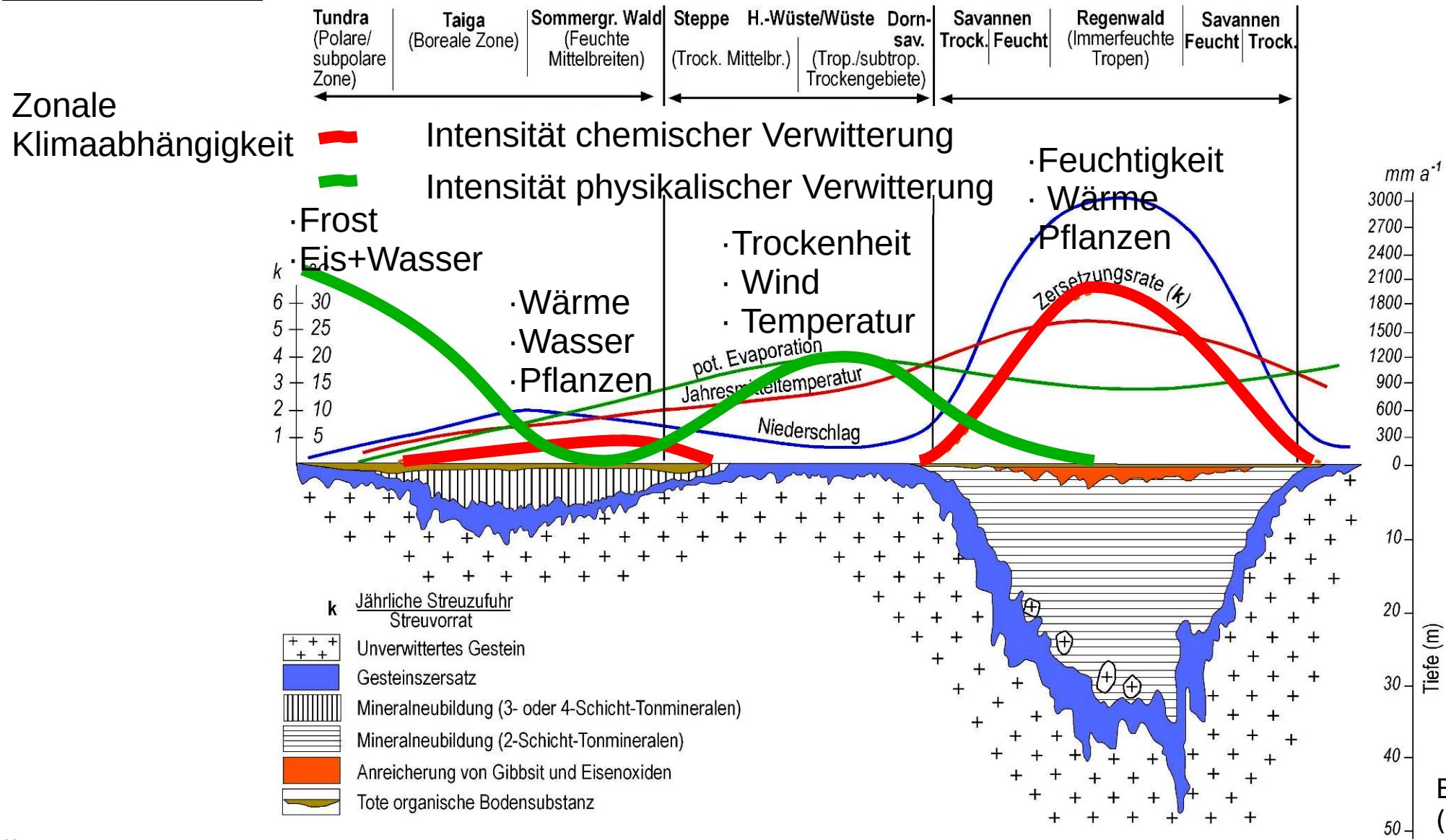
# Verwitterung

## Klimaabhängigkeit der Verwitterung:

- Art der Verwitterung abhängig von **Temperatur & Wasserverfügbarkeit**
- **Chemische** Verwitterung mit **Feuchte & Temperatur** zunehmend
- Frostverwitterung vor allem bei **Frostwechsel & Feuchte**
- „Salzverwitterung“ bei **Trockenheit**



# Verwitterung



## 4.2 Verwitterung und Klima

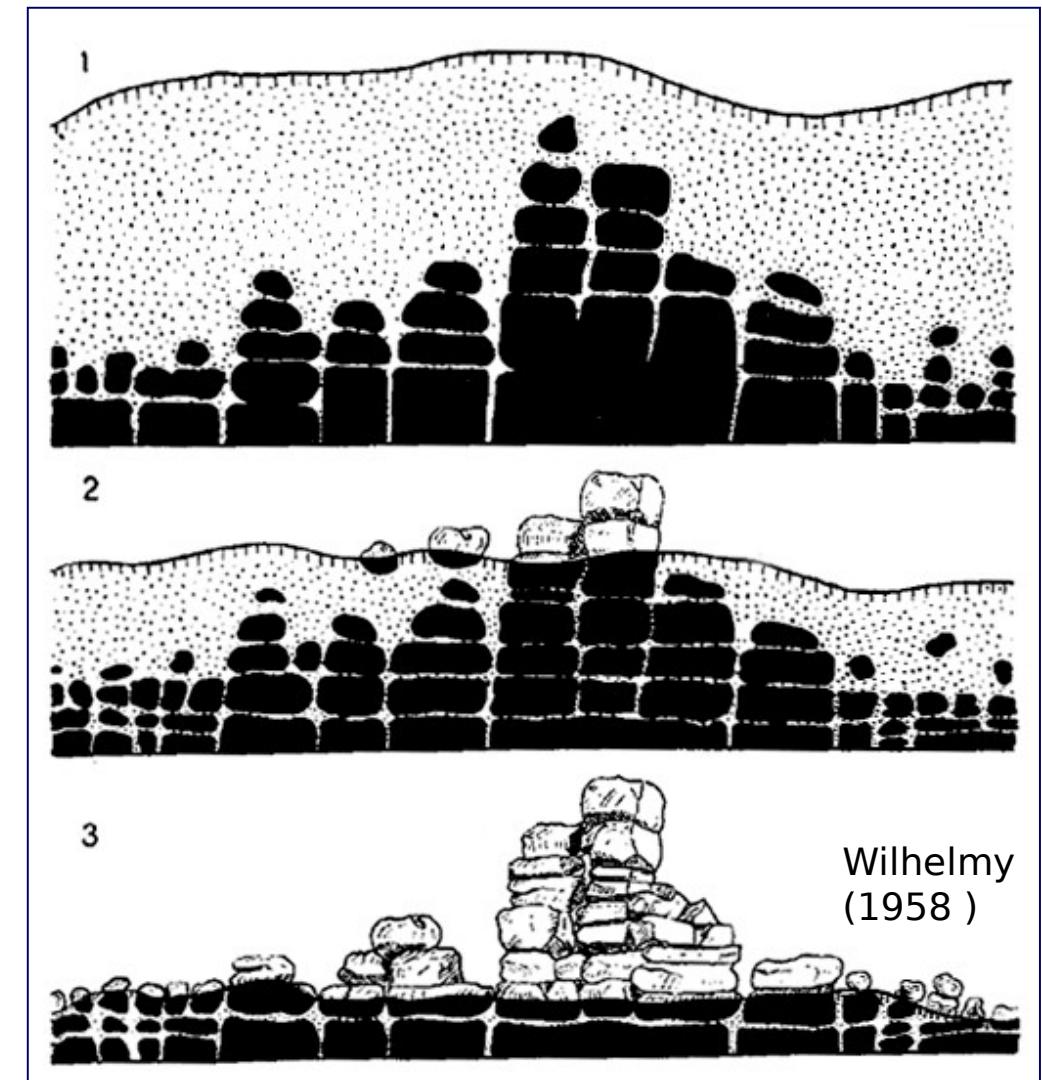
### Landschaften mit chemischer Verwitterung



# Verwitterung

## Wollsackverwitterung und Felsburen

- Chemische Verwitterung des Gesteins läuft unter **Boden-bedeckung** ab
- **Freilegung** des angewitterten Festgestein durch Erosion z.B. bei Klimawandel (Trockenheit)
- Weitere physikalische Verwitterung

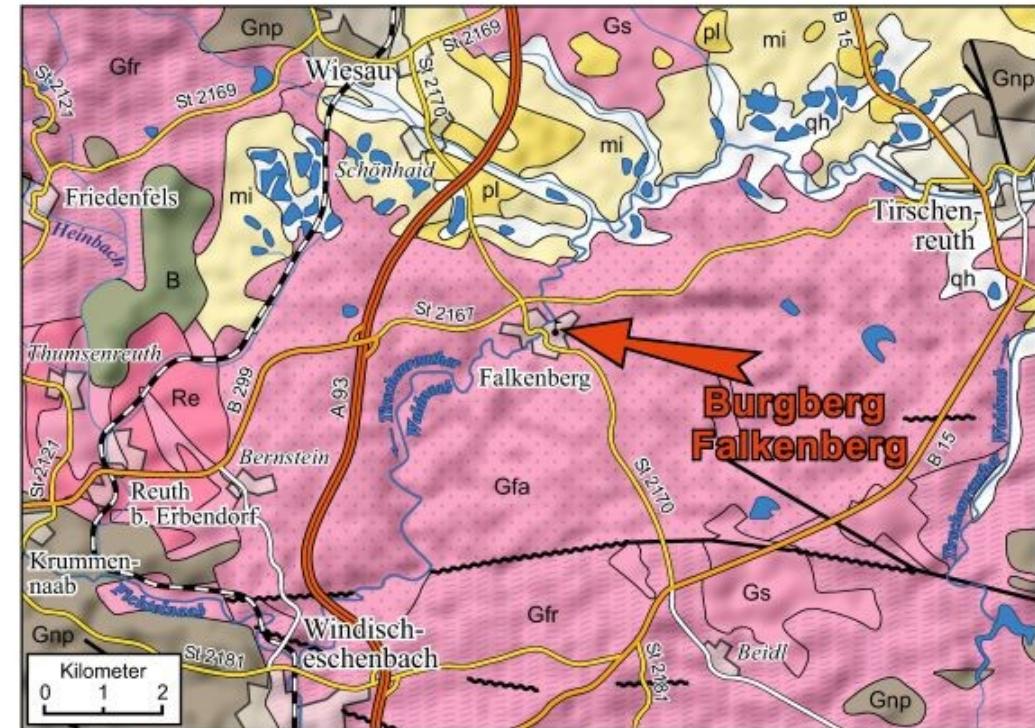
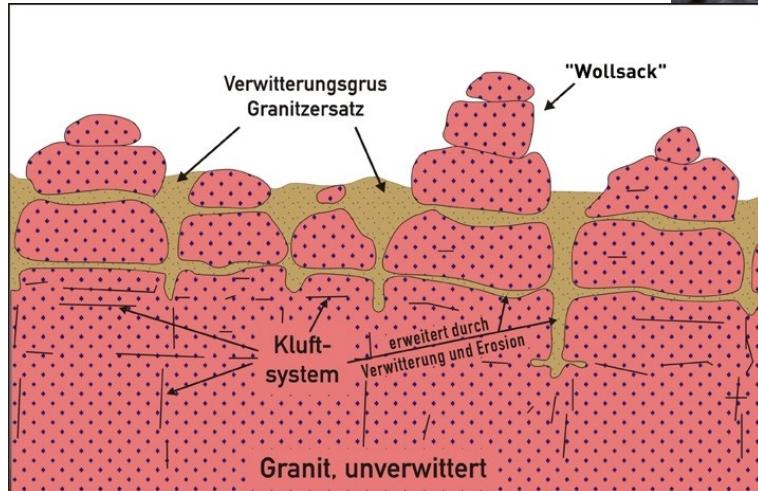


# Verwitterung

## Wollsackverwitterung und Blockmeere

Beispiel Geotop  
Falkenberg

Verwitterung  
v.a. im Tertiär



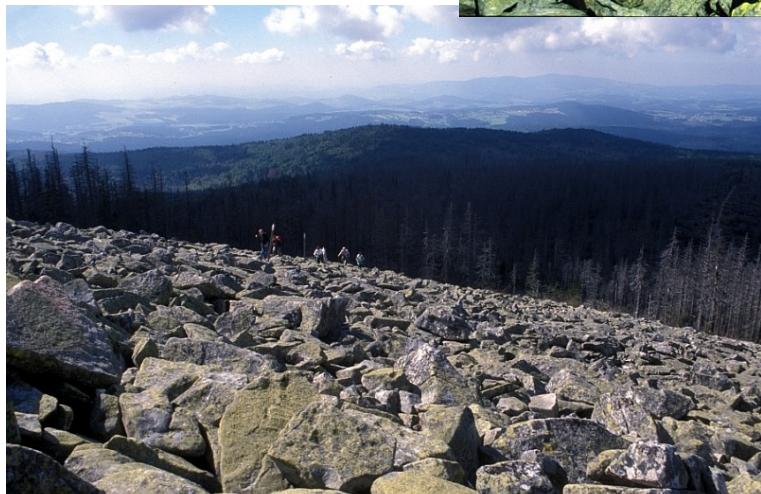
Geologische Karte der Umgebung des Burgberges Falkenberg

Quärtär	qh	Talboden und jüngste Ablagerungen	
	pl	Pliozän	
Tertiär	mi	Miozän	
	B	Basalt	
Erdaltertum	Gs	Steinwald-Granit	
	Gfr	Friedenfelser Granit	
	Gfa	Falkenberger Granit	
	Re	Granodiorit–Diorit (z. T. Redwizit)	
	Gnp	Metamorphe Sedimentgesteine	

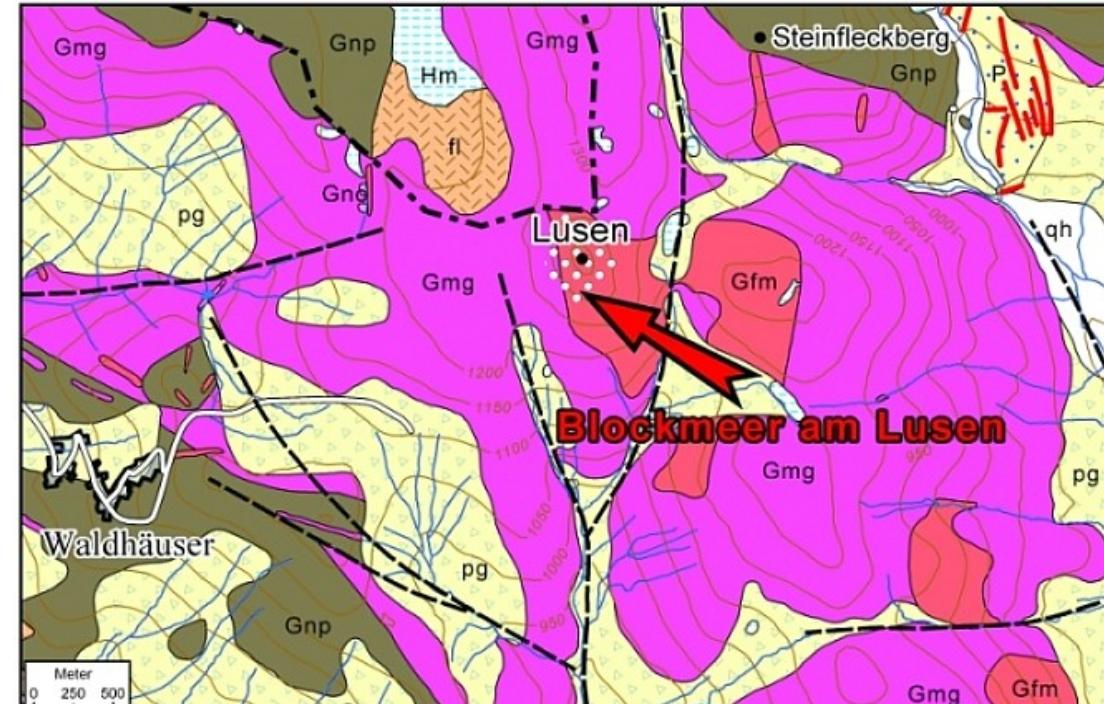
# Verwitterung

## Wollsackverwitterung und Blockmeere

Beispiel Geotop  
Blockmeer am  
Lusen (Bayer.  
Wald)



Verwitterung  
im Tertiär



Geologische Karte der Umgebung des Blockmeeres am Lusen

Hm	Anmoor oder Torf	Siedlungsfläche (über Geologie)
qh	Talboden und jüngste Ablagerungen	Gewässer
fl	Blockfeld	—350 Höhenlinie
pg	Fließerde	Störung nachgewiesen/vermutet
P.	Eiszeitlicher Schutt	Moränenwall
	Moräne	Landesgrenze
Gfm	Fein- bis mittelkörniger Granit	
Gmg	Mittel- bis grobkörniger Granit	
Gna	Metamorphe Magmatite	
Gnp	Metamorphe Sedimente	

# Geomorphologie

---

## Inhalt

1. Einführung, Erdaufbau und Gesteine
2. Endogene Dynamik: Tektonik, Vulkanismus, Erdbeben
3. Exogene Formungssysteme: Verwitterung & Karst,  
Massenbewegung, Fluvial, Glazial & Periglazial, Äolisch, Litoral
4. Großformen des Reliefs
5. Klimatische Geomorphologie

## Karst - Begriffsbestimmung

### Definition:

**Karst** ist ein **Sammelbegriff**, unter dem verschiedene Sachverhalte verstanden werden

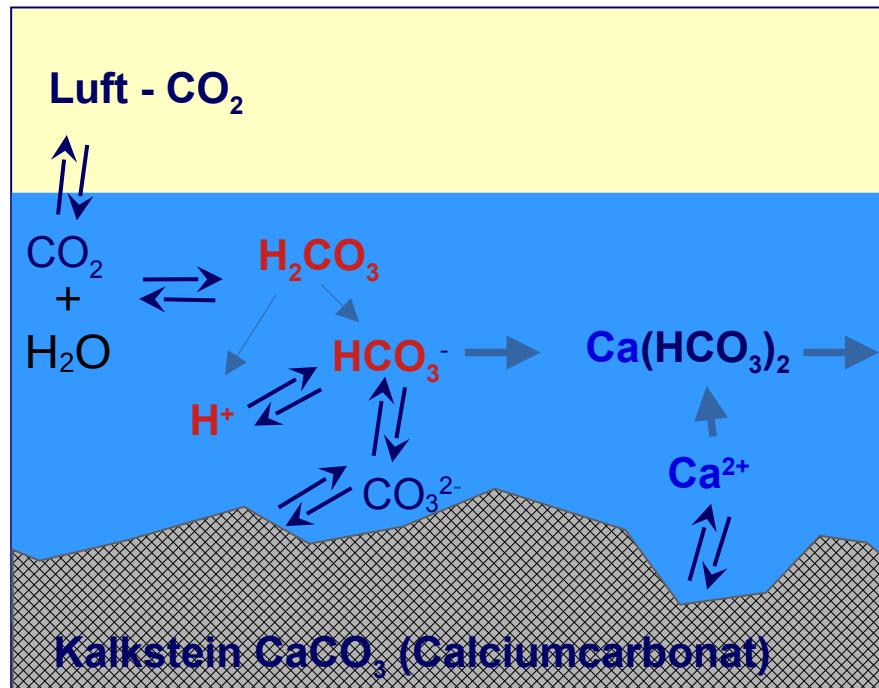
1. Der **Gebirgsname** für eine bodenarme Kalkgesteinslandschaft im südlichen Slowenien
2. Eine **Landschaftsbezeichnung** für Kalksteinlandschaften mit geringmächtigen Böden und typischen Oberflächenformen
3. Ein **geomorphologischer Landschaftstyp**, der von **Karstformen** und den entsprechenden **Karstprozessen** geprägt wird und vor allem an **lösungsähige Karbonatgesteine** gebunden ist

# Karst

## Kohlensäureverwitterung



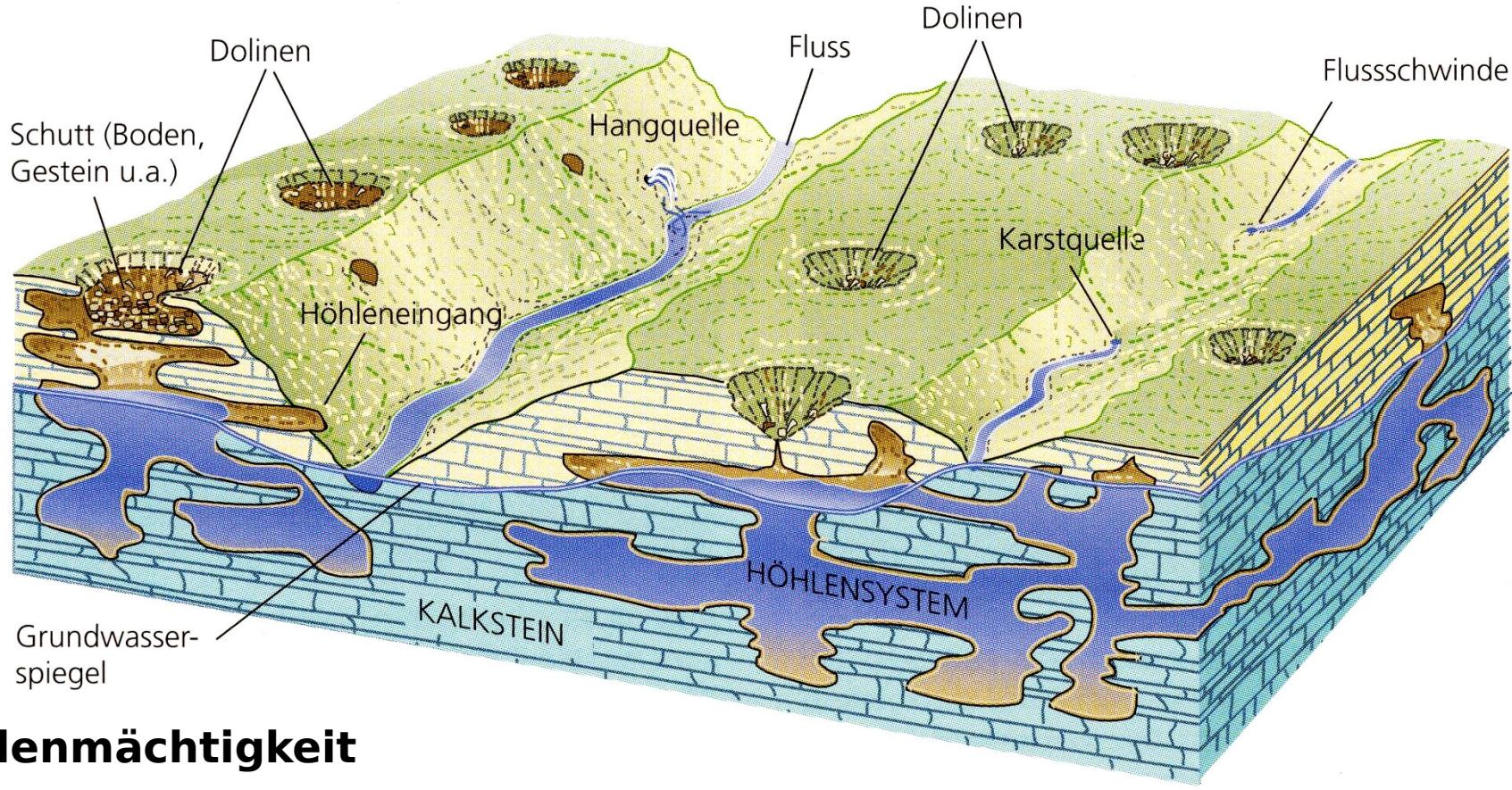
- Die Atmosphäre enthält ca. **0,041 % CO<sub>2</sub>**
- CO<sub>2</sub> löst sich **physikalisch** in H<sub>2</sub>O (s. Mineralwasser)
- Teil davon verbindet sich **chemisch** zu H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (**Kohlensäure**) liegt als starke Säure **dissoziiert** vor



- Kalkstein CaCO<sub>2</sub> zerfällt durch **Hydratation** in Ca<sup>2+</sup> und CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Carbonatanion)
- Ca<sup>2+</sup> verbindet sich mit HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> **Hydrogencarbonat** (wasserlöslich)
- Kohlensäure führt zur **Beschleunigung** des Prozesses (Protonenangebot)
- Folge sind **rasche Lösungsprozesse** und Lösungsformen auf Kalk

# Karst

## Merkmale von Karstlandschaften



Press & Siever (2003)

- oft geringe **Bodenmächtigkeit**
- **Gewässerarmut** an der Oberfläche
- Charakteristische **Klein- und Großformen**
- **Flussschwinden** und **Karstquellen**

- **Höhlensysteme** im Untergrund
- Heterogene **Grundwasserhöhen**

# Karst

## Karst - Begriffsbestimmung

### Oberirdischer Karst

#### Nackter Karst

Kleinformen (Karren)

Großformen:

- Schlucklöcher
- Dolinen u. Uvalas
- Poljen

#### Bedeckter Karst

Kleinformen

Großformen

### Unterirdischer Karst

alle unterirdischen Erscheinungen:

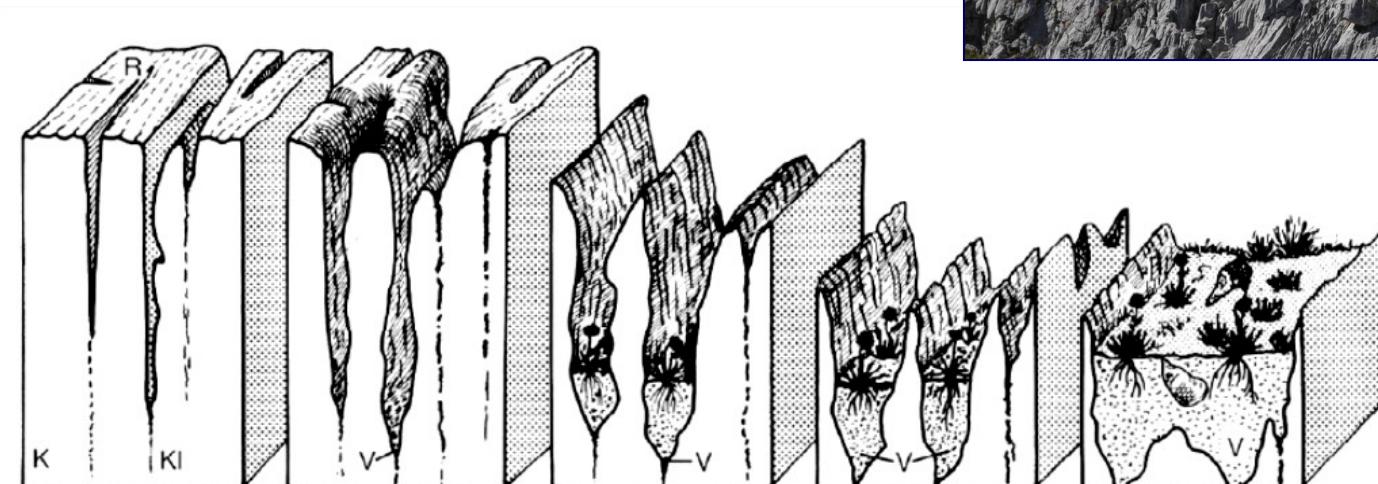
- Höhlen
- Schlotte
- Tropfsteine
- Gewässer
- ...

Klimatische  
Differenzierung der  
Karstformen      Karsthydrologie

# Karst

## Kleinformen des Karstes

- Zu den **Kleinformen** zählen alle Erscheinungen an der Oberfläche von Gesteinen
- Dimension Zentimeter bis Meter
- Oberbegriff „**Karren**“ (Rillen, Rinnen)
- Zeigen **raschen Ablauf** des Lösungsprozesses

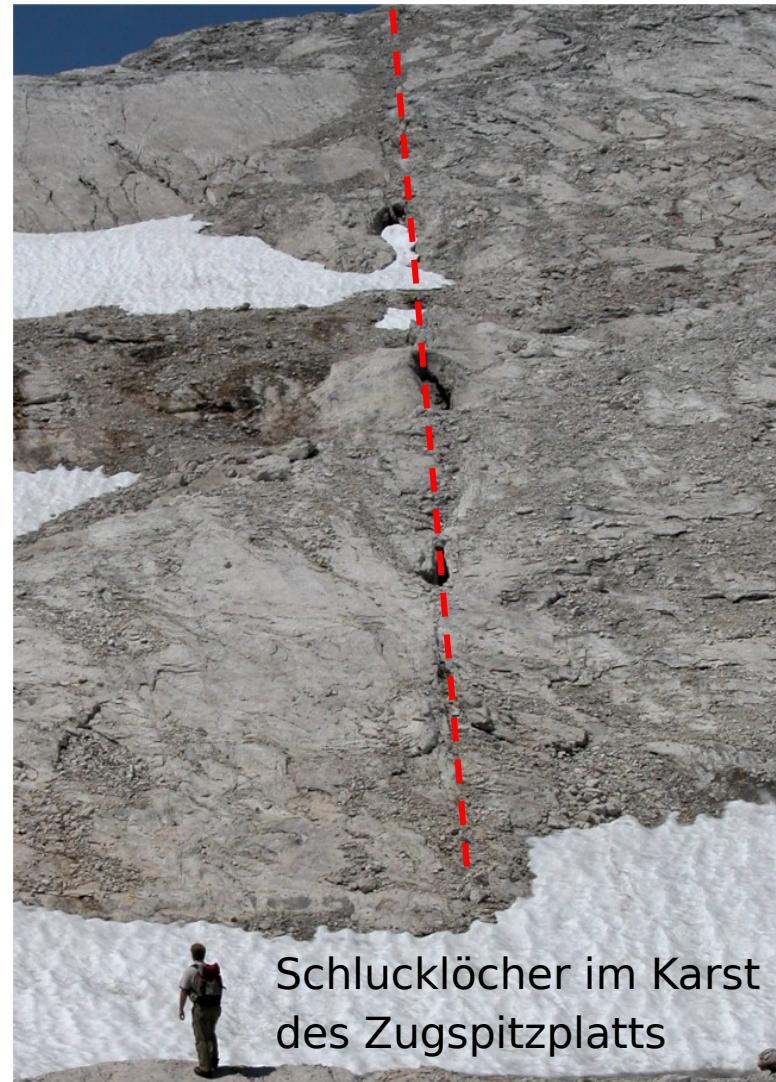


Richter (1992, S. 83)

# Karst

## Großformen des Karstes

- Großformen des Karstes haben die Dimension **Meter bis 10er Kilometer**
- Alle stehen im Zusammenhang mit dem Lösungsprozess
- Über **Schlucklöcher (Ponore)** gelangt das Wasser in den Untergrund
- Ponore können zu **Dolinen** erweitert werden
- Dolinen wachsen zu **Uvalas**
- Dolinen können auch durch **Einsturz** entstehen



Schlucklöcher im Karst  
des Zugspitzplatts

# Karst

## Großformen des Karstes

- Großformen des Karstes haben die Dimension **Meter bis 10er Kilometer**
- Alle stehen im Zusammenhang mit dem Lösungsprozess
- Über **Schlucklöcher (Ponore)** gelangt das Wasser in den Untergrund
- Ponore können zu **Dolinen** erweitert werden
- Dolinen wachsen zu **Uvalas**
- Dolinen können auch durch **Einsturz** entstehen



Unterscheidung: Lösungsdoline versus Einsturzdoline!

Doline bei Obernheim  
(Schwäbische Alb)

# Karst

## Großformen des Karstes

- Großformen des Karstes haben die Dimension **Meter bis 10er Kilometer**
- Alle stehen im Zusammenhang mit dem Lösungsprozess
- Über **Schlucklöcher (Ponore)** gelangt das Wasser in den Untergrund
- Ponore können zu **Dolinen** erweitert werden
- Dolinen wachsen zu **Uvalas**
- Dolinen können auch durch **Einsturz** entstehen

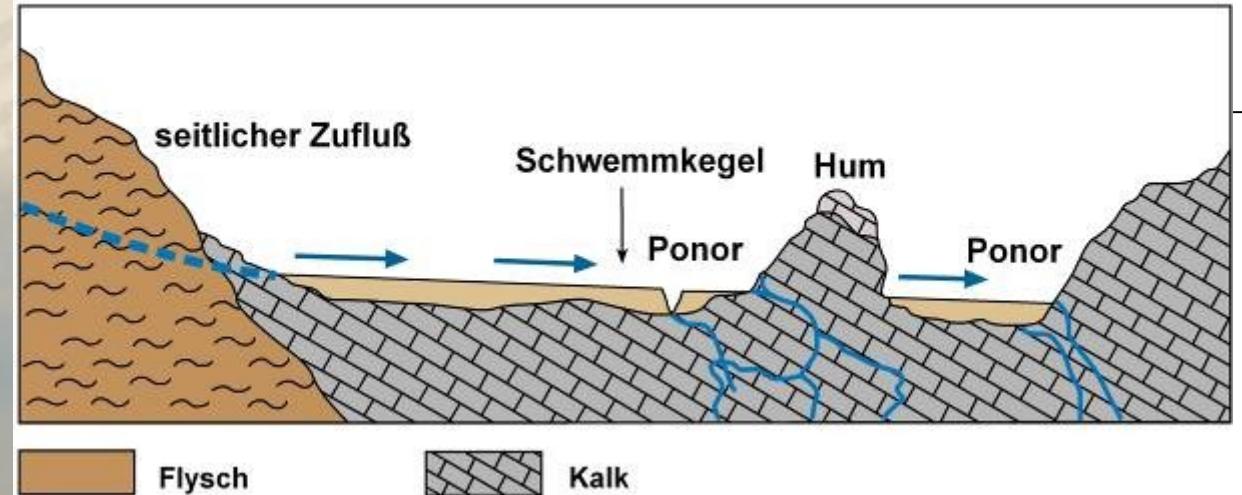


# Karst

## Großformen des Karstes: Poljen



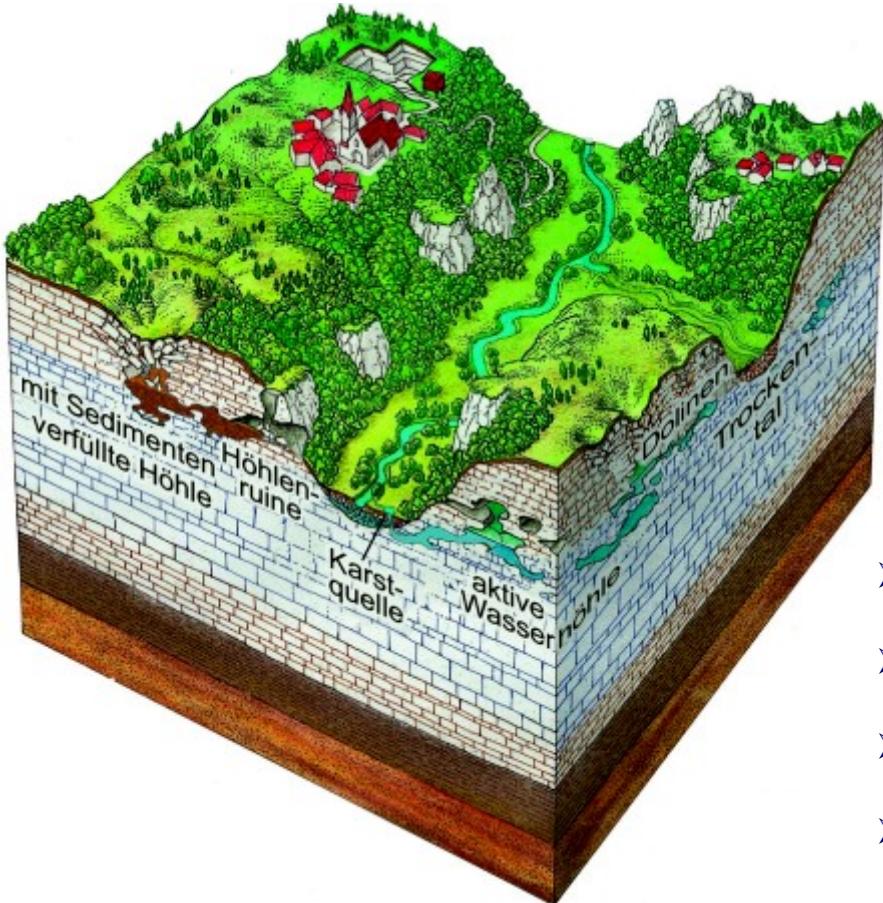
Schema der Entstehung eines Poljes  
(aus WILHELMY 1994, nach H. LOUIS und N. GÜLDALI)



Poljen: beckenartige geschlossene Hohlformen  
Boden aus lehmigem Lösungsrückstand → Landnutzung!  
Häufig episodische Überflutung bei Regenfällen / Poljenseen  
Poljen oft von Flüssen durchlaufen (Karstquellen und Ponore)  
Durch laterale Lösung Wachstum der Poljen

# Karst

## Trockentäler



- **Trockentäler** sind häufig in Karstgebieten
- Oberflächengewässer versiegen im Gewässerverlauf
- → **unterirdische Entwässerung**
- Wasserführung nur nach Niederschlägen

# Karst

## Flussschwinden

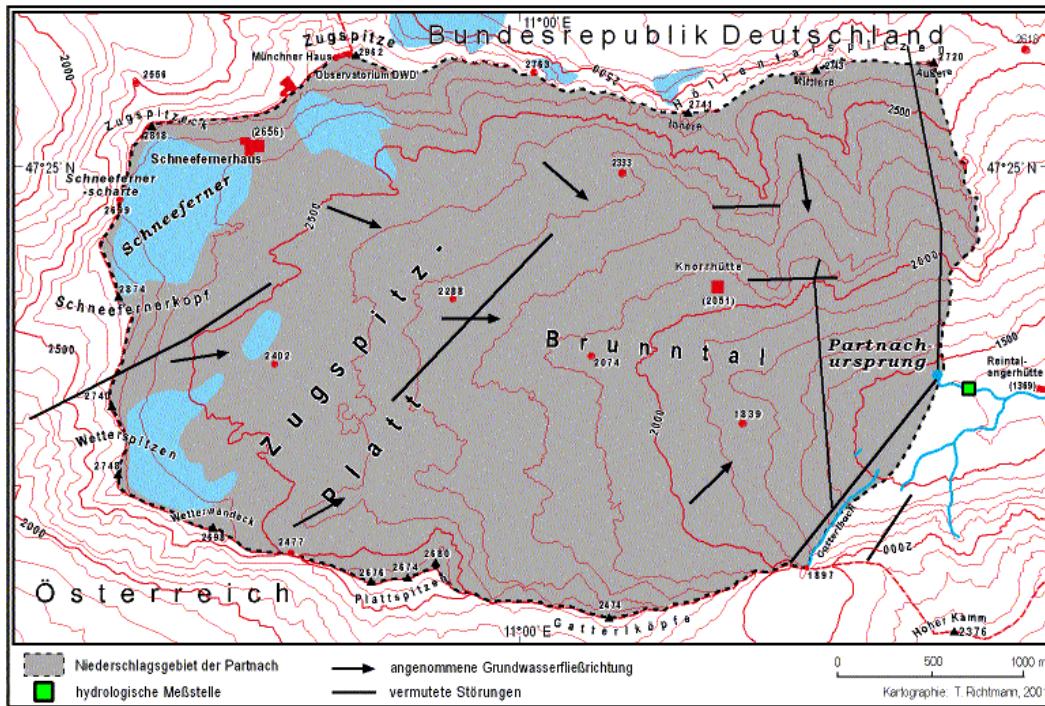


- In Karstgebieten können Flüsse abschnittsweise versickern
- die Austritte erfolgen an **Karstquellen** in anderen Gebieten
- In Deutschland sind der **Aachtopf** und der **Blautopf** die bekanntesten Beispiele für solche Quellen

# Karst

## Karstquellen

- Karstquellen zeichnen sich durch starke **schwankende Wasserführung** aus
- Auch im Hochgebirge gibt es Karstquellen



- Die größte Karstquelle in den deutschen Alpen ist der **Partnach-Ursprung**
- Die Schüttung schwankt zwischen wenigen 100 l und mehr als 10 m<sup>3</sup>/s

# Karst

## Ausfällung von Kalk

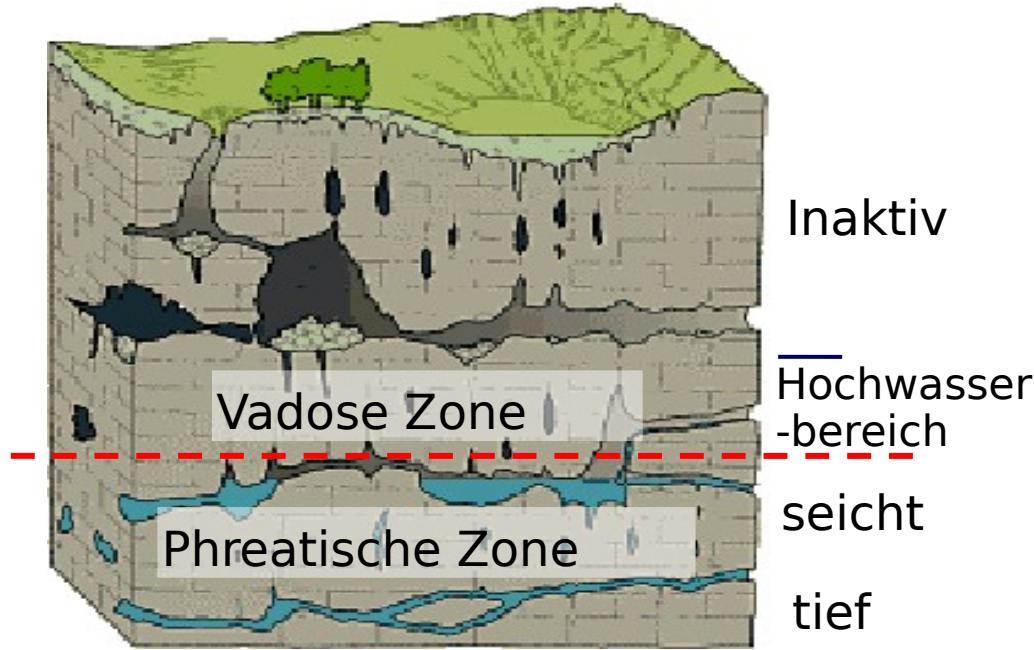
- Bei Änderung des Ca- und CO<sub>2</sub>-Gleichgewichts erfolgt **Fällung** von Kalk → Kalktuff
- Änderung des Gleichgewichts bei **Temperaturzunahme, Druckunterschieden und CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Pflanzen**



- Folge sind **Kalksinter** und **Quellkalke**
- Auftreten an **Quellen**, in **Flussläufen** und in **stehenden Gewässern**

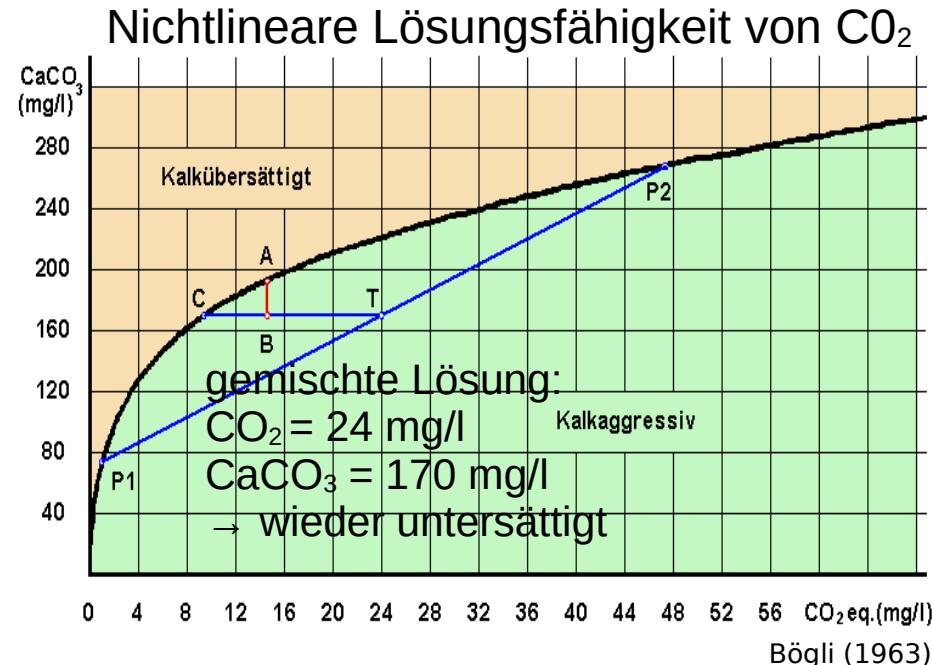
# Karst

## Karsthydrologie



- Der Wasserspiegel steigt in die vadose Zone bei **Hochwasser**
- In der phreatischen Zone erfolgt **Mischungskorrosion**

- In Karstgebieten unterscheidet man verschiedene **Karstwasserzonen** im Untergrund
- Die **vadose Zone** hat freie Hohlräume
- Die **phreatische Zone** ist wassergefüllt



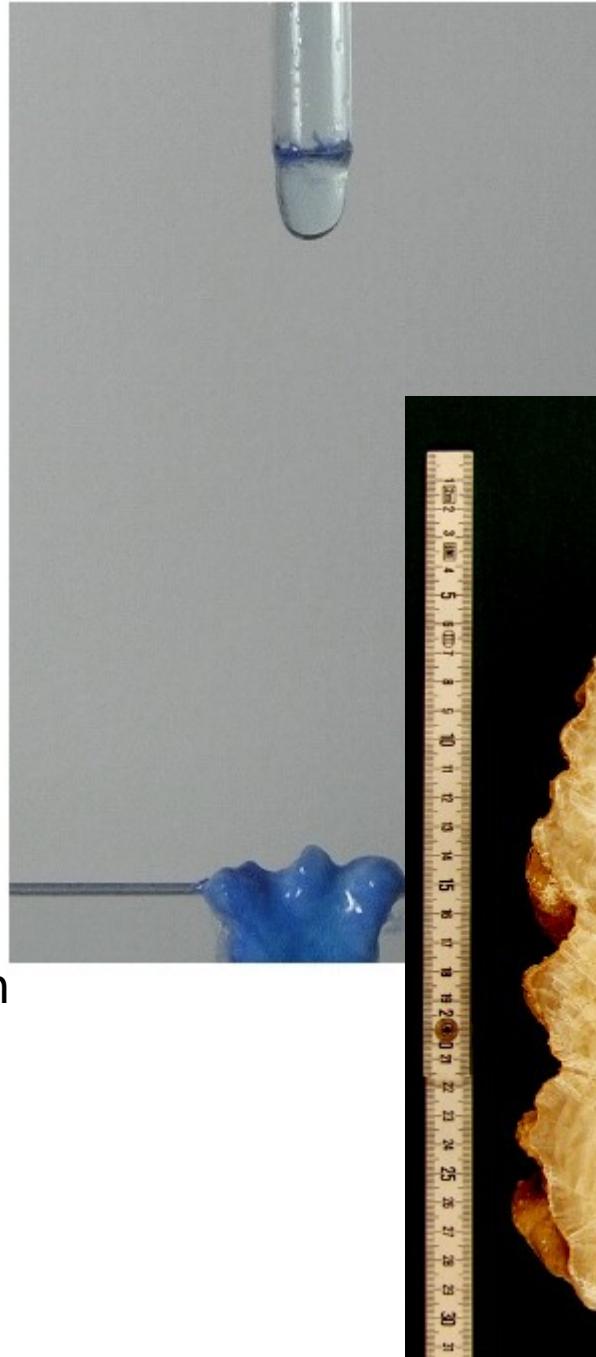
# Karst

## Höhlen im Kalk

- Durch **Kalkfällung** entstehen **Stalaktiten** und **Stalakmiten**



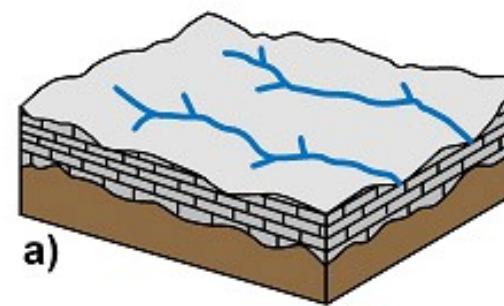
- Die Ausfällung erfolgt beim Ab-reißen und beim Auftreffen der Tropfen
- Ursache sind **Druckänderungen**
- Stalaktiten wachsen in **Schichten**
- Säulen entstehen durch **Zusammen-wachsen**



# Karst

## Tropischer Karst

- Die Entwicklung läuft über lange Zeit als **kontinuierliche Reihe** (Zyklus)
  - Beginnt mit **Cockpit-Karst** a)
  - Läuft über **Kuppen- und Kegelkarst** (b und c)
  - Hin zu **Turmkarst** als Schlussform des Zyklus
- 
- Das **Tiefenwachstum** endet im Niveau des Vorfluters
  - Von da an **laterale Lösung** und Hangversteilung



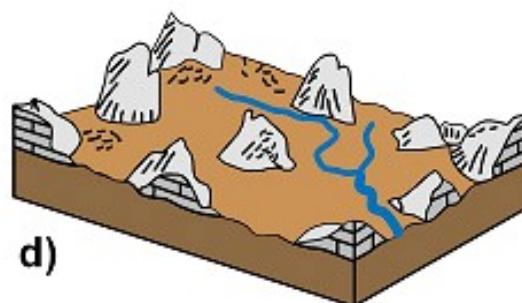
a)



b)



c)



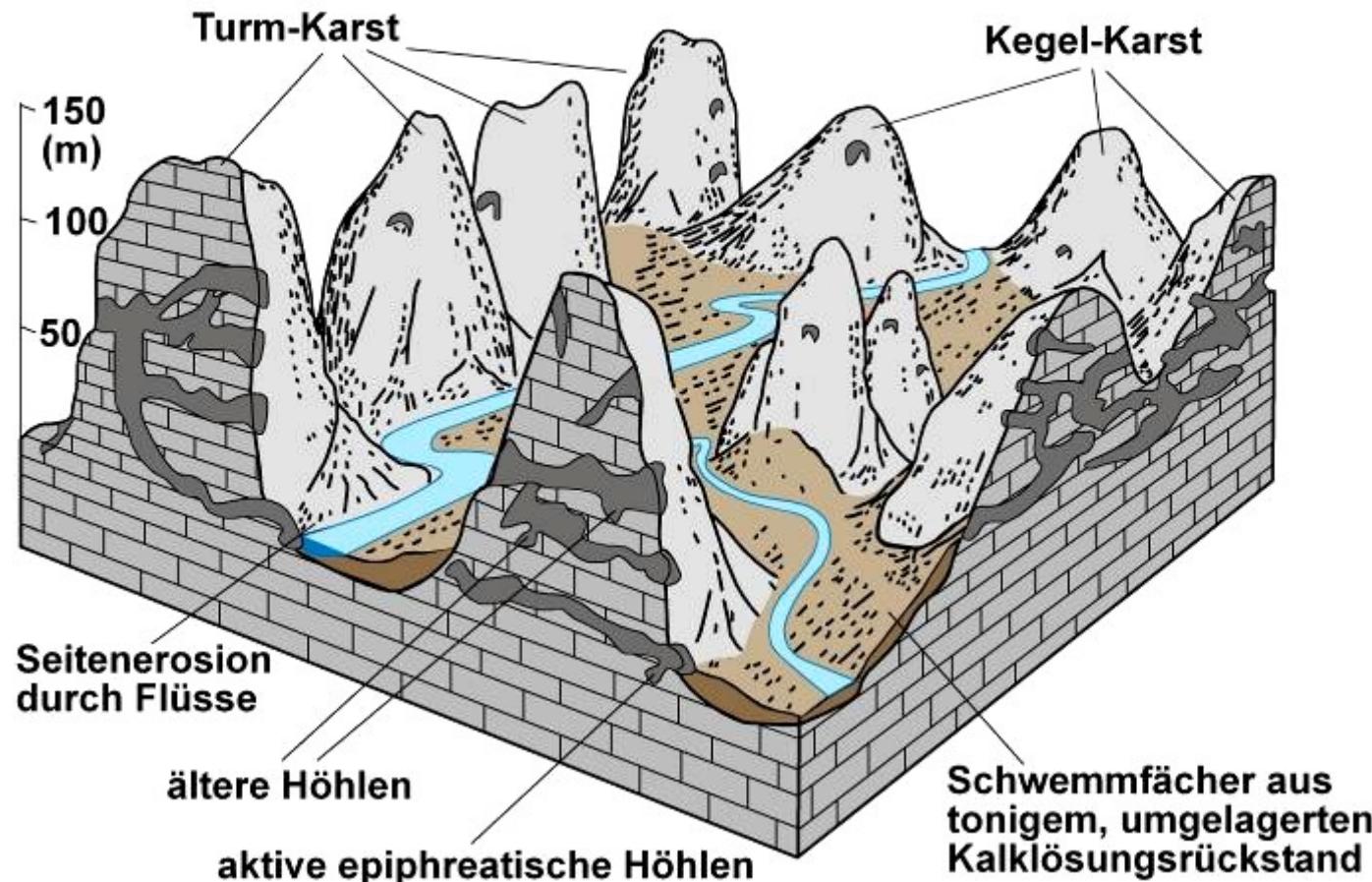
d)

# Karst

## Tropischer Karst

### Formenschatz des tropischen Karstes

(aus ZEPP 2004, nach PRITCHARD 1986)



Hum: Karstinselberg  
→ Mogote in Kuba/USA

# Karst

---



## Literatur zu Karst

Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – Springer, 292 S., Berlin.

Pfeffer, K.-H. (2010): Karst – Entstehung, Phänomene, Nutzung. – Bornträger, 338 S., Stuttgart.

Ford, D.C. & P.W. Williams (2008): Karst geomorphology and hydrology. - Wiley & Sons, 562 S., Chichester.

White, W. B. (1988): Geomorphology and hydrology of karst terrains. - Oxford Univ. Press, 464 S., New York u.a.