

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

- Auflösung von Carbonaten durch Kohlensäure:



schwerlöslich

gut wasserlöslich

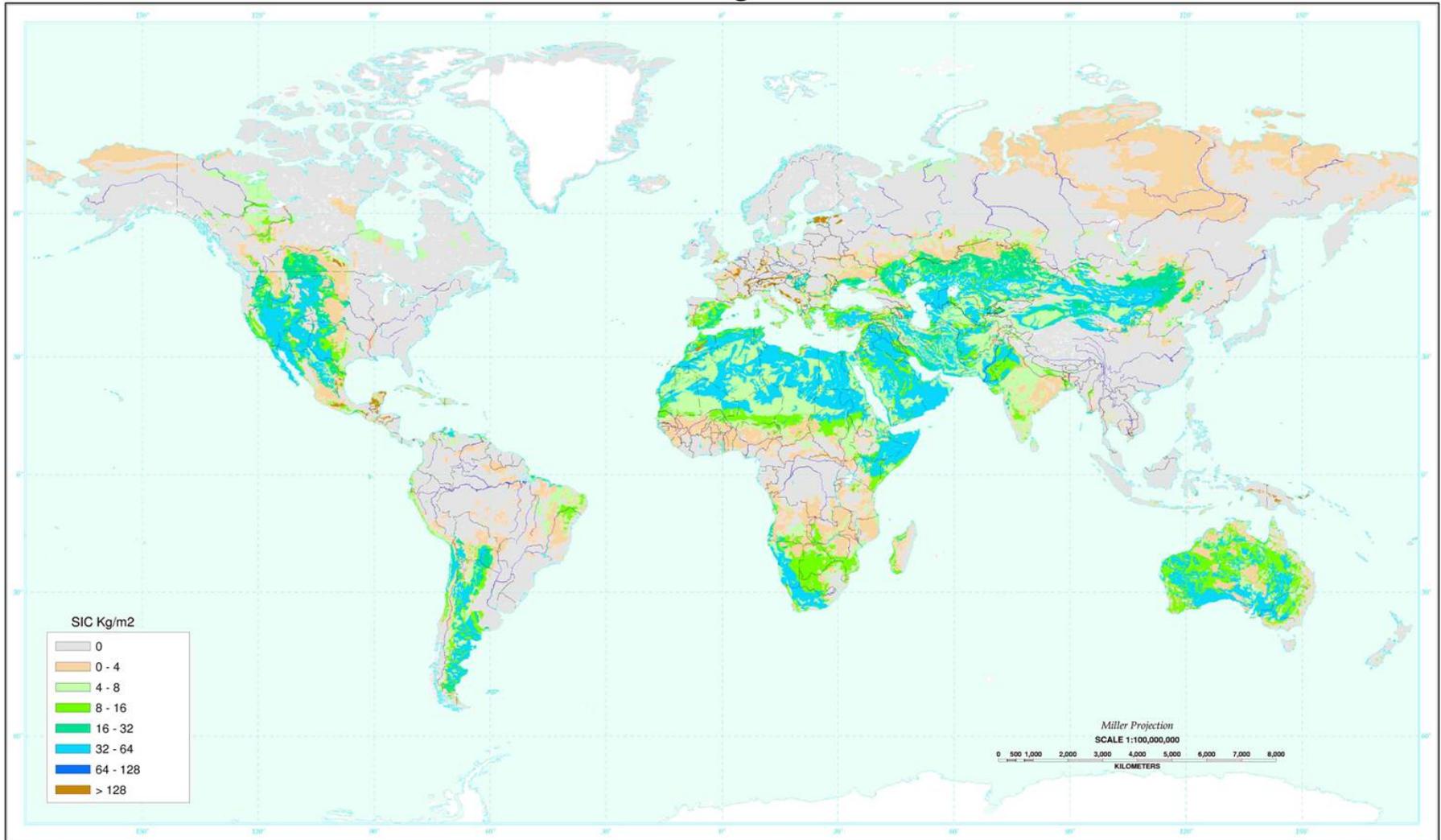
CO₂ aus mikrobieller Atmung und aus Wurzelatmung wird direkt im Boden produziert:

→ gegenüber Atmosphäre um Faktor 10–100 erhöhter
CO₂-Partialdruck im Boden

→ wesentlich schnellere Kalklösung im Boden als an der Luft

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

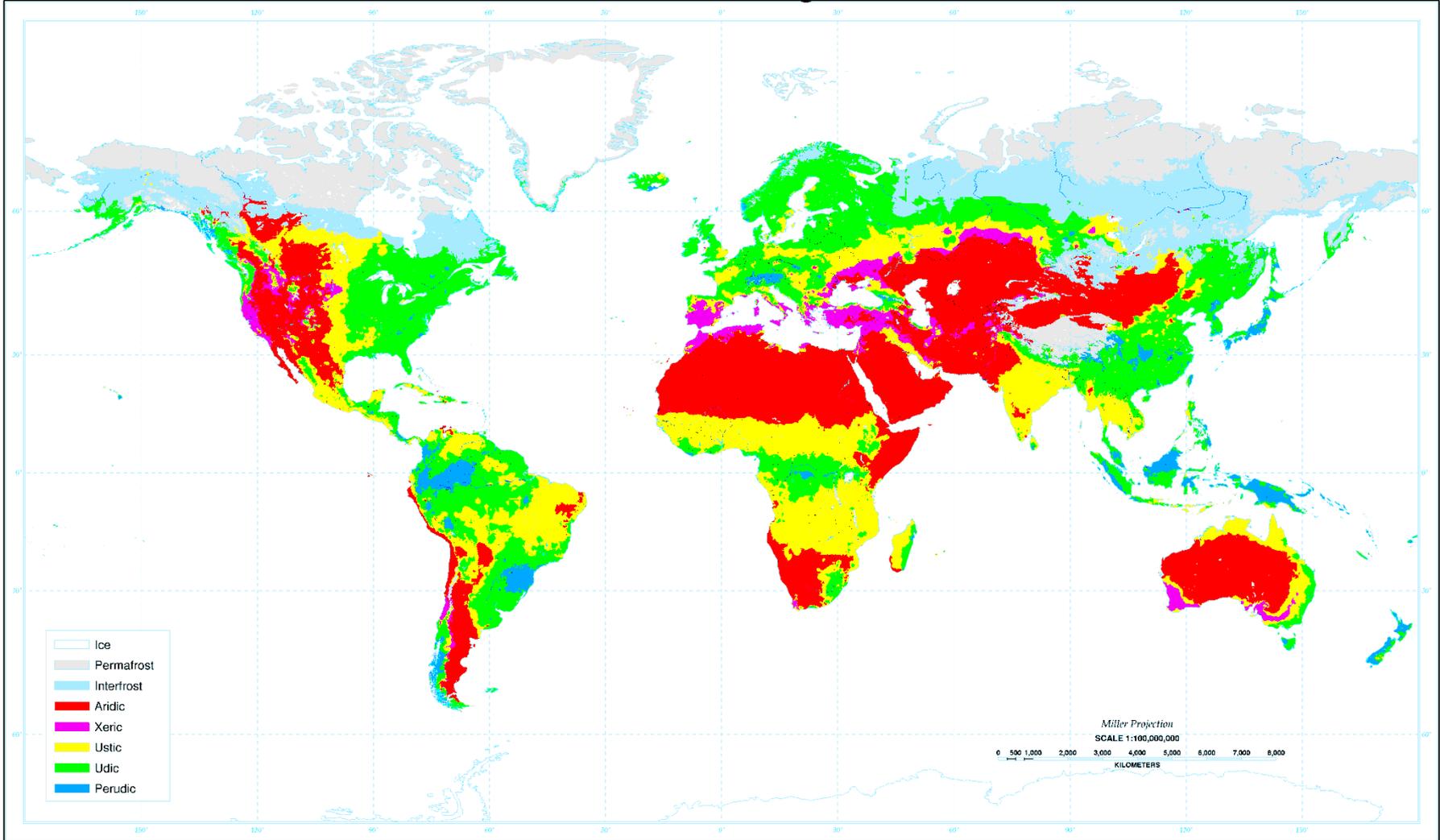
Soil Inorganic Carbon



Bodenbildende Prozesse: Entkalkung: Voraussetzungen: Humides Klima (Udic), Kalk im Ausgangsgestein

U.S. Dept. of Agriculture
Natural Resources Conservation Service
Soil Survey Division
World Soil Resources

Soil Moisture Regimes



Country boundaries are not authoritative.

Washington, D.C. 1988

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

- an feuchte Klimate gebunden
- keine spezifischen Horizontsymbole, die Prozess der Entkalkung anzeigen
- Entkalkung aber wichtige Voraussetzung für andere bodenbildende Prozesse wie Verbraunung, Podsolierung, Tonverlagerung, die in der Horizontsymbol-Systematik berücksichtigt werden
- Carbonat puffert oberhalb pH 6,2!

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

- Carbonatnachweis durch Reaktion mit Salzsäure:



Intensität der Gasentwicklung kann für Abschätzung des Carbonatgehalts verwendet werden

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

Schätzung des Carbonatgehaltes des Feinbodens im Gelände
durch den Test mit verdünnter Salzsäure (10% HCl)

Kurzzeichen	Carbonatgehalt (%)	Bezeichnung	CO ₂ -Entwicklung (hörbar oder sichtbar)
c0	0	carbonatfrei	keine Reaktion
c1	< 0,5	sehr carbonatarm	sehr schwache Reaktion, nicht sichtbar, nur hörbar
c2	0,5–2	carbonatarm	schwache Reaktion, kaum sichtbar
c3	2–10	carbonathaltig	nicht anhaltendes Aufbrausen
c4–c7	> 10	carbonatreich bis extrem carbonatreich	starkes, anhaltendes Schäumen

Bodenbildende Prozesse: Entkalkung

- Carbonatgesteine enthalten variable Anteile silikatischer Komponenten, die als Lösungsrückstand zurückbleiben
- → „**Residualton**“ bildet Feinerde der Böden aus Kalkstein



Terra fusca

<http://www.bildarchiv-boden.de/profile/p4.htm>

- wenn Feinerde völlig entkalkt:
→ **T**-Horizont, *diagnostischer Horizont* des Bodentyps
Terra fusca
- bei 5% Fremdanteil im Kalk müssen für 10 cm Boden ca. 100 cm Kalk aufgelöst werden
- bei einer Kalklösungsrate von $40 \mu\text{m a}^{-1}$ unter unseren Klimabedingungen (Plan, 2002) sind dazu 25.000 Jahre nötig!

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung = Ausfällung von Kalk

- $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ in fester Form nicht stabil



- Wasserentzug (Verdunstung)
 - Temperaturerhöhung
 - Erniedrigung des CO_2 -Partialdrucks
- verschieben Gleichgewicht in Richtung Carbonatfällung!

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung



Lösskindl: Ausscheidung von Kalk aus kalkreichen Sickerwässern in tieferen Lösshorizonten.
Charakteristisch sind die vielfältigen Knollenformen.

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung



Foto H.H. Becher

Flächenverteilung von Niedermoor (dunkel), Wiesenalk (= Alm, weißlich) und Ocker (gelbbraun) östl. Hallbergmoos (Landkreis Freising). Wiesenalk = Ausfällung nach kapillarem Aufstieg von Grundwasser

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung



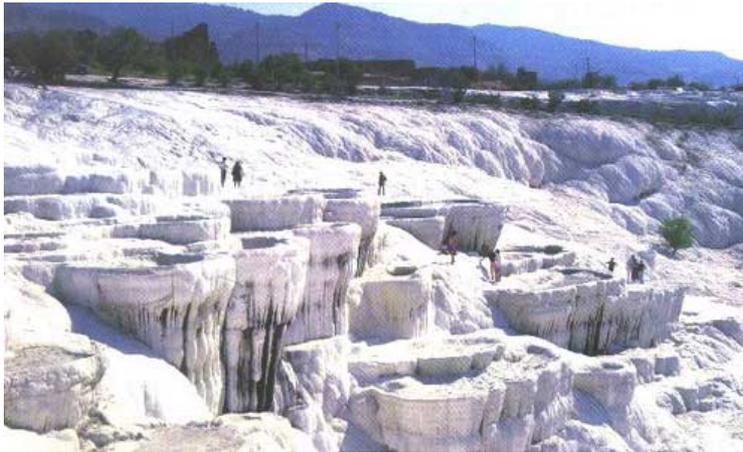
Quelltuffhang in Lingenau, Allgäu

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung



**„Steinerne Rinne“ in Rohrbach bei Ettenstatt
(Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen)**

Bodenbildende Prozesse: Carbonatisierung



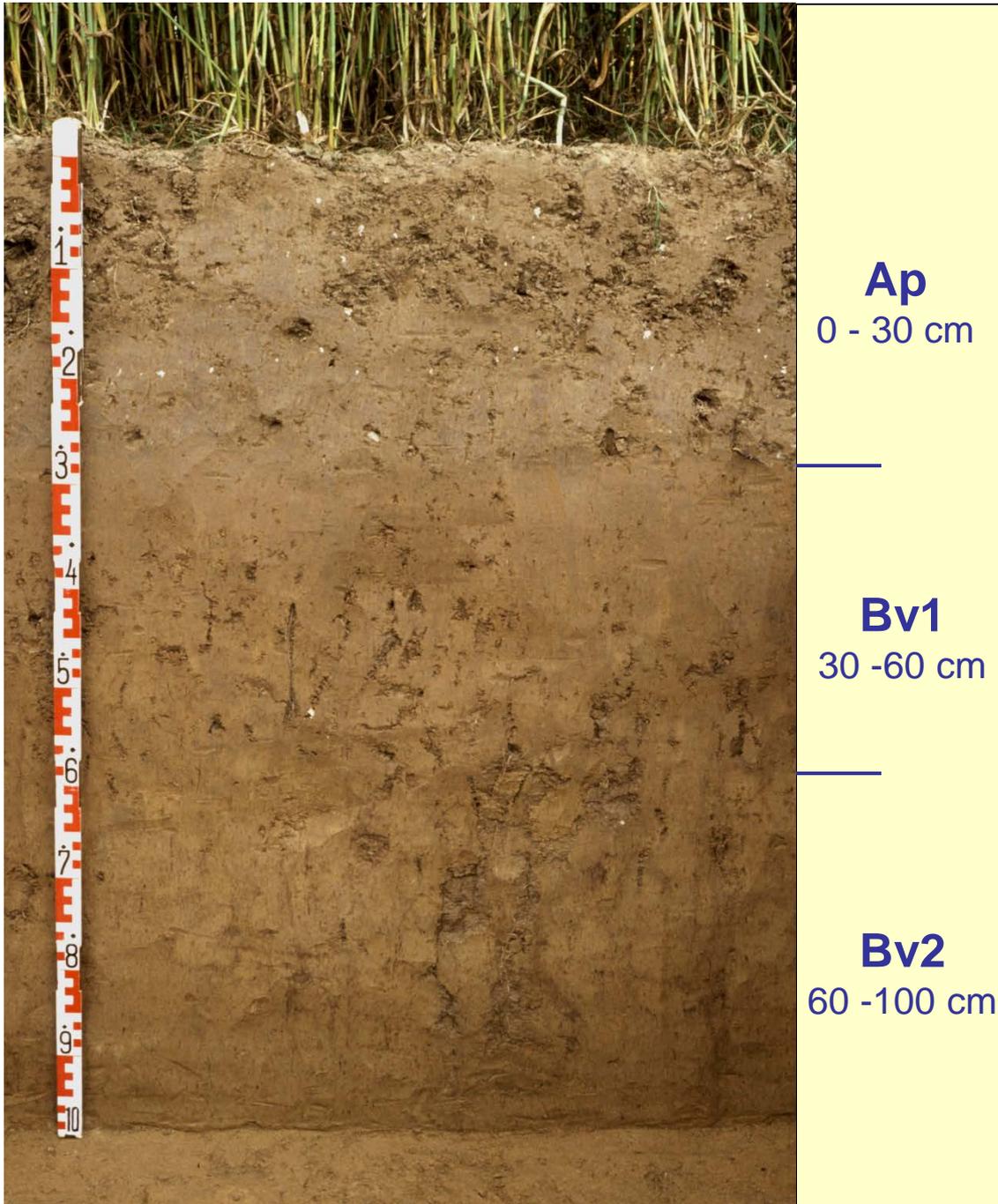
Kalksinterterrassen in Pamukkale, Türkei

Warum sind die mineralischen Böden in
der Regel braun gefärbt?

Bodenbildungsprozess:

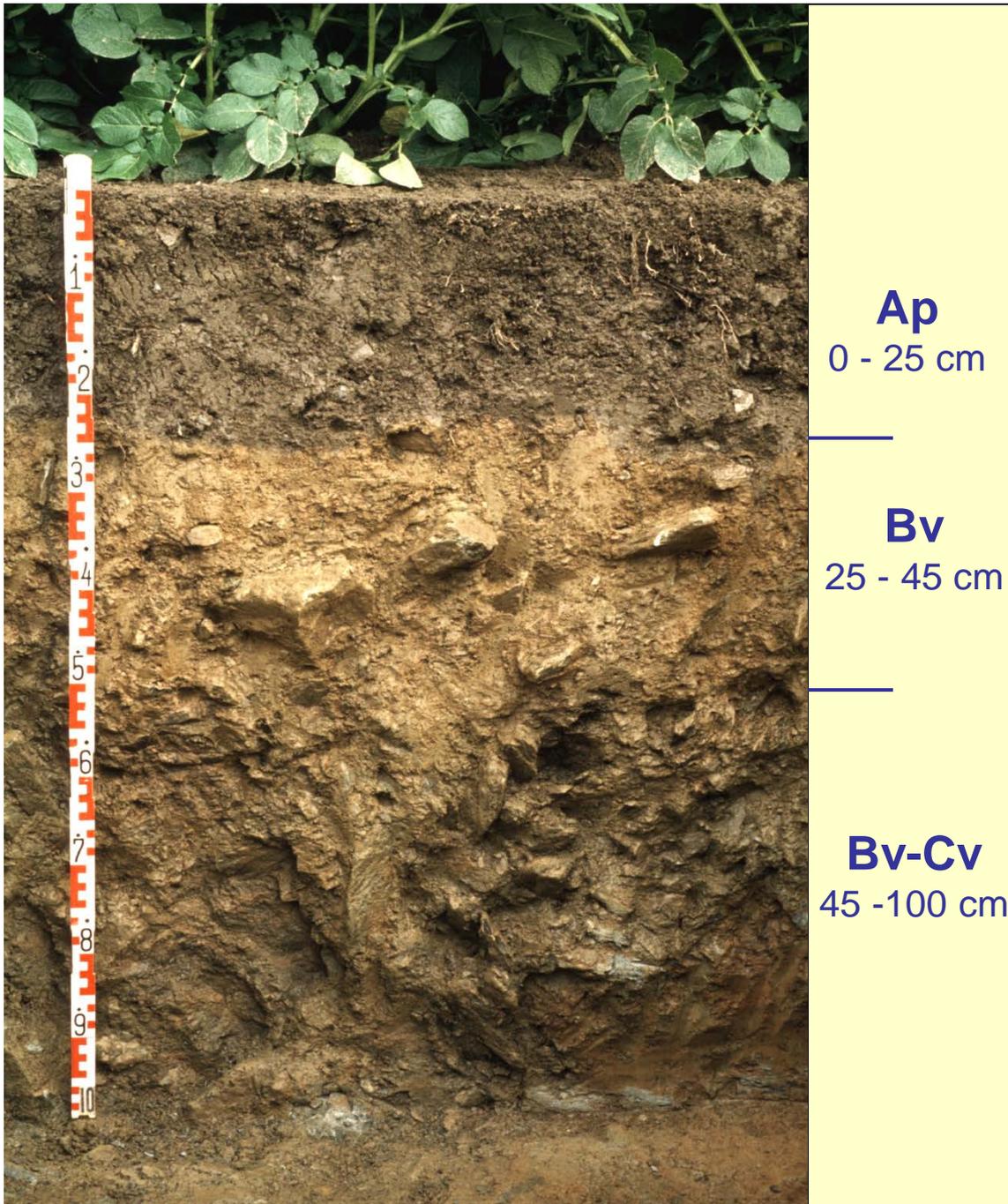
Verbraunung/Verlehmung

Braunerde aus Lösslehm



Profil 41, Scheyern, Pfaffenhofen
R. Brandhuber, Bayerische LfL

Braunerde aus Phyllit (Hangschutt)



Ap
0 - 25 cm

Bv
25 - 45 cm

Bv-Cv
45 - 100 cm

Profil 19, Marktredwitz, Wunsiedel
R. Brandhuber, Bayerische LfL

Muster der Verbraunung im Keuper-Sandstein



Verbraunung entlang einer Wurzel



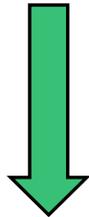
Verbraunung entlang einer Wurzel



Verbraunung/Verlehmung: Prinzip

Primäre Silikate (Fe^{2+} reich)

Verwitterung



Neubildungen:

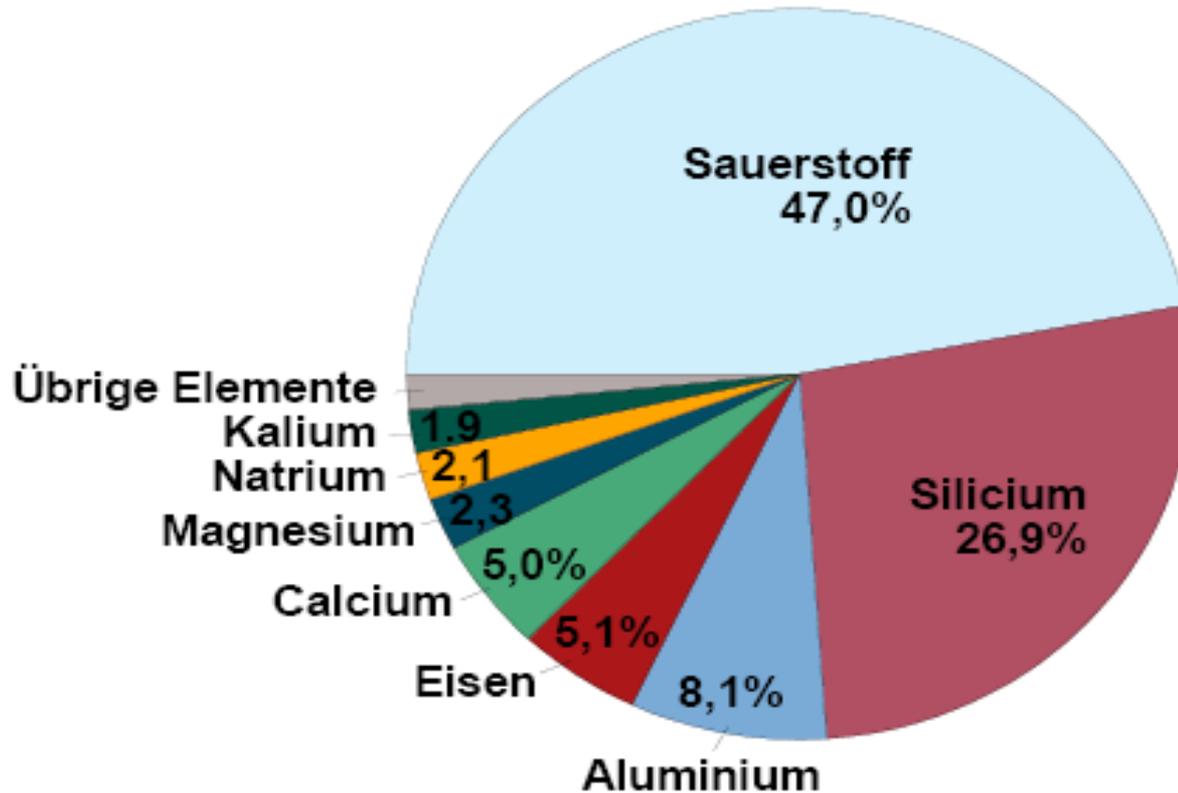
- ◆ Fe^{3+} - Oxide/Hydroxide (Braunfärbung)
- ◆ Tonminerale (Änderung der Textur!)
- ◆ Quarz
- ◆ Al-Hydroxide
- ◆ Salze

Eigenschaften der mineralischen Bodensubstanz

- **Alle Gesteine der Erde sind aus Mineralen aufgebaut**
Definition: Minerale sind stofflich homogene Bestandteile der Erdkruste
- **Minerale** können **Salze, Oxide** und **Hydroxide** sein die häufig ein geordnetes Raumgitter haben (kristallin). Minerale ohne geordnetes Gitter =amorph
- **gesteinsbildende Minerale** sind wichtige Bestandteile von Böden und Ausgangsprodukte für **Verwitterung** und **Neubildung sekundärer Minerale**

Elementzusammensetzung der Erdkruste

(bis 16 km Tiefe)



O + Si + Al > 80 Masse-%

Gesteinsbildende Minerale

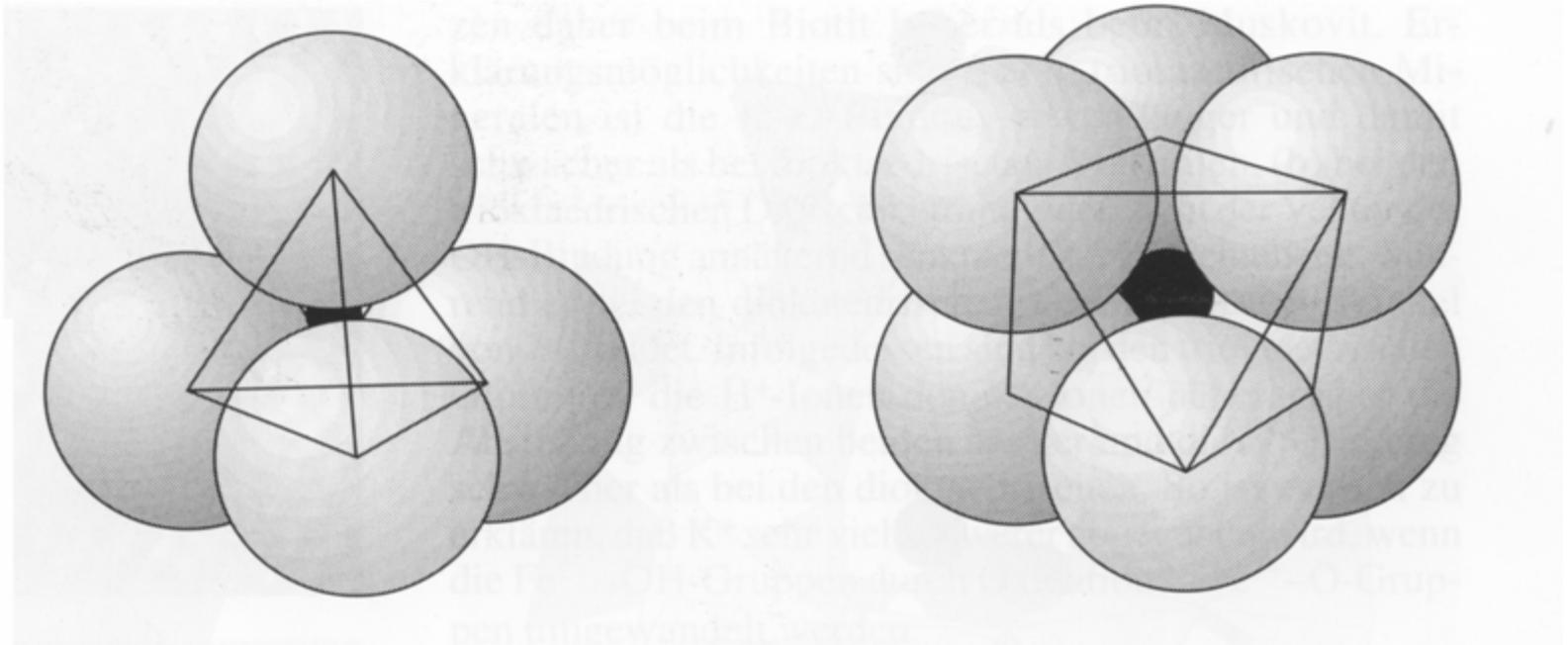
Silikate dominieren

Silikate = Salze der Kieselsäure, H_4SiO_4

Silikate und Quarz (SiO_2 , wird nicht zu den Silikaten gerechnet) machen zusammen **> 95% der Erdkruste** aus

	Masse-% der Erdkruste	
Quarz	18	
Silikate	78,5	
Feldspäte		64
Pyroxene + Amphibole		9
Glimmer		4
Olivin		1,5
übrige Minerale	3,5	

Aufbau von Silikaten: SiO_4 -Tetraeder, AlO_6 -Oktaeder



Vielfalt der Silikate

beruht im Wesentlichen auf 2 Eigenschaften:

- unterschiedliche Art der Vernetzung der SiO_4 -Tetraeder über Sauerstoffbrücken: Si-O-Si
- isomorpher Ersatz

Struktur der Silikate

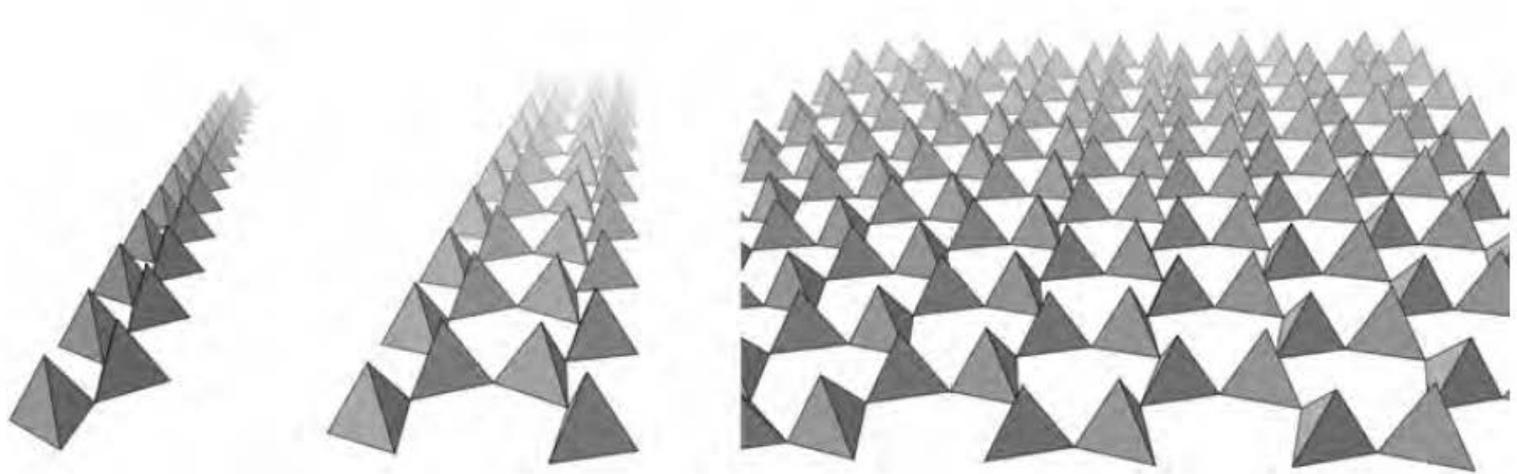


Abb. 2.2-2 Verknüpfungsarten der Silicate: Kette (links), Band (Mitte) und Schichtstruktur (rechts)

Struktur der Schichtsilikate

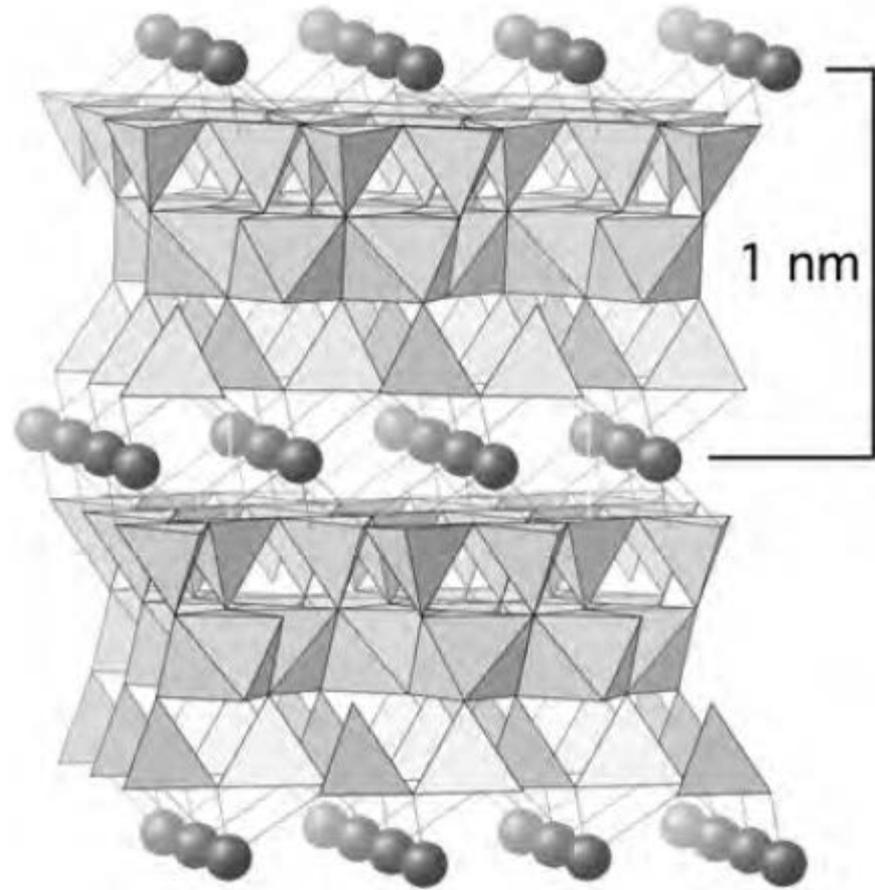


Abb. 2.2-4 Modell einer Glimmerstruktur. Die Kugeln sind K^+ -Ionen. Die Dicke einer Elementarschicht ist gekennzeichnet.

Struktur der Gerüstsilikate

Scheffer-Schachtschabel 2010

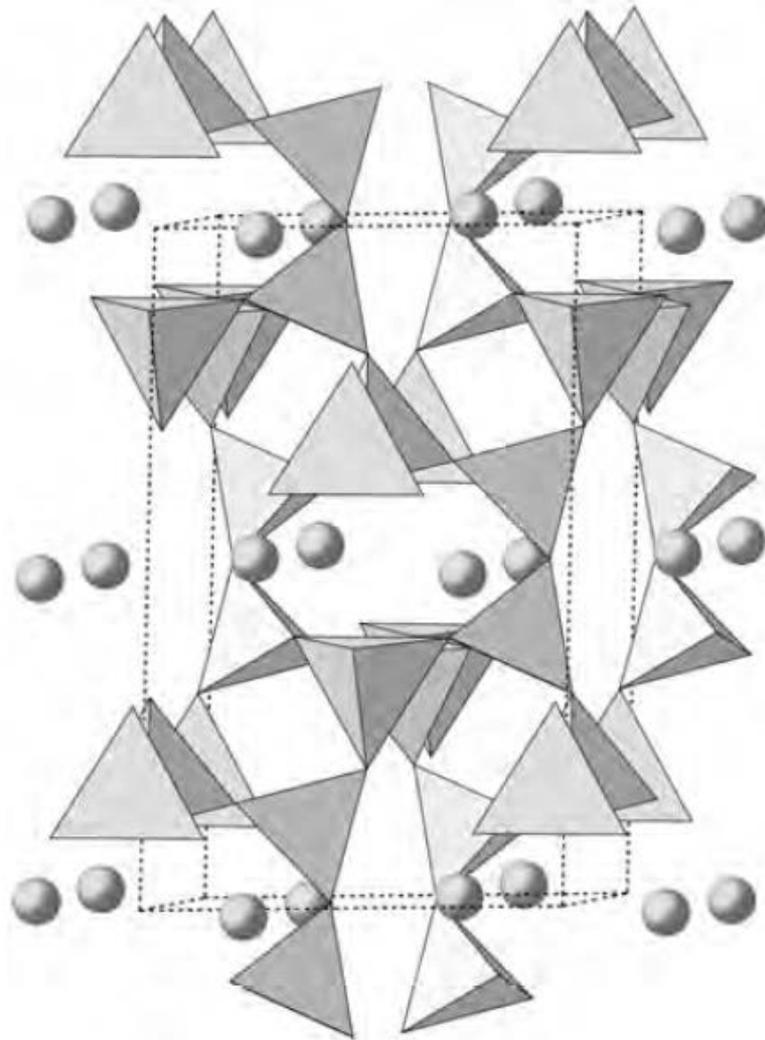


Abb. 2.2–3 Tetraedermodell eines Albits. Die Kugeln sind die Na-Ionen, die Tetraeder beherbergen Si⁴⁺ und Al³⁺ im Verhältnis 3:1. Die gestrichelten Linien umschließen die Elementarzelle.

Ladung

- Vernetzung (Kondensation) führt zu Verminderung der Ladung je Si:

	Anion	neg. Ladungen / Si
Insel-Silikat	SiO_4^{4-}	4
Ketten-Silikat	SiO_3^{2-}	2
Band-Silikat	$\text{Si}_4\text{O}_{11}^{6-}$	1,5
Blatt-Silikat	$\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$	1
Gerüst-Silikat	SiO_2^0	0

Isomorpher Ersatz

- Silikate entstehen durch Auskristallisation beim Abkühlen eines Magmas.
- Je nach Zusammensetzung des Magmas gibt es dabei Mangel oder Überschuss an einzelnen Elementen.

Folge:

- ➔ Einbau von Ionen ähnlicher Größe in die Tetraeder- oder Oktaeder-Zentren **ohne Änderung der Struktur**
→ **isomorph** = „von gleicher Gestalt“

Tab. 2.2–2 Effektive Radien verschiedener Ionen (pm) in Kristallen bezogen auf die Koordinationszahl IV oder VI.

$^{VI}\text{Na}^+$	102	^{IV}Al	39	^{IV}C	15	P^{5+}	38
$^{VI}\text{K}^+$	138	^{VI}Al	53,5	^{IV}Si	26	O^{2-}	140
$^{VI}\text{NH}_4^+$	147	$^{VI}\text{Fe}^{2+}$	78,0	$^{IV}\text{Ti}^{4+}$	42	OH^-	137
$^{VI}\text{Mg}^{2+}$	72	$^{VI}\text{Fe}^{3+}$	64,5			S^{6+}	30
$^{VI}\text{Ca}^{2+}$	100	$^{VI}\text{Mn}^{2+}$	83			S^{2-}	182
		$^{VI}\text{Mn}^{4+}$	53			Cl^-	153

Isomorpher Ersatz führt zu Veränderung der Ladung des Gesamtgerüsts:

Si^{4+} in Tetraedern ersetzt durch Al^{3+}

⇒ negativer Ladungsüberschuss

Al^{3+} in Oktaedern ersetzt durch Mg^{2+} , Fe^{2+}

Ausgleich durch Einlagerung von Kationen im Gitter:

Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , u.a.

Zusammenfassung – Silikate

Klasse	Gruppe	Minerale
Insel	Olivine	Olivin
Ketten	Pyroxene	Augit
Band	Amphibole	Hornblende
Schicht	Glimmer	Muskovit (hell, K-reich) Biotit (dunkel, Fe-, Mg-reich)
Gerüst	Feldspäte	Orthoklas (K-Feldspat) Albit (Na-Feldspat) Anorthit (Ca-Feldspat) Plagioklase (Ca-Na-Feldspäte)

Chemische Zusammensetzung von Silikaten

Tab. 2.2–3 Chemismus (Masse-%) wichtiger Minerale magmatischer und metamorpher Entstehung

	Olivine	Pyroxene ^{a)}	Amphibole ^{b)}	Muskovite	Biotite	K-Feldspäte	Plagioklase
SiO ₂	38...47	47...53	39...54	39...53	33...45	63...66	43,5...69
TiO ₂	–	<4,4	–	< 3,9	<10	–	–
Al ₂ O ₃	–	1...7	–	20...46	9...32	19...21	19...36
Fe ₂ O ₃	–	0,4...7,6	0,2...23	<8,3	0,1...21	< 0,5	–
FeO	8...12	4...21	< 9	–	3...28	–	–
MnO	–	–	–	< 2,3	–	–	–
MgO	38...47	10...18	3...25	< 2,4	0,3...28	–	–
CaO	–	13...22	10...14	<4,5	–	–	<19,5
Na ₂ O	–	–	0,5...2,3	<5,2	–	0,8...8,4	<12
K ₂ O	–	–	<1,7	7,3...13,9	6...11	3...16	–
H ₂ O	–	–	0,2...2,7	2...7	0,9...5	–	–

a) Augite, b) gemeine Hornblende

Neubildungen: Weitere Minerale

- schwerlösliche Salze, die meist durch Ausfällung aus wäßrigen Lösungen entstanden sind
 - primär (aus dem Ausgangsgestein)
 - sekundär (durch bodenbildende Prozesse entstanden)
- Carbonate (Salze der Kohlensäure)
 - **Calcit** CaCO_3
 - **Dolomit** $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- Sulfate (Salze der Schwefelsäure)
 - **Gips** $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Weitere Minerale

- Phosphate (Salze der Phosphorsäure)
wichtig als Pflanzennährstoff!
 - **Apatit** $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (Cl, OH) primär aus Magmen
 - **Vivianit** $\text{Fe}^{\text{II}}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ sekundär (pedogen unter reduzierenden Bedingungen)
 - **Strengit** $\text{FePO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ sekundär
 - **Variscit** $\text{AlPO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ sekundär
- } vermutet, bisher aber nicht nachgewiesen

Verwitterung und Neubildung von sekundären Mineralen

Sekundäre Minerale entstehen bei der Verwitterung

- entweder als chemisch veränderte Überreste der primären Minerale bei unvollständiger Auflösung (Tonminerale)
- als Neubildung aus einzelnen Bausteinen nach vollständiger Auflösung der primären Minerale (Tonminerale)
- oder als Ausfällungen schwerlöslicher Komponenten (Oxide, Hydroxide, Carbonate)

Verwitterungsraten von Mineralen in Abhängigkeit vom pH

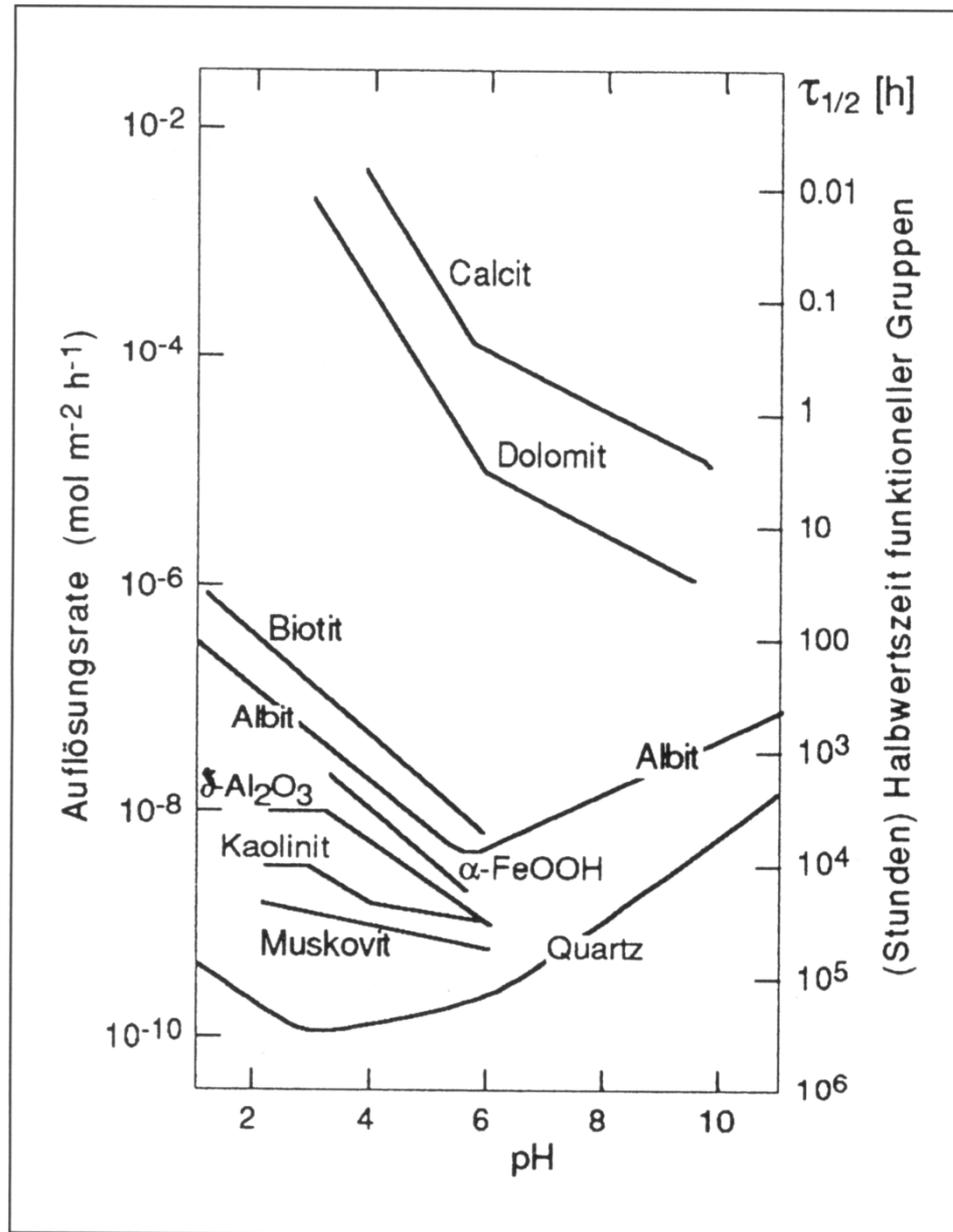


Abbildung 9: Auflösungsraten verschiedener Mineralien in Abhängigkeit des pH-Wertes (25 °C). Auf der rechten Skala wird die

Mittlere Lebensdauer eines 1 mm großen Kristalls in Jahren

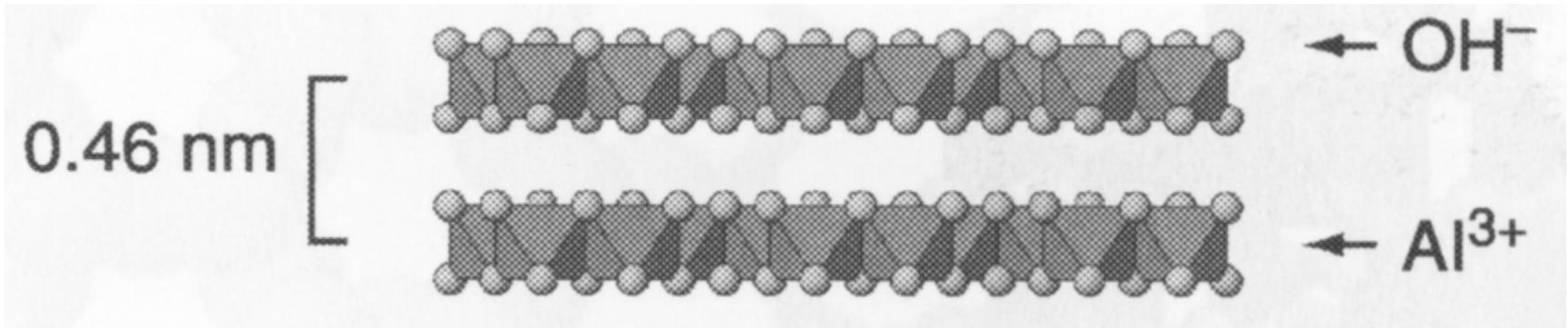
Anorthit (Ca-Feldspat)	112
Albit (Natrium-Feldspat)	$80 * 10^3$
Orthoklas (K-Feldspat)	$0.5 * 10^6$
Muskovit	$2.7 * 10^6$
Quarz	$34 * 10^6$

Neubildungen: Oxide und Hydroxide

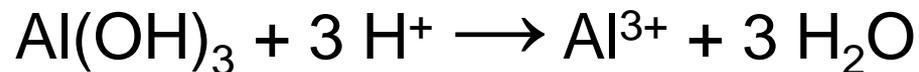
- Oxide und Hydroxide sind Verwitterungsneubildungen
- ⇒ **Sekundäre Minerale**
- nicht in Magmatiten enthalten (Ausnahme Quarz!)
- Endprodukte intensiver Verwitterung von Silikaten, da die leichter lösliche Kieselsäure ausgewaschen werden kann
- sehr kleine Korngröße (3–100 nm),
große spezifische Oberfläche
- wegen ihrer Sorptionseigenschaften wichtige Minerale der Tonfraktion

Neubildungen: Aluminiumhydroxide

- vorherrschend Gibbsite, $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ (farblos bis weiß)
- Struktur: Oktaederschichten



- in sauren Böden ($\text{pH} < 5$) wichtige Rolle als Säurepuffer:



Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

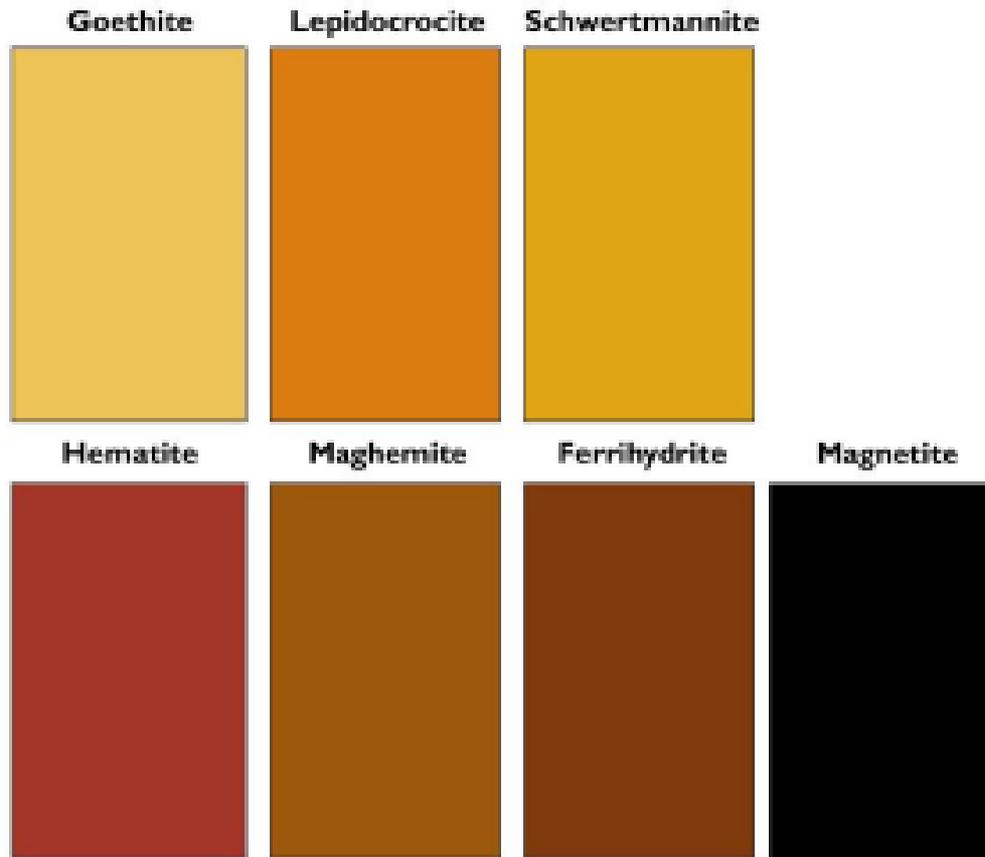
- durch Verwitterung aus primären Silikaten freigesetztes Fe^{2+} wird zu Fe^{3+} oxidiert
- kaum Einbau von Fe in neu gebildete Tonminerale
- Fe^{3+} -Ionen werden in wässrigem Milieu sofort hydrolysiert:



- je nach Entstehungsbedingungen kristallisieren unterschiedliche Oxide/Hydroxide

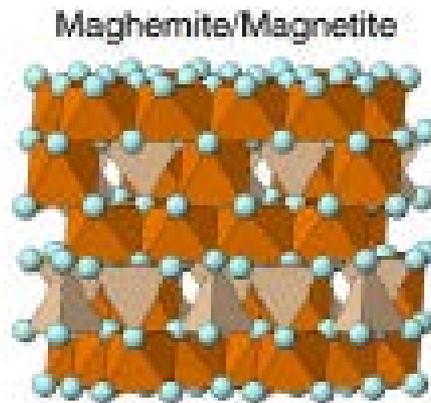
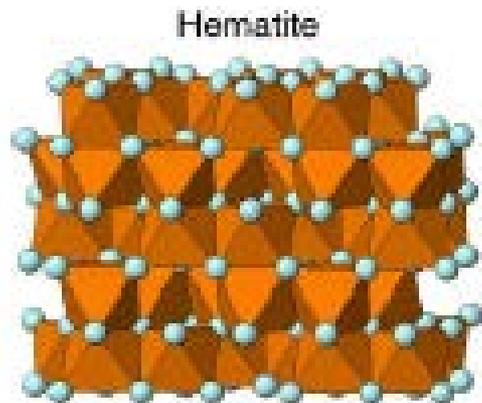
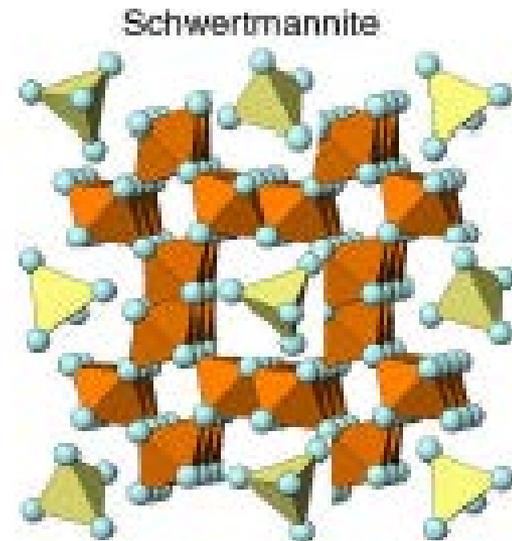
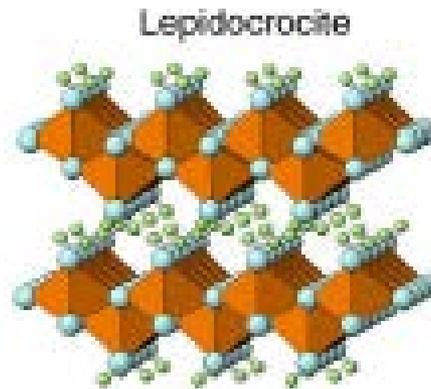
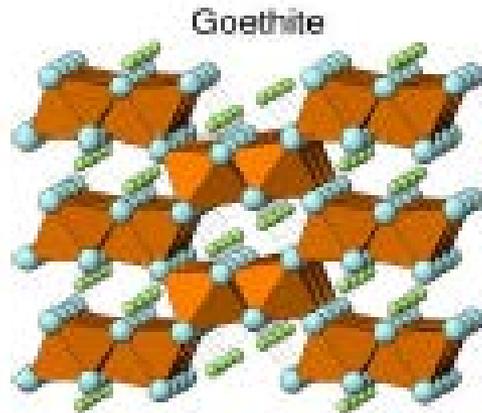
Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

f ä r b e n B ö d e n !



Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

- Strukturen



Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

- Goethit, α -FeOOH
 - Bildung bei langsamer Anlieferung von Fe^{3+}
 - wenn Fe^{3+} durch Verwitterung im schwach sauren Milieu langsam nachgeliefert wird
 - wenn $[\text{Fe}^{3+}]$ durch Komplexbildner niedrig gehalten wird
 - bevorzugt bei mittleren Temperaturen unter nicht zu feuchten Bedingungen
 - gelbbraune Böden, kennzeichnend für gemäßigte Klimabedingungen, kommt in allen Klimaten vor, sehr stabil

Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

- Hämatit, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$
 - Bildung aus Ferrihydrit bevorzugt bei höheren Temperaturen, deshalb kennzeichnend für subtropische und tropische Klimabedingungen
 - keine direkte Umwandlung von Goethit in Hämatit (außer beim Brennen)
 - typische rote tropische und subtropische Böden, auch Indikator für frühere tropische / subtropische Klimabedingungen
 - weniger stabil als Goethit

Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

- Ferrihydrit, $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ o.ä.
 - schlecht kristallisiertes, dunkelbraunes Eisen(hydr)oxid
 - Bildung
 - bei schneller Anlieferung von Fe^{3+} , z.B. bei Luft-Kontakt von Fe^{2+} -haltigem Wasser (Sicker-, Quell-, Dränagewasser)
 - bei Störung der Kristallisation durch Anionen wie Silikat, Phosphat, organische Anionen
 - Umwandlung in Goethit nur über Auflösung
 - Umwandlung in Hämatit durch Entwässerung in Böden wärmerer Klimate
 - Vorkommen z.B. in Go-Horizonten von Gleyen

Neubildungen: Eisenoxide/-hydroxide

- Lepidokrokit, γ -FeOOH
 - orangebraunes Eisenoxid
 - Bildung bei langsamer Oxidation von Fe^{2+}
 - typisch für Stauwasserböden
 - Vorkommen z.B. in Sd-Horizonten von Pseudogleyen

Neubildungen: Manganoxide (MnO_2)

- Bildung bei der Verwitterung Mn^{2+} -haltiger Silikate als schwarzbraun bis schwarz gefärbte $\text{Mn}^{(4+)}$ -Oxide unterschiedlicher Zusammensetzung
 - leichter mikrobiell reduzierbar als Eisenoxide
 - Mn daher im reduzierenden Milieu mobiler als Fe
 - Vorkommen in Stauwasserböden in Form schwarzer Flecken oder Konkretionen

Neubildungen: Siliciumoxide (Quarz)

- primär als Quarz aus Magmatiten (quantitativ dominierend)
- sekundär
 - z.B. als Opal durch Entwässerung der bei der Verwitterung von Silikaten gebildeten Kieselsäure:

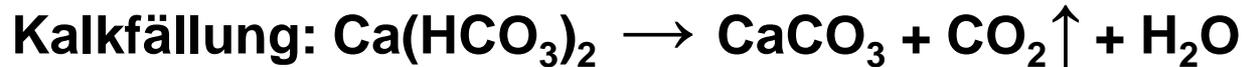
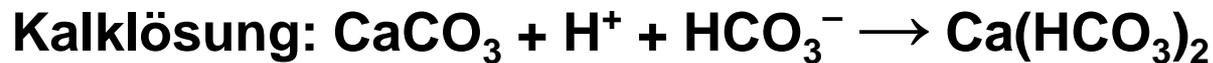


- als sog. Bioopal (Phytolithe)
von Pflanzen (v.a. Gräsern) stammend

Neubildungen: Salze

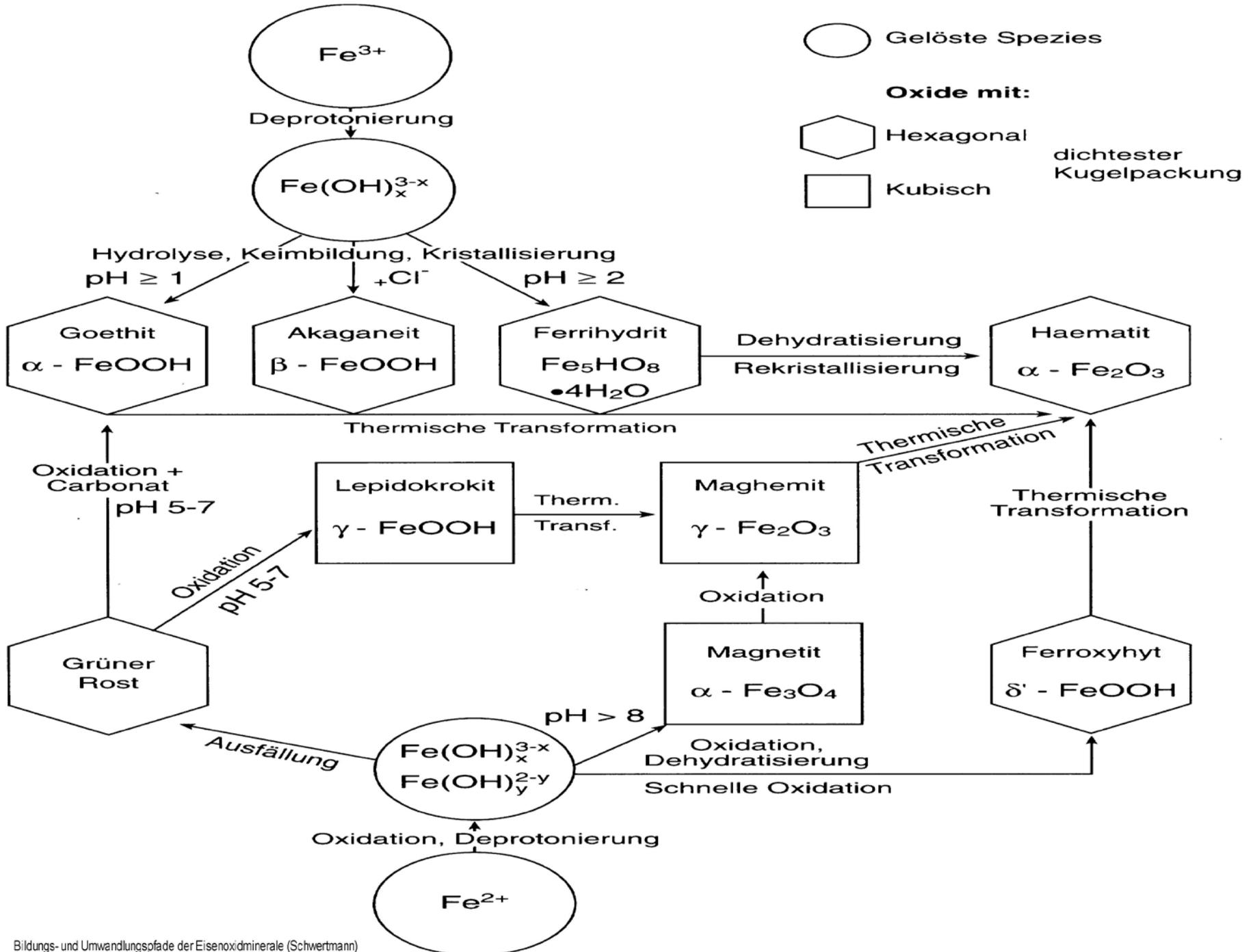
bei Verwitterungsprozessen gelöste und mit Wasser verlagerte Salze können an anderen Orten wieder ausgefällt werden

- z.B. Calciumcarbonat, Calcit (CaCO_3):



- sinkender CO_2 -Partialdruck oder ansteigende Konzentration an Ca-hydrogencarbonat durch Wasserentzug führt zu Ausfällung von Calciumcarbonat

⇒ „Alm“ oder „Wiesenkalk“, Kalksinter etc.



Bildungs- und Umwandlungspfade der Eisenoxidminerale (Schwertmann) (Scheffer/Schachtschabel, 1998)

Neubildungen: Tonminerale

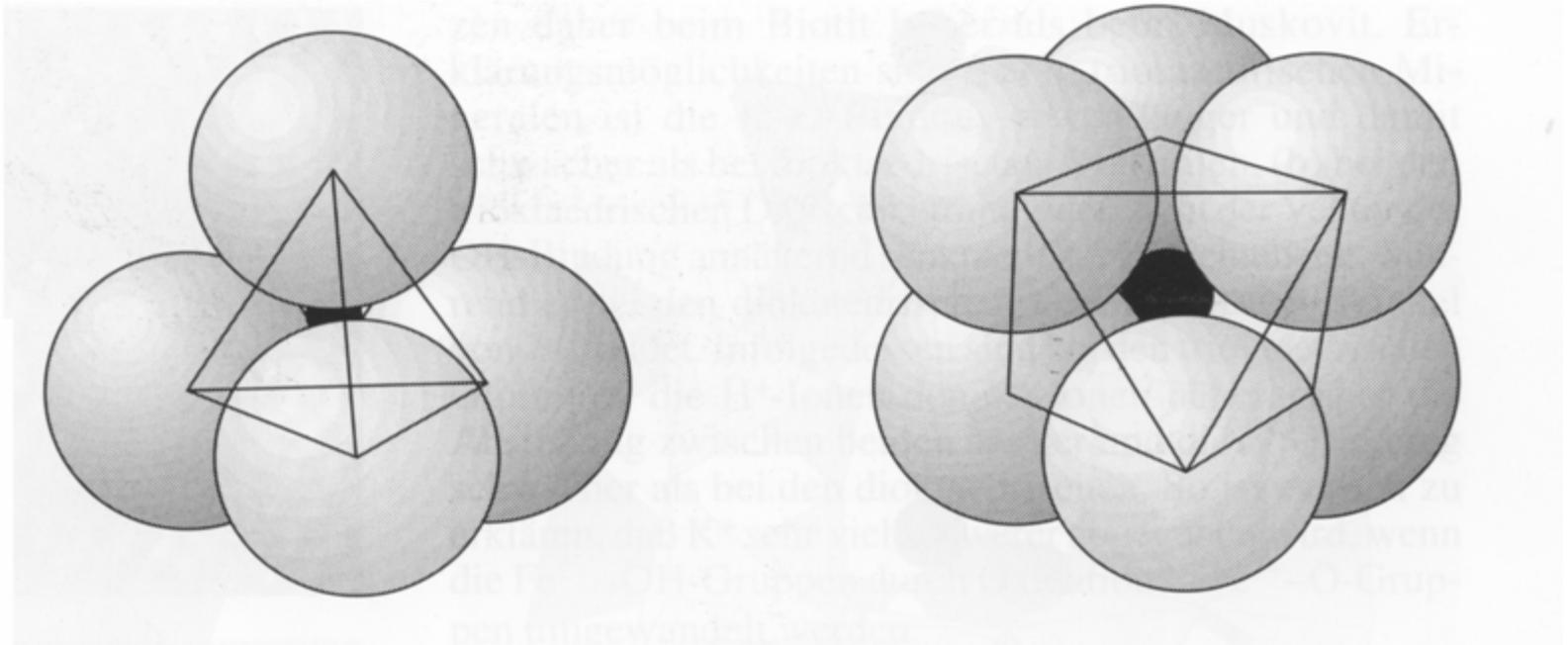
- Tonminerale sind Verwitterungsneubildungen
- ⇒ **Sekundäre Silikate**
- nicht in Magmatiten enthalten
- können Bestandteile von Sedimenten und Metamorphiten sein

- Teilchengröße meist $< 2 \mu\text{m}$
- mengenmäßig wichtigste Minerale der Tonfraktion

Neubildungen: Tonminerale

- Tonminerale haben extrem hohe Bedeutung im Boden:
- Sie beeinflussen
 - Gefügebildung (Bodenstruktur, Porensystem)
 - Wasserhaushalt
 - Gasaustausch
 - Nährstoffhaushalt (Kationenaustausch)
 - Gehalt an organischer Substanz

Aufbau von Tonmineralen: SiO_4 -Tetraeder, AlO_6 -Oktaeder



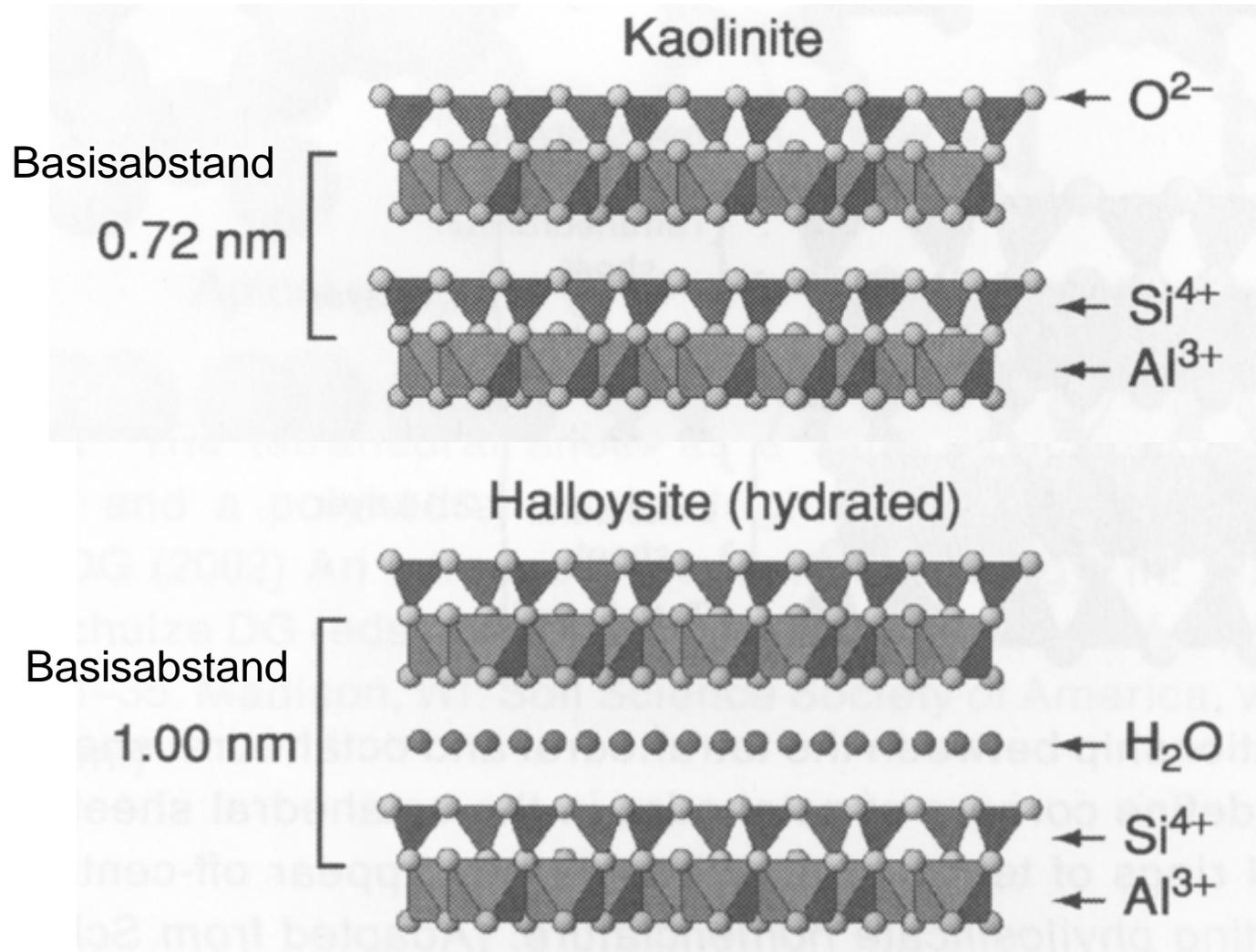
Struktur der Tonminerale

- alle Tetraeder besitzen Zentralatome (Si^{4+} oder Al^{3+})
- Oktaeder sind entweder zu 2/3 mit dreiwertigen Kationen (Al^{3+} , Fe^{3+}) besetzt
 - ⇒ „dioktaedrisches“ Mineral
- oder alle (= 3/3) mit zweiwertigen Kationen (Mg^{2+} , Fe^{2+}), besetzt
 - ⇒ „trioktaedrisches“ Mineral
- Übergänge zwischen beiden Formen möglich!

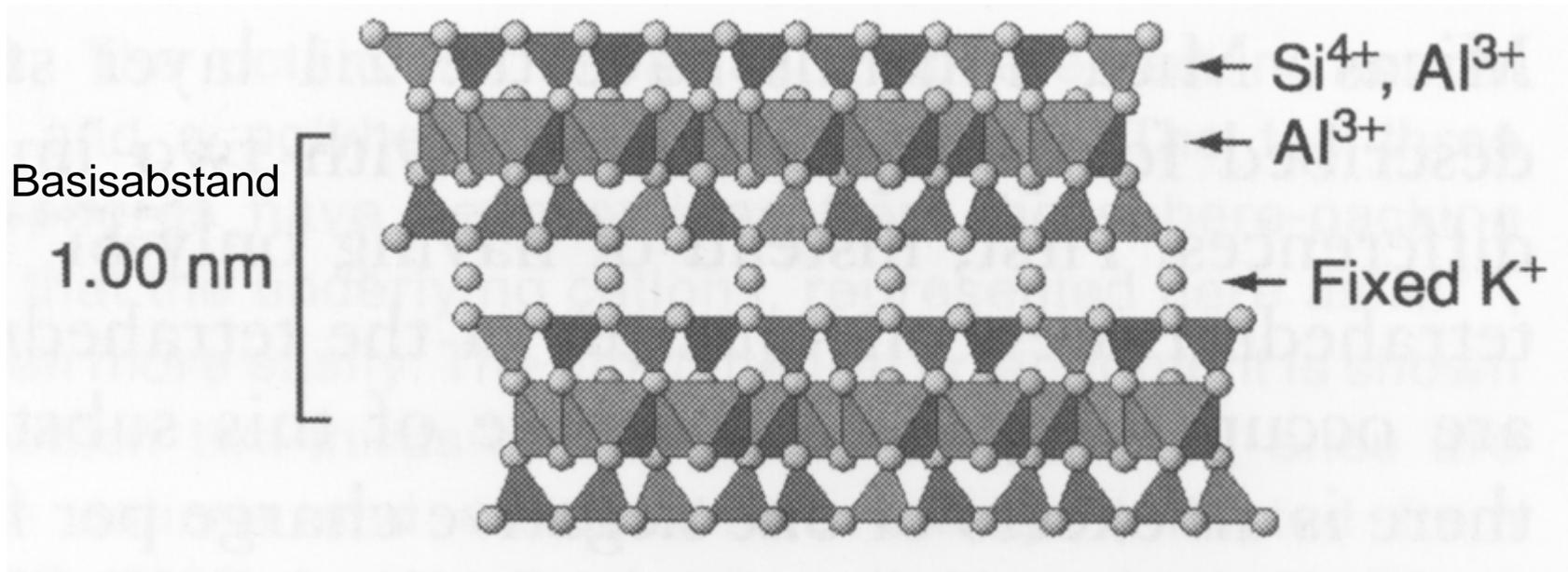
Einteilung der wichtigsten Tonminerale

Strukturtyp	Gruppe/Vertreter	Zwischenschichtbesetzung	Basisabstand	negative Ladung
1:1 oder 2-Schichtmineral	Kaolinit	keine	0.7 nm	ca. 0
	Halloysit	Wasser	1.0 nm	ca. 0
2:1 oder 3-Schichtmineral	Illite	nicht hydratisiertes K	1.0 nm	0.6...0.9
	Vermiculite	Kationen „nackt“ oder hydratisiert	1.0 nm	0.6...0.8
	Smectite (Montmorillonit, Smectit)	Kationen „nackt“ oder hydratisiert	2.0 nm	0.2...0.6
	Chlorite	Al-Hydroxid	1.4 nm	variabel

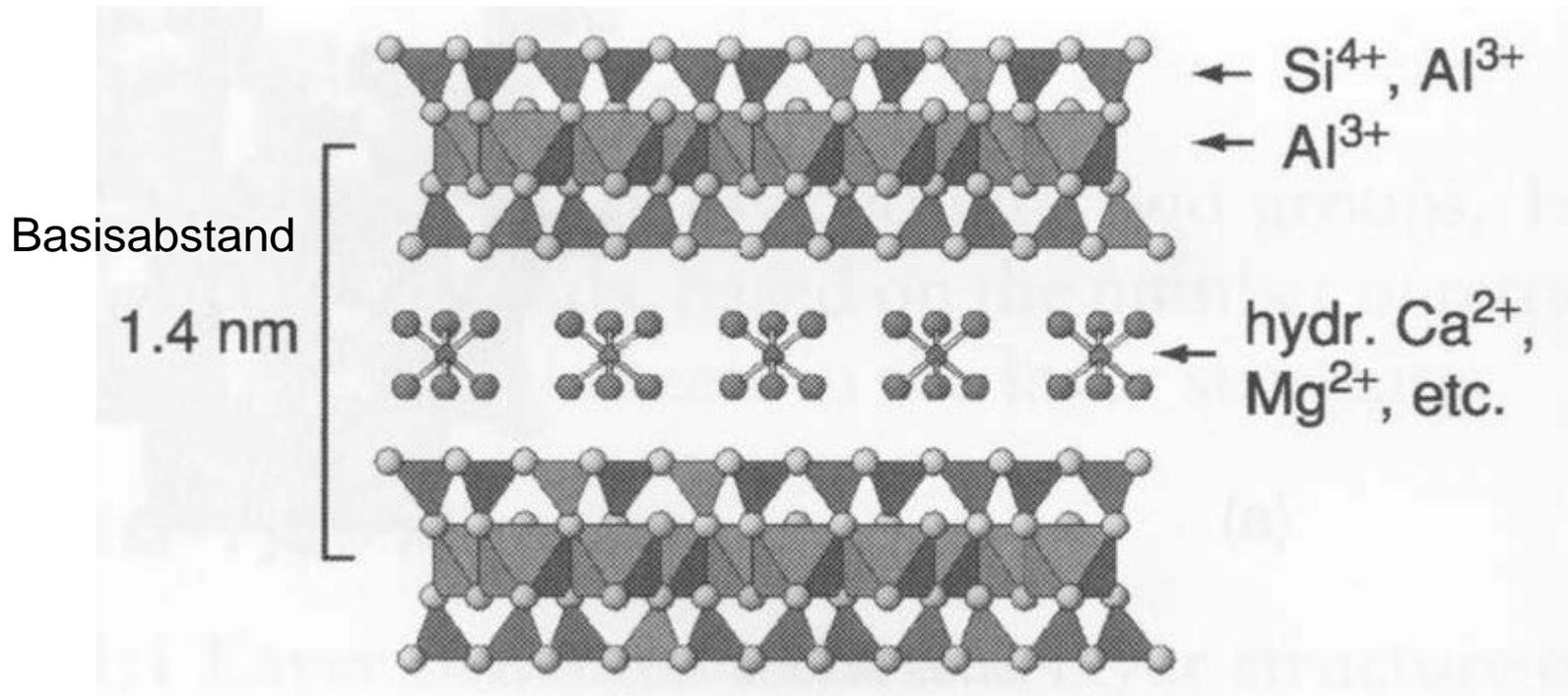
Struktur: Kaolinit und Halloysit



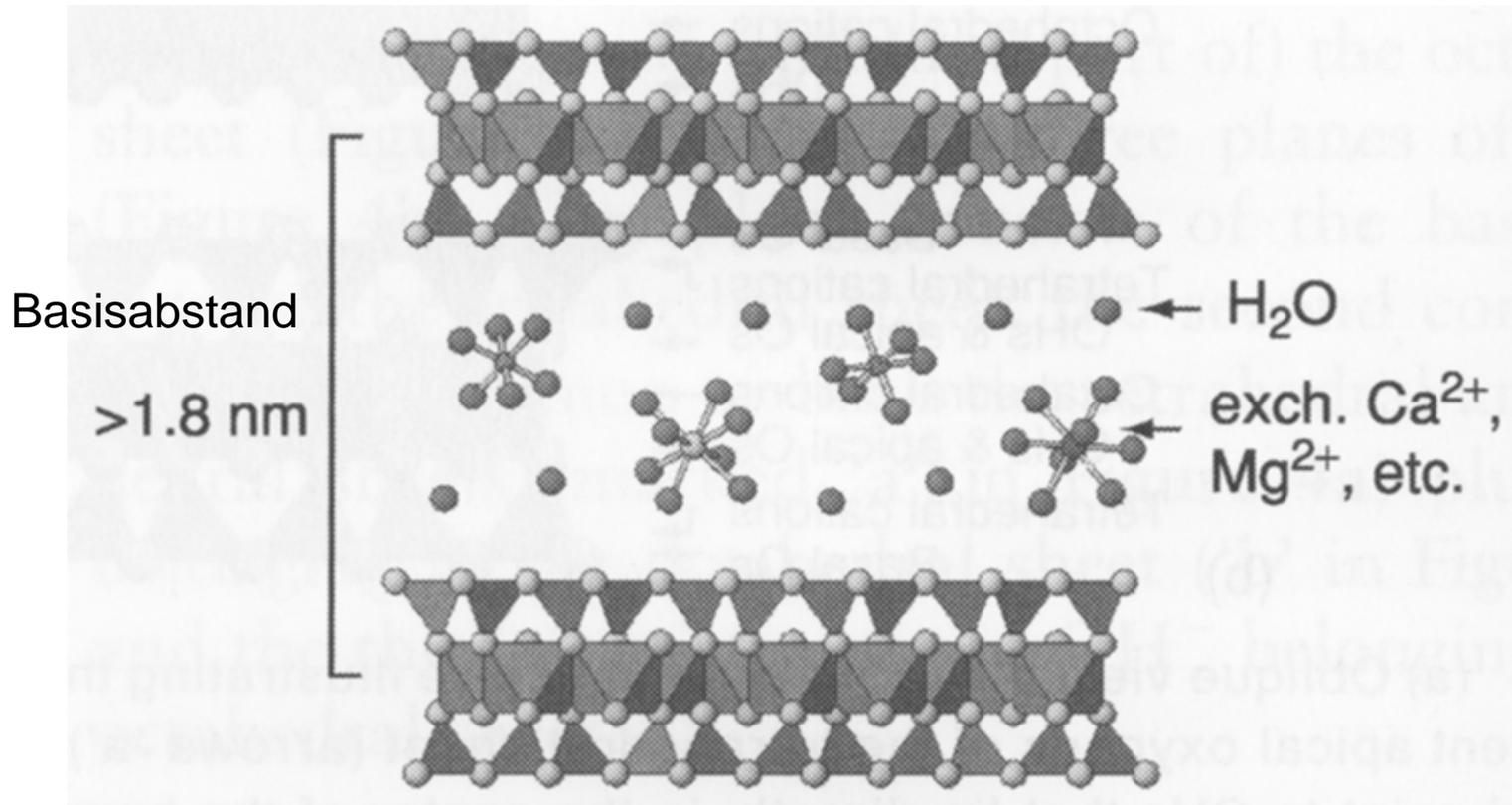
Struktur: Illite (und Glimmer)



Struktur: Vermiculite



Struktur: Smectite



Struktur: Chlorite

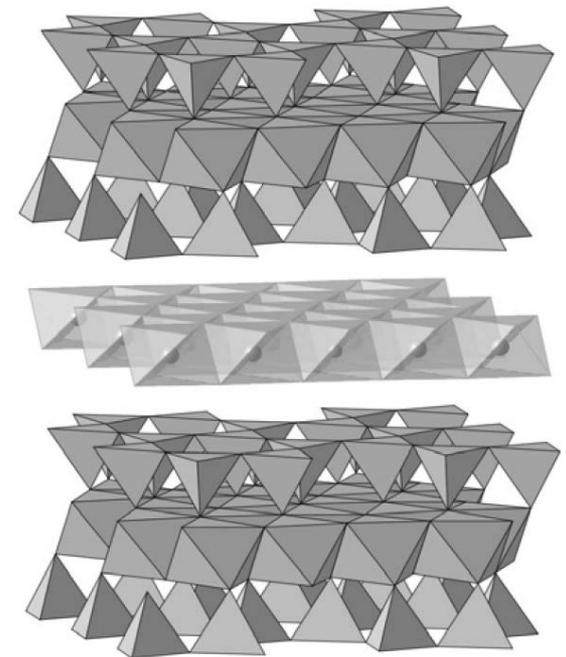
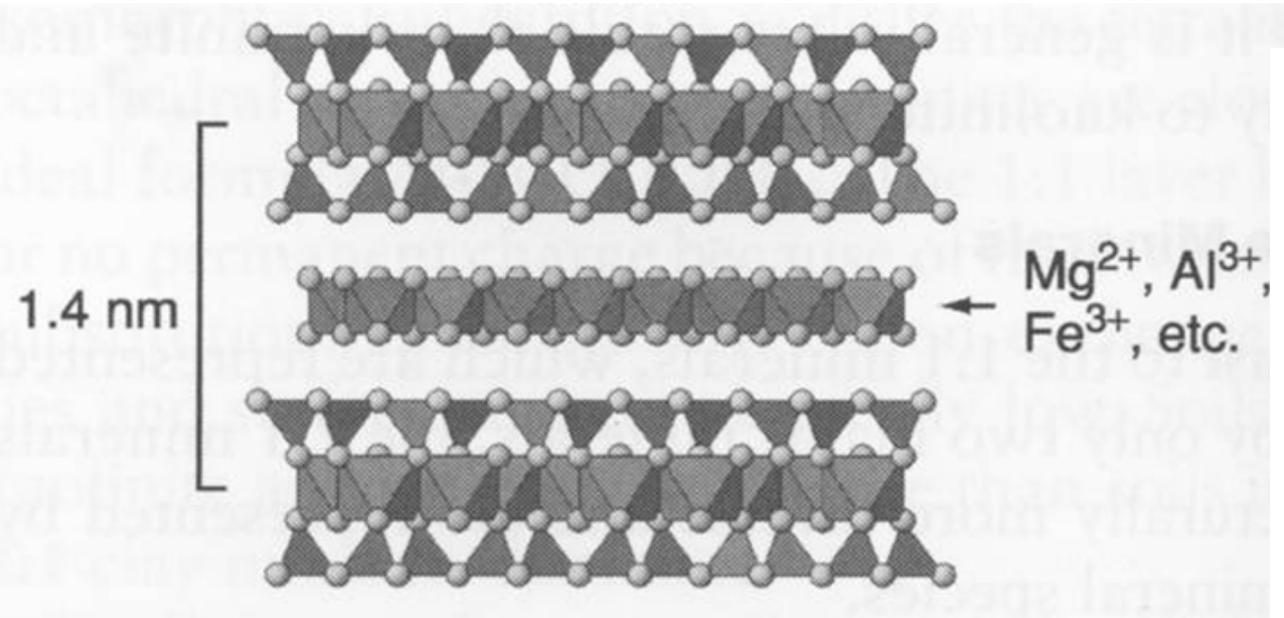
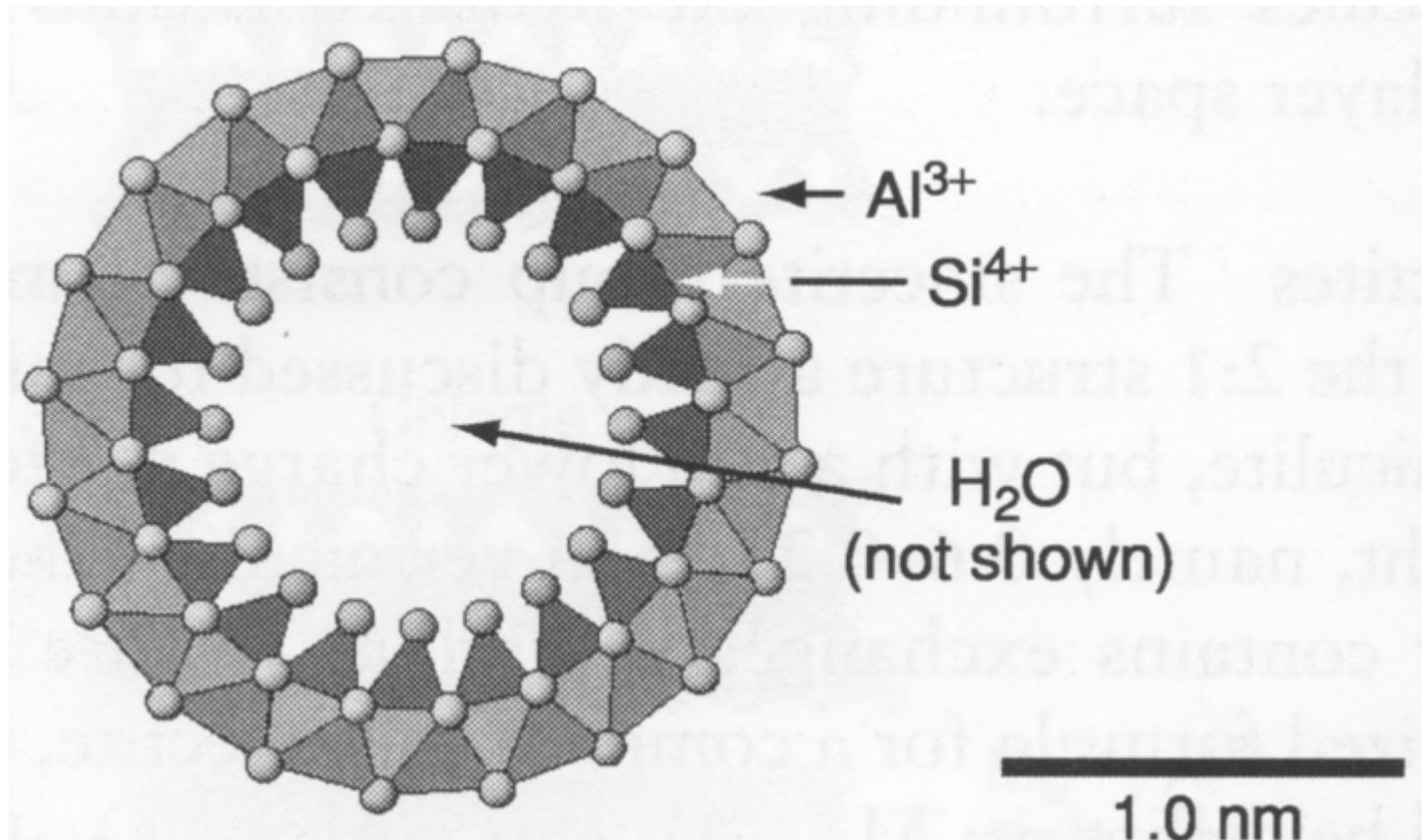
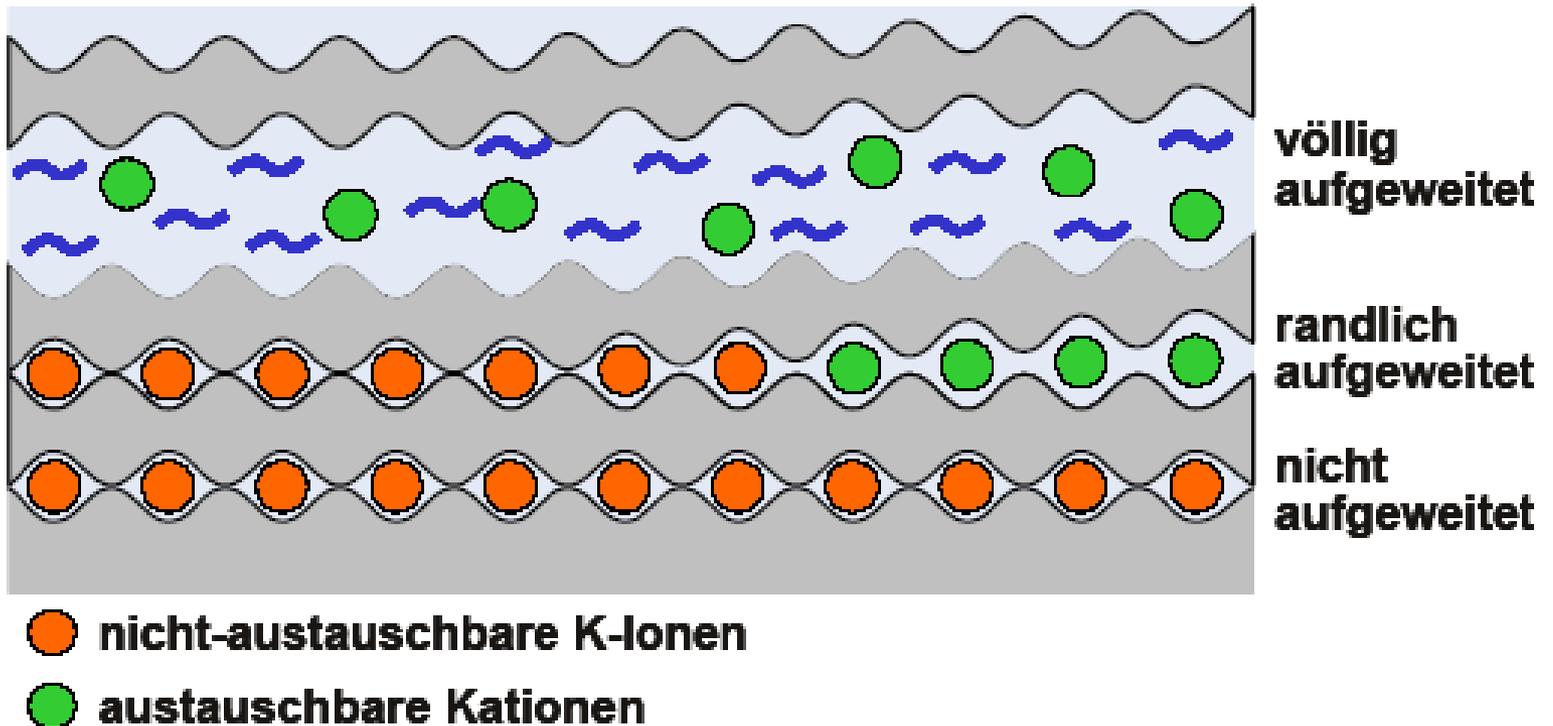


Abb. 2.2-6 Polyedermodell der Chloritstruktur. Die hellen Oktaeder mit angedeutetem Kation stellen die Hydroxid-Zwischenschicht dar.

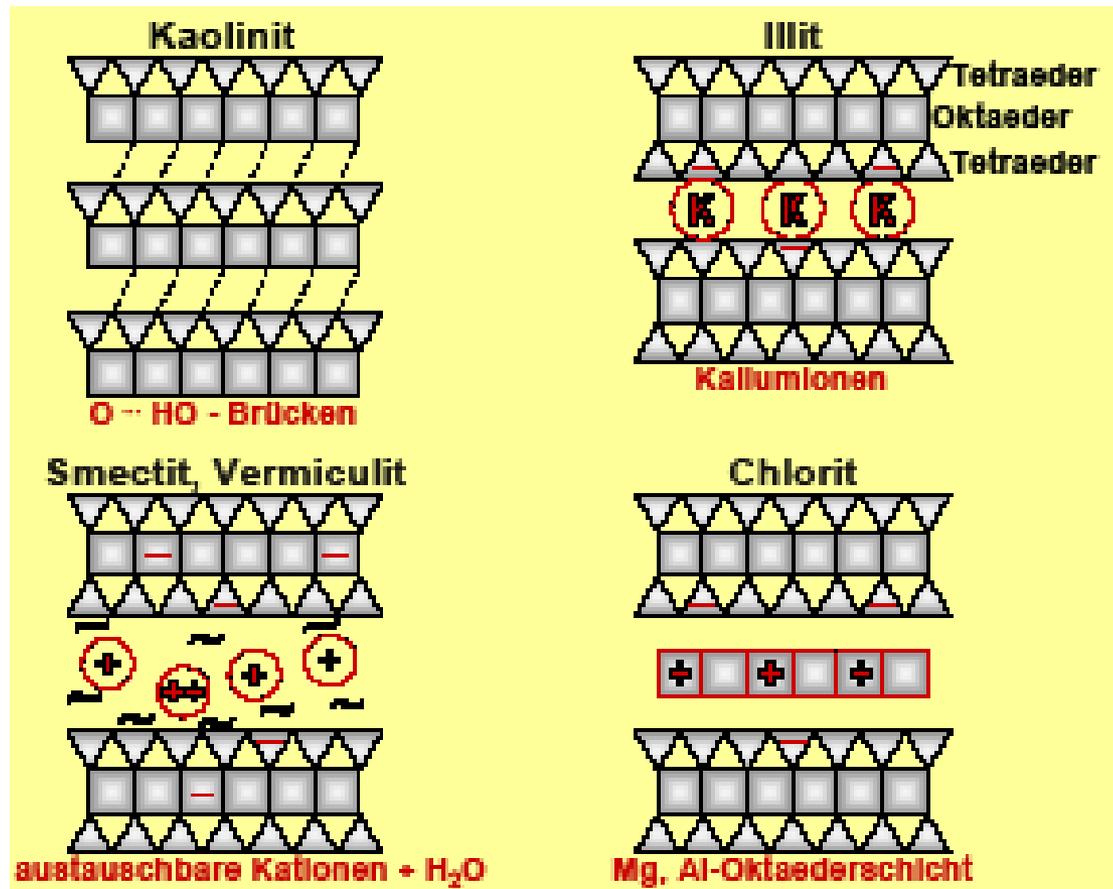
Struktur: Imogolit



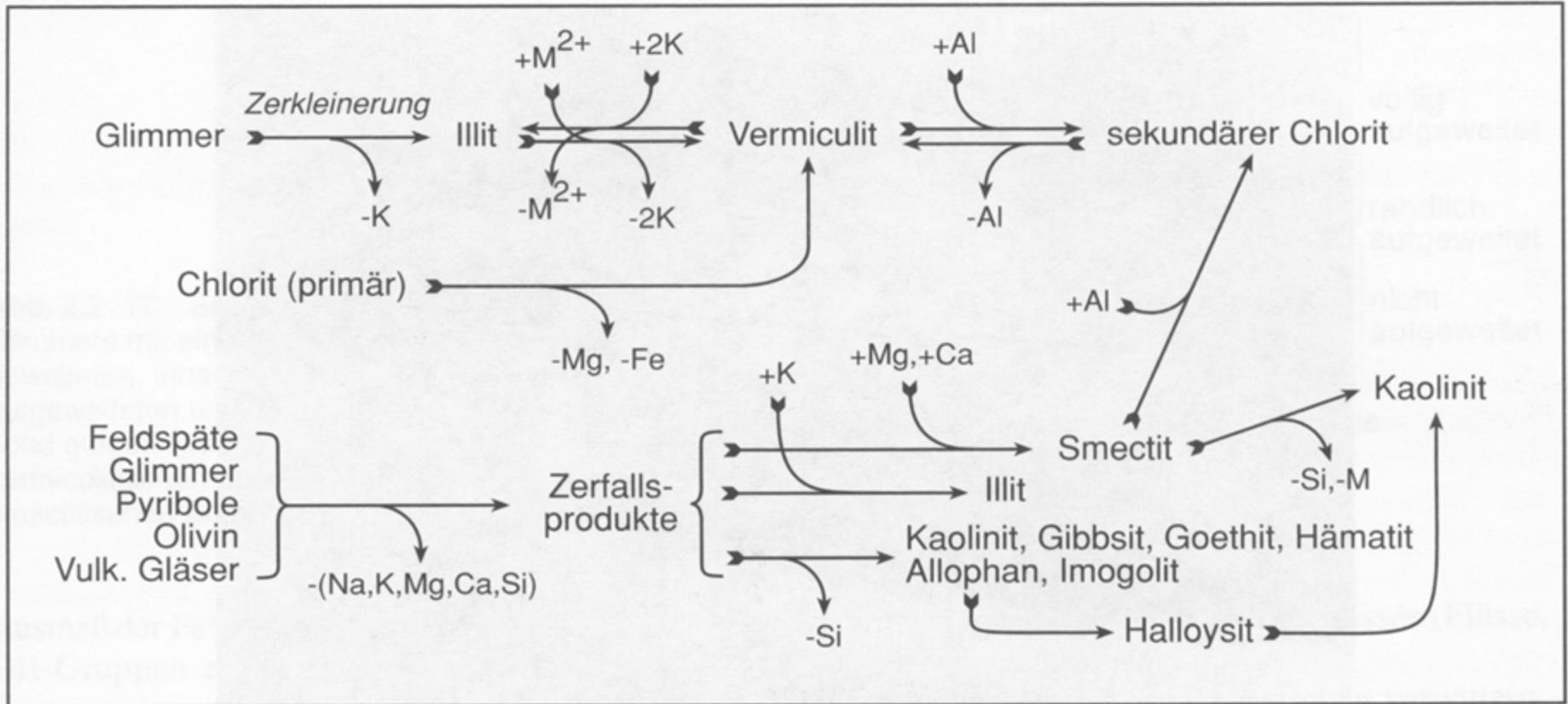
Wechselagerungsminerale



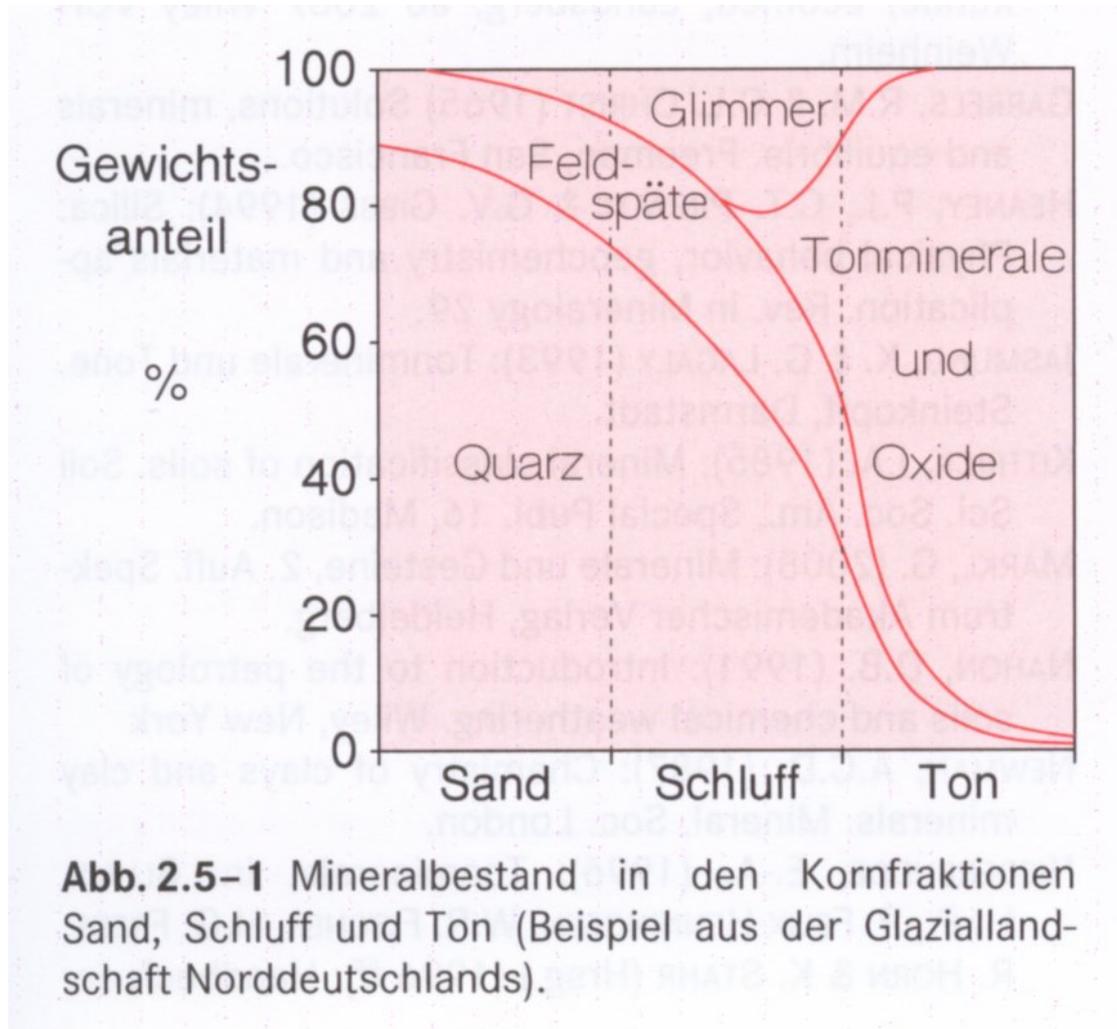
Typen der Elementarschichten und Zwischenschichtbesetzung



Umwandlung von Tonmineralen



Minerale in Korngrößenfraktionen



Spezifische Oberfläche von Mineralen

Mineral	Specific surface (m ² g ⁻¹)
Kaolinite	7–30
Halloysite	10–45
Pyrophyllite	65–80
Talc	65–80
Montmorillonite	600–800
Dioctahedral vermiculite	50–800
Trioctahedral vermiculite	600–800
Muscovite	60–100
Biotite	40–100
Chlorite	25–150
Allophane	100–800
Aluminum oxides	100–220 ^a
Iron oxides	70–250 ^a
Manganese oxides	5–360 ^a

^a From Kämpf *et al.* (2000).