

Verwitterung V/S 24383 - Wintersemester 2005/6 - Prof. Dr. Walter Franke

Die Skripte ersetzt nicht die Lehrveranstaltung, sie soll Ihnen weitgehend das Mitschreiben abnehmen.

Es sind keine Abbildungen enthalten, Kopien der Overheadfolien werden auf Nachfrage abgegeben.

Definition

Physikalische Verwitterung und chemische Verwitterung laufen in der Natur praktisch immer parallel ab.

Die chemische Verwitterung kann als irreversible Auflösung des Minerals in Wasser aufgefaßt werden, der in der Natur meist unmittelbar die Bildung neuer Minerale aus den gelösten Bestandteilen folgt - Insbesondere die Ergebnisse der Untersuchung der Gesteinsproben der Mondoberfläche zeigten, daß ohne Wasser überhaupt keine chemische Verwitterung eintritt.

Als physikalische Verwitterung werden Zerkleinerungsvorgänge zusammengefasst, bei denen keine Änderung der Phasenzusammensetzung auftritt.

Diese Definition ist für praktische Zwecke völlig hinreichend, ihre Grenzen zeigen sich bei Impaktvorgängen \Rightarrow Aufschmelzung, Verdampfung, selektive Kondensation, diaplektische Gläser, HP-Modifikationen

Physikalische Verwitterung = Zerkleinerung

Die Druckfestigkeit von Gesteinen liegt im Bereich 200 bis maximal 4000 kg/cm², dagegen beträgt die Biegezugfestigkeit meist etwa nur 10% dieses Werts!!

Die Zugfestigkeit von Stahl: ca. 4000kg/cm² !

Die geringe Zugfestigkeit von Gesteinen und Mineralen ist nicht auf die geringe Festigkeit der Kristallgitter zurückzuführen! Sie ist bedingt durch Baufehler, insbesondere Stufenversetzungen, bei Mineralen und bei Gesteinen zusätzlich durch schwächere Bindungen an den Korngrenzen. - Oxyd-Gläser mit völlig analogen Bindungen haben eine hohe Zugfestigkeit. (700 - 900 kg/cm²)

Thermische Ausdehnung (Pro °C $\Delta l / l = \beta = \text{ca. } 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ für Gesteine)

(1 m Länge, 50°C Temperaturdifferenz , Längenänderung 0,5 mm)

Temperatur nimmt nach innen exponentiell ab. Schattenseite!
 \Rightarrow Lockerung des Gesteinsverbandes, Abplatzen, Kernsprünge.

Wollsackverwitterung von Graniten:

„Granit-Tektonik“ nach Cloos: Granitplutone zeigen im lokalen Bereich eine Spaltbarkeit nach drei Ebenen, die annähernd rechtwinklig aufeinander stehen. Wahrscheinlich bedingt durch Spannungen, die durch die Umwandlung von Hochquarz in Tiefquarz bei ca. 572° C beim Abkühlen des Plutons auftreten (Kombination von radialen u. axialen Richtungen.) Granite sind daher oft

Wasserleiter. An der Oberfläche durch Zurundung der Kanten der Blöcke: Wollsackverwitterung.

Oft auch plattige Absonderungen parallel zur Oberfläche.

Orthogonale Klüfte werden aber zuweilen auch bei Qz-freien Plutoniten, wie etwa bei Gabbros beobachtet.

Basalte und Qz.-arme intermediäre Vulkanite, die an der Erdoberfläche schnell abkühlten, zeigen nur dort ein polygonales Rissmuster \Rightarrow Basaltsäulen.

(Unterschied: Erstarrungstemperatur von Basalt ca. 1000°C , die Erstarrung von Granit liegt im T-Bereich von ca. $780 - 640^{\circ}\text{C}$.)

Frostsprennung (Einstoffsystem Wasser)

- Alle Poren mit Wasser gefüllt, kryostatischer Druck! Nicht in Wüsten!
(Volumenzunahme von etwa 10% beim Gefrieren. Bei $-1^{\circ}\text{C} = 130\text{ bar}$)
Typisch in der Tundra - In Frostbodenzone (Gelosol) sog. Kryoturbation :
Netze eisgefüllter Spalten mit Maschenweiten von 0,4 – 10 m, Aufwölbung im Zentrum, Steinringböden.
- Poren nur zum Teil mit Wasser gefüllt, Oberfläche am kältesten,
Wasserdampf kondensiert zu Eis an der kältesten Stelle, \Rightarrow Kristallisationsdruck
Bei z.B. -5°C etwa 1,3 bar.
Eislinsen- und Kammeisbildung, Frostaufbrüche, Solifluktuationserscheinungen an Hängen.
Typische Bildungen im humiden u. borealen Klima. -
Strassenschäden/Frostaufbrüche
(Von Bedeutung auch in hohen Lagen der Atacama und in der Gobi.)

Salzsprennung:

Herkunft der Salze:

Aus chem. Verwitterung: Na, Ca, Mg, K, Al, eventuell SO_4 aus Pyritverwitterung, Karbonat aus Kohlendioxid der Luft. Wegen $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{CO}_3 \Rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ kommt nie Soda neben Gips vor!! (Gipsdüngung von alkalischen Böden)

Aus der Atmosphäre: Regenwasser enthält $\text{CaSO}_4 + \text{NaCl}$, je ca. 2 bis 3 ppm, Anreicherung nur wenn Verdunstung den Niederschlag überwiegt! (Arides Klima oder Überhänge)

In Küstennähe Transport von NaCl durch Nebel und Gischt. / $\text{HCl} + \text{SO}_2 \Rightarrow$ Vulkane

Biogene Herkunft: Der Harn von Säugetieren enthält NaCl. / Angewehte Asche

Kristallisationsdruck von Salzen

Glaubersalz (Natriumsulfat-10-Hydrat) schmilzt bei 32°C im eigenen Kristallwasser. Diese Umwandlungstemperatur wird durch andere Salze um ca. 3°C pro Mol/L erniedrigt - Dadurch in Wüsten und regengeschützten Überhängen häufige Wechsel!
- Quervain-test

Kristallisationsdruck auch durch Magnesiumsulfat-Hydrate, NaCl und Gips.

Tafoni-Verwitterung: Bildung von Löchern

Wichtige Art der physikalischen Verwitterung in Wüsten und an Bauten.

Steile Wände und Überhänge haben quasi Wüstenklima!

Salzverwitterung von Bauten:

- Soda als Zementzuschlag reagiert mit Gips aus Putz zu Kalk + Natriumsulfat
Ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_{10}(\text{OH})_{10}\times 26\text{H}_2\text{O}$
- Kalk, bzw. Dolomit reagiert mit Schwefeldioxid der Luft zu Gips, bzw. Magnesiumsulfat

Windschliff – Sand: Saltation + Reptation – (Bagnould 1941) **Winderosion**

Schwerkraft + Wasser:

Transport durch Wasserläufe, Schichtfluten, bzw. (periodisch fließende) Flüsse, durch Gletscher, durch Brandung.

Erdrutsche in durchfeuchteten Böden (nach Niederschlägen von mehr als 200 mm) Bergstürze (Auslöser oft Erdbeben) - Lawinen

Talformen: V-, U-Tal, Canon, Moränen, Gletscherschliff

Bagnould - Sand + 14 - 18% = Verlust der Scherfestigkeit

Quick sand/ Wirbelbett/ Wasserrohrbruchfolgen / Turbidite

Mechanische Wirkung von Organismen:

z.B.:Wurzeln, Bioturbation: Regenwurm, Ameisen, usw., Windbruch - black fungii- Schnecke Echinus esculentus mit Magnetit-xx auf der Zunge - Bohrmuschel Polydora ciliata auf Kalk. - Ringelwurm Glycera branchiata besitzt hohle Giftzähne aus Atacamit

Hemmende Wirkung von dichtem Pflanzenwuchs auf Erosion:

Schutzwälder, Urwälder, Tundravegetation, Schilfgürtel, Mangrovenwälder

Indirekte Wirkung: Überweidung (black locust) - Savanne-Wald (homo sap./Feuer/Elefant)

Thermodynamik

Naturwissenschaftliche Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Masse und verschiedenen Formen von Energie, insbesondere bei Änderungen von Temperatur, Druck, Volumen, bei Phasenübergängen und bei chemischen Reaktionen. - Entwickelt im wesentlichen im 19ten Jahrhundert.

Grundlage sind die drei „Hauptsätze“ der Thermodynamik:

Erster Hauptsatz: (Julius Robert Mayer 1842)

Erhaltung von Energie und Masse, bei gegenseitiger Umwandlung gilt nach Einstein $e = m c^2$ (Nur bei subatomaren Prozessen)

Andere Formulierung: Bei einem Vorgang ist die Summe aller Energien im System konstant.

Andere Formulierung: Unmöglichkeit des Perpetuum mobile 1ter Art:

Es ist nicht möglich eine Maschine zu konstruieren, die Energie aus den Nichts erzeugt.

Zweiter Hauptsatz: Clusius u.a.

Unmöglichkeit des Perpetuum mobile 2ter Art:

Es ist unmöglich eine Maschine zu konstruieren, die nichts weiter bewirkt als die Abkühlung eines Wärmebehälters und die Hebung einer Last.

Andere Formulierung: Es ist unmöglich in einem makroskopischen System kontinuierlich Wärmeenergie zu 100% in eine andere Energieform überzuführen.

Dritter Hauptsatz: Nernst

Unmöglichkeit der Erreichung des absoluten Nullpunkts.

Schwäbische Formulierung:

„Aus nix wird nix“ (1. Hauptsatz)

„Man bekommt maximal so viel heraus, wie man hereinsteckt, und das auch bloss am absoluten Nullpunkt“

(2. Hauptsatz)

„Und der ist unerreichbar“ (3. Hauptsatz)

Auf dieser Grundlage baut die chemische Thermodynamik anhand von vielfältigen Messergebnissen und logischen Erwägungen eine formelmässige Systematik auf, die es u.a. gestattet zu berechnen ob unter bestimmten Verhältnissen (Druck, Temperatur, Konzentrationen) eine chemische Reaktion ablaufen kann. (Ca. 50% der Physikalischen Chemie)

Wichtigste Formeln:

Gasgesetz: $p v = n R T$

Gibbs'sches Phasengesetz: Die Zahl der Phasen plus die Zahl der Freiheiten ist gleich der Zahl der Komponenten plus 2. $P + F = K_o + 2$

Massenwirkungsgesetz: Das Produkt der Konzentrationen der rechten Seite einer chemischen Reaktionsgleichung, geteilt durch das Produkt der Konzentrationen der linken Seite ist bei konstanter Temperatur konstant = Gleichgewichtskonstante. Die in der Reaktionsgleichung erscheinenden stöchiometrischen Faktoren erscheinen dabei als Exponenten der Konzentrationen. Reine feste oder flüssige Stoffe bleiben dabei unberücksichtigt.

Die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtskonstante und damit die Lage des chemischen Gleichgewichts lässt sich berechnen, wenn genügend Daten über das betreffende System bekannt sind. Zu diesen Daten zählen insbesondere die spezifischen Wärmen und ihre Temperaturabhängigkeit und alle relevanten Reaktionswärmetönungen. (Molare Entropien und Bildungsenthalpien)

Für geologisch wichtige Fragestellungen können heute vielfach Computerprogramme zur Berechnung des chemischen Gleichgewichts benutzt werden. Die notwendigen thermischen Daten sind im Programm enthalten, teils gemessen, teils inter- oder extrapoliert, teils geschätzt.

Die Berechnung sagt Ihnen, wo das chemische Gleichgewicht liegt, d.h. **ob eine Reaktion ablaufen kann oder nicht**. Damit ist aber keineswegs sicher, dass das Gleichgewicht sich auch tatsächlich einstellt ⇒

In allen benutzten Formeln kommt eine Dimension nicht vor: Die Zeit !!

Mit der Zeitabhängigkeit von chemischen Reaktionen beschäftigt sich die Kinetik.

Als eine allgemeine Erfahrungstatsache gilt: Das Gleichgewicht stellt sich schneller bei höheren Temperaturen ein.

Chemische Verwitterung nur wenn Wasser vorhanden !

Karbonate : Bildung von Calciumhydrogencarbonat: **Karst**, Dolinen, Stalaktiten, Taurillen.

In luftgesättigtem Wasser ist Kalk 4x so löslich wie in reinem Wasser. Extreme Steigerung der Löslichkeit bei höheren Kohlendioxid-Drucken! - Zeitlich begrenzte Bindung von CO₂ :

Wird bei Ausfällung des Calcits im Weltmeer wieder frei. - **Reversibler Prozess**

Silikate + Oxide ⇒ Auflösung in Wasser, meist sofort Bildung neuer, thermodynamisch beständiger Minerale - Irreversibler Prozess

Hängt ab von pH und Konzentrationen der gelösten Stoffe

also von Wassermenge und ev. vorhandenen Säuren (CO₂ + org. Säuren) + Chelatbildnern

Durch Silikatverwitterung freiwerdendes Calcium bindet Kohlendioxid dauerhaft!

Luftgesättigtes Regenwasser hat pH von ca. 5,5 bis 6 / Sog. „saurer Regen“ durch Schwefeldioxid aus Verbrennungsabgasen, kann auch lokal durch Exhalationen von Vulkanen verursacht werden: pH-Werte von etwa 4 , in Extremfällen bis 2.

Bodenwasser meist neutral, Porenwasser in silikatischen Gesteinen kann auch alkalisch sein.

Typische Neubildungen : Schichtsilikate (Tonminerale), FeOOH, Hämatit, Gibbsit

bei höherem pH und hoher Konzentration von Alk.+ Erdalk.-Ionen =

Dreischichtminerale: Illit wenn überwiegend Al+K vorhanden, mit Mg Smectite, Montmorillonit, mit Mg + Fe(II), manchmal auch Chlorit, selten Palygorskit (fast nur bei höherer Salinität)
(Humid bis Arid)

bei niedrigem pH und allgemein niedrigen Konzentrationen =
Zweischichtminerale

Kaolinit, Halloysit, (Allophane, Imogolit = rö.amorphe Tonminerale)
(Humid bis Tropisch)

bei extrem niedriger Kieselsäurekonz. (kleiner 1 ppm) = Gibbsit + Hämatit (Tropisch)

Natürlich stets auch abhängig vom Ausgangsgestein!! Eventuell durch Klimawechsel überprägt.

Was wird aus den bei der Verwitterung freigesetzten Elementen?

Fe³⁺ ⇒ FeOOH, überwiegend als Goethit, seltener Lepidokrokit, nur bei extrem schneller Bildung durch Oxidation von 2-wertigem Fe als Ferrihydrit.
Bei höherer Bodentemperatur entsteht Hämatit ⇒ Roterde.
Aus dem Verhältnis Goethit/Hämatit kann auf die Bodentemperatur geschlossen werden./ Der Anteil an organisch gebundenem Fe(II) kann in Böden bis zu 50% des Gesamt-Fe erreichen.
Geringe Mengen in Schichtsilikaten: Glaukonit, Chlorit, Hisingerit, Nontronit, Chamosit, Thuringit, Greenalith (teils halmyrolitisch gebildet)

Mn ⇒ unter aeroben Bedingungen Oxide, bzw. Hydroxide des 3, bzw. 4 wertigen Mn.

Al³⁺ ⇒ Tonminerale; wenn viel Wasser da ist auch Al(OH)₃ , AlOOH (amorphe Ton-Minerale: Imogolite, Allophan)

Si ⇒ teils Tonminerale , Überschuß kolloidal abtransportiert, Bildung von flint (Feuerstein), bzw. Chalcedon, sedimentär gebildeter Quarz, sehr selten Opal.

Ti ⇒ Anatas ist eine Neubildung, Rutil entstammt dem Ursprungsgestein Leukoxen ist ein weissliches Umwandlungsprodukt von Ilmenit. bzw. Titanomagnetit

Mg (Fe²⁺) zusammen mit Al ⇒ Tonminerale

Ca, Na, K ⇒ teils in Tonmineralen als austauschbare Ionen (K bevorzugt gebunden, bedeutend für Pflanzenwuchs) , Überschuß als Hydroxid ⇒ + CO₂ ⇒ Calcit , bzw. Hydrogencarbonat abgeführt. Ca aus Silikatverwitterung bindet CO₂ dauerhaft!!

Boden (soil):

Zusammensetzung unterschiedlich je nach Herkunftsgestein - Im Sand- und Silt-Anteil überwiegt oft Quarz, Alkalifeldspat u. etwas Hellglimmer, im Ton Tonminerale u. Fe-Oxide. Zuweilen Calcit, bzw. Dolomit. (Seltene Mineralneubildung in Böden ist Hydrogrossular, hier ist das SiO₄-Tetraeder ganz oder teilweise durch vier H₃O⁺ ersetzt.)

Organische Substanz (Humus) in mitteleuropäischen Böden meist zwischen 1 und 30% - In Moorböden teils sehr viel höher. Im humiden Klima geht ein Teil der organischen Substanz durch mikrobiellen Abbau vorwiegend von Zellulose und Lignin in Huminstoffe über. Dies sind hochmolekulare verknüpfte aromatische Ringe

mit funktionellen Gruppen, vor allem OH und COOH-Gruppen. Deshalb Säurecharakter, also Kationenaustauscher, zusätzlich können Metalle als Komplexe (Chelate) gebunden werden. Huminstoffe meist dunkel gefärbt.

In vielen tropischen Böden vorwiegend Kaolinit mit extrem geringer Austauschkapazität und wenig Huminstoffe! - Folgerungen für Ackerbau: Nur im ersten Jahr gute Ernte! War bereits bekannt bei Naturvölkern mit Steinzeitkulturen in tropischen Gegenden !! - Bodenverbesserung möglich durch Unterarbeiten von Holzkohle + Fäkalien im Gartenfeldebau. (Indios im Amazonasgebiet)

Wüstentypisch:

Palygorskit , Sepiolit (hoher pH, viel Mg-Ionen) - Evaporitminerale: Salze, Gips
 Kieselsäurepanzer - Krusten auf Sandsteinen - verkieseltes Holz :
 Wahrscheinlich Relikte niederschlagsreicherer Zeiten bei gleicher geograph. Lage (Würzburger Schule-Hagedorn)?
 Wüstenlack - Polituren durch Staub+Sandschliff
 Eher 3 Schicht-Tonminerale als 2-Schicht-Tonminerale

Weitere Verwitterungsminerale

Crandallit - Goyazit - Gruppe

Sehr stabile, schwerlösliche und teils säureresistente Minerale mit trigonaler Struktur. Treten als Verwitterungsprodukte vorwiegend von Karbonatiten auf.- Isotyp mit Jarosit.

Crandallit $\text{CaAl}_3 [(\text{OH})_6 / (\text{PO}_4)_2]$ theoretisches Endglied, rein nicht existent

Goyazit $\text{SrAl}_3 [(\text{OH})_6 / (\text{PO}_4)_2]$

Florencit $\text{CeAl}_3 [(\text{OH})_6 / (\text{PO}_4)_2]$

In das Gitter werden auch eingebaut U, Th, Nb, seltene Erden, Ba, Pb und AsO_4 . Die reinen Arsenate sind selbst in heißen conc. Säuren unlöslich, wurden als Endlagermatrix für radioaktive Abfälle vorgeschlagen.

Bei der Verwitterung von Sulfidmineralen tritt auf

Jarosit $\text{KFe}_3 [(\text{OH})_6 (\text{SO}_4)_2]$ gelb-braun, fällt aus bei ca. pH 2, nimmt erhebliche

Mengen von Schwermetallen wie Cu, Pb, Zn auf, K kann durch H_3O , Na und NH_4 ersetzt werden.

Alunit ist die entsprechende Al-Verbindung. Bei den Mineralen der Beudantit-Gruppe ist im Anion Sulfat + (Phosphat oder Arsenat) vertreten. Typisch in der Oxydationszone von Erzen.

Verwittert bei Wasserzufuhr langsam weiter zu Limonit+Hämatit \Rightarrow Eiserner Hut (gossan).

Die Phosphate, bzw. basischen Phosphate fast aller mehrwertigen Kationen sind schwerlöslich, sie finden sich deshalb häufig als Verwitterungsminerale und in Fluss- und See-Schlämmen.. Typischer und bekannter Vertreter ist der Pyromorphit. - Methode zur Phosphatentfernung aus Wasser: Fällung als FePO_4 , bzw. AlPO_4 .

Nachteil: In Industriegegenden sind solche Schlämme oft schwermetallhaltig (z.B. Hafenschlämme)

Alle primären **Uranminerale** enthalten vierwertiges Uran und sind extrem schwerlöslich:

Uraninit UO_2 , Coffinit USiO_4 und Brannerit (Uran-Titan-Oxid)

Der wesentliche Schritt der Verwitterung dieser primären Uranerze ist die Oxydation, die ist annähernd temperaturunabhängig! - Alphastrahlen bilden mit Wasser Wasserstoffsuperoxid, dies oxydiert das 4-wertige Uran. - Das dabei gebildete sechswertige Uran liegt als UO_2^{2-} Ion vor, es bildet mit fast allen Anionen Komplexe, die Karbonato-Komplexe sind leicht löslich! Das Uranyl-Ion ist hantelförmig gebaut, es passt in kein anderes Kristallgitter; deshalb bilden sich eigene Uranyl-Minerale (über 100 Stück bekannt) die sich oft durch grelle Farben auszeichnen, meist gelb. Am häufigsten sind die sogenannten Uranglimmer. Dies sind keine Silikate sondern Phosphate : $\text{UO}_2 + \text{PO}_4$ bilden zweidimensionale Schichten, dazwischen sitzen Wasser + Kationen.

Sek. Uranminerale, die keine Übergangsmetallkationen enthalten, zeigen UV-Fluoreszenz.

Einige Minerale des sechswertigen Urans werden durch Calciumhydrogencarbonat-Lösungen gelöst, es bilden sich Carbonato-Komplexe mit erheblicher Löslichkeit (bis zu 10^{-2} molar!) - Solche Lösungen können unter reduzierenden Bedingungen (Lignit/Sumpf) zu Urananreicherungen führen, da das 6-wertige U zu vierwertigen U reduziert wird.

Primärer Schritt der Verwitterung von Sulfiden ist ebenfalls eine Oxydation. Hier meist Mitwirkung von Bakterien, fast der gesamte Schwefelkreislauf an der Erdoberfläche wird bakteriell bewirkt.!!

Sek. Verwitterungs-Mineral = Gips (Vulkane: $\text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{Ca}$ aus Silikaten)

In magmatischen + metamorphen Gesteinen, aber auch in vielen Sedimenten herrschen bei der Bildung reduzierende Bedingungen!

Deshalb liegen Elemente mit mehreren Wertigkeiten ganz oder überwiegend in niedrigen Wertigkeiten vor \Rightarrow Fe, Mn, Cr, V, As, Se, Te, U.

An der Erdoberfläche bei Verwitterung kann Oxydation eintreten:

z.B. Vanadium ist kein seltenes Element mit 110 ppm in der Kruste. Es wird im magmatischen und metamorphen Bereich als dreiwertiges Ion statt Eisen in Pyroxene, Amphibole, Magnetit und Biotit eingebaut und ist entsprechend fein verteilt, bildet deshalb keine nutzbare Lagerstätten. Bei der Verwitterung wird es zum Ion VO_4^{3-} mit fünfwertigem Vanadium oxydiert. Nutzbare Lagerstätten sind z.B. schwerlösliche Salze dieses Ions:

Vanadinit $\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{VO}_4)_3$ oder Descloizit $\text{PbZn}(\text{OH})\text{VO}_4$, (Carnotit ist ein Kalium-uranylvanadat / Hauptabbauerz war lange Zeit Patronit VS_4 aus nur einer Lagerstätte in

den peruanischen Anden in 5500 m Höhe. Da Patronit zusammen mit organischen Substanzen vorkam, dürfte er durch Reduktion von fünfwertigem V sedimentär entstanden sein

Noch krasser sind die Bedingungen beim Chrom (200ppm), das 3- und 6-wertig auftreten kann. Das Haupterz ist Chromit FeCr_2O_4 als frühmagmatische Ausscheidung, in eisenreichen Mineralen finden sich nur Spuren (Olivin, Magnetit). Das Oxydationspotential an der Erdoberfläche reicht nicht aus um sechswertiges Cr zu bilden. Cr wird nur bei hohen Temperaturen und im alkalischen Milieu bei Gegenwart von Sauerstoff oxydiert. Solche Bedingungen sind im Kreislauf der Gesteine extrem selten \Rightarrow Abbrennen von bituminösen Kalken (mottled zone), nur wenn das gebildete Chromat-Ion anschliessend als schwerlösliches Salz fixiert wird, bleibt das Chromat erhalten \Rightarrow Krokoit PbCrO_4 , bzw. BaCrO_4 im Hashemit, einem Mischkristall mit BaSO_4 . Entsprechend selten sind Chromate!

As tritt im endogenen Bereich praktisch nur gebunden an Sulfide auf, bei der Oxydation bilden sich Arsenite (III) und Arsenate mit As(V).

Die seltenen Elemente Se + Te finden sich im endogenen Bereich gebunden an Metalle, zusammen mit Sulfiden. An der Oberfläche werden sie schnell zur vierwertigen und sechswertigen Stufe oxydiert und bilden Selenite und Selenate.

Elemente aus der Verwitterung des Gesteins finden sich partiell in

\Rightarrow **Boden** = Spurenanalyse meist nicht sinnvoll/ manchmal Indikatorpflanzen
(Li, Cu, As, Pb, Al, Ni) Phytomining - Australische Jarah-Bäume wachsen nur auf Bauxit-haltigen Böden.

\Rightarrow **Wasser** = Wasseranalysen in catchment-Systemen. (Anreicherungsverfahren)

\Rightarrow **Luft**, vorwiegend Luft in Sedimentporen oberhalb des Grundwasserspiegels.
Beispiele : Hg / COS (Kohlenoxysulfid) als Indikator von Sulfiderzen

Mikroorganismen

Bakterien sind Einzeller ohne Zellkern (Prokaryonten, prokaryots) - Je nach Aufbau der Zellhülle unterscheidet man gram-positive und gram-negative Bakterien, Unterscheidung durch Färbbarkeit.

Bakterien, aber auch alle anderen Lebewesen, können als chemische Fabriken aufgefasst werden, die Rohstoffe und eine Energiequelle benötigen und die etwas produzieren, nämlich Duplikate von sich selbst und die dabei Abfälle ausscheiden. - Als Energiequelle wird ein Elektronentransfer benutzt: Ein Elektronendonator gibt Elektronen ab, die von einem Elektronenakzeptor aufgenommen werden. Als Rohstoffe werden benutzt: Organische Substanzen oder CO_2 + Wasser, sowie viele anorganische Substanzen: K, Na, Ca, Mg, Fe, PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cl^- , stickstoffhaltige Substanzen u. a.

Heterotrophic microorganism (chemo-organotrophs) :

Donator ist eine organische Substanz, Akzeptor ist entweder Sauerstoff (aerob) oder NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , Mn^{4+} , organische Substanz (anaerob)

Chemolithotrophs or autotrophic bacteria:

Donator ist Fe^{2+} , S^{2-} , S^0 , NH_4^+ , Mn^{2+} u. a., Akzeptor ist CO_2

Cyanobacteria (blue-green algae), photobionts:

Donator: $h\nu$ (Photonen), Akzeptor: CO_2

Eine besondere Gruppe bilden die Archebakterien mit den Gruppen:
methanogens - extreme halophiles - thermoacidophiles

Einige Bakterien sind in der Lage Luftstickstoff in organisch gebundenen Stickstoff umzuwandeln. (Teils in Symbiose mit Pflanzen)

Eukaryonten (eucaryots) haben einen Zellkern, es gibt hier Einzeller wie Protozoen (Amöben) und Grünalgen, aber auch Mehrzeller wie Pilze (fungi), Flechten (lichen) als Symbiose zwischen Pilz und Algen, und schliesslich Pflanzen und Tiere. - Symbiosen zwischen Mehrzellern und Bakterien sind extrem häufig, aber auch die meisten Bakterien leben im Prinzip symbiotisch! - Bakterien sind in der Lage Erbinformationen untereinander auszutauschen!

In den 90er Jahren wurde ein gram-negatives Bakterium (Shewanella oneidensis) entdeckt, das diese Fähigkeit offenbar extensiv ausgenutzt hat. Normalerweise nutzt es Sauerstoff um organische Substanzen abzubauen; gerät es in ein anaerobes Milieu so ist es in der Lage alternative terminale Elektron-akzeptoren zu nutzen, z.B. Mn(III) , Mn(IV) , Fe(III) , Cr(VI) , U(VI) , Nitrat; u.a. wird Sulfit, Thiosulfat und elementarer Schwefel zu H_2S reduziert. Wegen der möglichen Benutzung bei der Behandlung von Abfällen wurde 2002 die komplette Genomsequenz des Bakteriums bestimmt.

Die Rolle von Mikroorganismen bei der Gesteins- und Baustoffverwitterung wird erst seit etwa 30 Jahren erforscht. Sie besiedeln praktisch alle Hohlräume und Klüfte bis zu erheblichen Tiefen. - Direkt an der Erdoberfläche in Böden, in Lockersedimenten und im Ozean finden sich im Mittel etwa 1 Million Bakterien pro Kubikzentimeter!! Die Zahlen für andere Mikroorganismen, wie Pilze (fungii), Protozoen und Algen liegen um ca. 2 bis 4 Größenordnungen niedriger.

Weniger als 10% der Bodenbakterien und nur ca. 0,1% der marinen Bakterien konnten bisher auf Nährboden kultiviert werden! - Pilze und Flechten (Symbiose zwischen Pilz and Algen) bewirken teils eine physikalische Verwitterung durch Wachstum in das Gestein mit Raten von 0,1 bis 0,01 mm/a, andererseits scheiden sie Stoffe aus die den lokalen pH-Wert erhöhen (Säuren) und/oder komplexierend wirken. (Polysaccharide, Oxysäuren) - Zu den von Bakterien ausgeschiedenen Säuren zählen: Oxalsäure, Fumar- + Maleinsäure, Zitronensäure, Glucon- und Milchsäure, sowie Kohlendioxid.

Einige Species produzieren starke Säuren wie Schwefel- und Salpetersäure und können eine rasche Verwitterung von Calcit-haltigen Gesteinen und Beton im anaeroben Bereich bewirken. Die bakteriell bedingte Oxydation von Eisen in Sauerstoff-freien Lösungen ist belegt.- FeS , Pyrit und Markasit werden biogen im

sedimentären Bereich gebildet, bzw. bei Änderung der pH-Werte und des Sauerstoffangebots wieder abgebaut. Kleine Pyrit-“Schornsteine“ im Schwarzen Meer.

(Praktische Bedeutung: Pyrit/Markasit im Abraum von Braunkohlentagebauten. Bei der Rekultivierung und Flutung \Rightarrow Fe-Hydroxide + Schwefelsäure, saure Reaktion des Wassers.

Zwei Möglichkeiten der Abhilfe: 1. + Kalk 2. + Org. Stoffe, dadurch reduzierendes Milieu im tiefen See-Bereich, Neubildung von Pyrit unter biologischer Reduzierung von Sulfat und dreiwertigem Eisen.)

- Einige Autoren sind der Ansicht, dass die Bildung von Mn-, bzw. Eisenoxid-Krusten im ariden Klima durch Mikroorganismen verursacht werden.

Einige Mikroorganismen (Blau- und Grünalgen) benötigen nur Mineralstoffe + Kohlendioxid + Licht. Sie gehören zu den Erstbesiedlern von frisch gebildetem vulkanischen Gestein.

Die Spezialisierung von Mikroorganismen ist zuweilen erstaunlich; so fand man kürzlich in Silberminen Bakterien, die Silbernitrat als Stickstofflieferant abbauen und metallisches Silber abscheiden, obwohl Ag-Ionen sonst meist extrem bakterizid sind.

In den Abwässern einer alten Goldmine bei Limoges (Frankreich) fand man ein Bakterium das dreiwertiges Arsen zu Arsenat oxydierte.

- Anaerobe thermophile Archebakterien haben teils Lebensoptima bei bis zu 140°C (Unter erhöhtem Druck.) -

Verwitterungsgeschwindigkeit

Die Verwitterungsgeschwindigkeit kann statt in **Masse pro Fläche und Zeit** auch durch die Division durch die Dichte und Kürzen der metrischen Dimensionen ausgedrückt werden als

Länge pro Zeit Größenordnung $1\mu\text{m/a} = 1\text{m}$ in 1 Mio a \Rightarrow Bunnoff unit (geomorphologischer Begriff, fasst chem. und physikalische Verwitterung zusammen! Die berechneten Abtragungsraten für Ebenen liegen meist zwischen 10 und 90 Bunnoff-Einheiten.)

Die chemische Verwitterung ist in dieser Dimension der am langsamsten ablaufenden Vorgang in der Natur!! Vergleich mit Hebung/Senkung und Plattentektonik.

Zwischen 1940 und heute wurden weit über 1000 experimentelle Arbeiten zur chemischen Verwitterung publiziert. Die Ergebnisse lassen sich so zusammenfassen:

Methode: Pulver im silt-Bereich/ Oberfläche durch Gasadsorption bestimmt, (BET-Methode) - gelöste Menge durch Analyse aliquoter Volumina - batch oder Durchfluss, teils pH constant durch Puffer oder Säure/Lauge-Zusatz.

Kritikpunkte: Oberfläche meist zu gross / MWG = pH soll konstant sein, alle anderen Konzentrationen möglichst = Null!! Dann grösste Verwitterungsgeschw.

Eigene Arbeiten: 1985 - 1997/ Makroskopische Flächenbestimmung + Gewichts-differenz, deshalb lange Versuchszeiten / Dafür Konzentrationen annähernd Null durch Benutzung von Kationenaustauschern in der H^+ Form.

Karbonate (Calcit, Dolomit, Magnesit), sowie Sulfate + Phosphate lösen sich stöchiometrisch auf. -

Dies ist bei Silikaten anfangs nicht der Fall. Bei Kontakt der Silikatoberfläche mit Wasser werden die zwei- und ein-wertigen Ionen an der Oberfläche sehr schnell durch H_3O^+ Ionen ersetzt. Dies betrifft aber nur etwa eine Tiefe von einer halben Elementarzelle!! Das Fortschreiten der Reaktion erfordert einen diffusiven Transport von H^+ aus der Lösung durch die gestörte Schicht zum Kristall und umgekehrt eine Diffusion der verdrängten Kationen von der Gitteroberfläche durch die gestörte Schicht in die umgebende Lösung. Beim Fortschreiten der Reaktion werden auch Al und andere dreiwertige Ionen durch H^+ ersetzt. Es bildet sich auf dem Gitter eine kationen-verarmte Schicht aus, die vorwiegend aus SiO_2 besteht. (cation depleted layer)

Der gestörte Gitterbereich besteht im wesentlichen aus den SiO_4 - Tetraedern in dem der Struktur des Minerals entsprechenden Vernetzungszustand. Die freien Tetraedersauerstoffe, die im Gitter ehemals ein-, zwei- oder drei-wertige Kationen koordinierten, sind in OH-Gruppen übergegangen. - Schliesslich lösen sich Orthokieselsäure H_4SiO_4 oder Polykieselsäuren von der Störschicht ab und gehen in Lösung. Im neutralen bis saurem Bereich sind solche Kieselsäuren nicht lange beständig, sie kondensieren zu kolloidal löslichen, kugelförmigen SiO_2 -Teilchen mit einem Durchmesser von 5 - 80 nm.

Eine stöchiometrische Auflösung ist dann erreicht, wenn die Reaktion des Kristallgitters mit dem diffusiv herantransportierten H^+ gerade soviel neue Störschicht pro Zeit schafft, wie an der Grenzfläche Störschicht/Lösung abgebaut wird. Bei Normaltemperatur und im neutralen bis saurem Bereich ist dies im Experiment meist nach etwa 30 Tagen erreicht.

Die Störschichten wurden auf Feldspäten und eisenfreien Ketten- und Bandsilikaten mit modernen physikalischen Methoden auch direkt nachgewiesen. Sie haben im neutralen Bereich eine Dicke von etwa 3 Elementarzellen, mit sinkendem pH wird die Schicht dicker und kann dann 10 bis 15 Elementarzellen erfassen.

Die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten der vergangenen Jahrzehnte können wie folgt zusammengefaßt werden. In der graphischen Darstellung mit dem Logarithmus der Auflösungsgeschwindigkeit als y-Achse und dem pH-Wert als x-Achse ergibt sich ein flaches, fast pH-unabhängiges Minimum im Bereich etwa pH 5 bis 7. Sowohl im alkalischen, als auch im sauren Bereich schließt in dieser Darstellung ein etwa linearer Anstieg an. Die Steigung der Geraden im Bereich pH 5 bis 2 ist von Mineral zu Mineral unterschiedlich, sie beträgt 1 bis 3 Zehnerpotenzen. Diese Steigung ist am geringsten bei Muskowit, am höchsten bei Olivin. - (Erklärung: Löslichkeit von silica versus pH)

Eine abweichende Darstellung ergibt sich bei der Quarzauflösung, hier zeigt sich ein flaches, annähernd pH-unabhängiges Minimum im sauren Bereich, an den sich ab etwa pH 7 ein flacher Anstieg im alkalischen Bereich anschließt. -

In Porenzwischenräumen silikatischer Gesteine, bzw. entsprechenden Lockersedimenten kann auch ein alkalischer pH von 8 bis 10 erreicht werden!

Unter den gesteinsbildenden Silikaten ist Plagioklas am häufigsten, er verwittert relativ schnell. Seine Verwitterungsgeschwindigkeit hängt vom Anorthitgehalt ab, bei 20°C, pH 5,5 liegt seine Verwitterungsgeschwindigkeit entsprechend bei 0,15 (Albit) bis etwa 9 µm/a (An).

Noch erstaunlicher als diese sehr geringen Werte ist der erhebliche Unterschied zwischen leicht und schwer verwitternden Mineralen. Sieht man einmal von extrem schwer verwitternden Mineralen wie Quarz, Zirkon, Topas, Turmalin und Beryll ab, so erstreckt sich der Bereich zwischen den langsam verwitternden Mineralen (Alkalifeldspäte, Muskowit) und den schnell verwitternden Mineralen (Calcit, Olivin, Nephelin, Dolomit) über fast vier Zehnerpotenzen!!

Die vorstehend geschilderten Ergebnisse von Experimenten können nicht ohne weiteres auf die natürliche Verwitterung übertragen werden. In der Natur gibt es Trockenperioden, weder ist der pH-Wert noch die Temperatur stets gleich; in der Lösung vorliegende ein-, zwei- und dreiwertige Ionen verlangsamen die Auflösung. Alle diese Faktoren bewirken, dass die wirkliche Verwitterungsgeschwindigkeit fast immer beträchtlich niedriger ist. So fand man bei der Untersuchung der Auflösungsdaten von Kalken in Japan in der Natur nur Werte im Bereich von 1 bis 30% der Labordaten!

Andererseits kann die biologische Aktivität von Mikroorganismen zu lokaler Säurebildung führen und durch eine Erniedrigung des pH auf Werte zwischen 2 und 4 die Verwitterungsrate je nach Mineral um den Faktor 10 bis 1000 steigern. - Organische Stoffe können durch Komplexbildung manche Kationenkonzentrationen erniedrigen und dadurch die Verwitterung beschleunigen. Erst 1999 wurde die komplexierende Wirkung einiger Polyalkohole für Kieselsäure nachgewiesen. Erste experimentelle Hinweise zeigten bei der Silikatverwitterung eine Steigerung der Verwitterungsrate bei der Anwesenheit von Sacchariden! - Insbesondere die Verwitterung von Sulfiden wird durch die Tätigkeit von Mikroorganismen (Thiobacillus ferrooxydans) bewirkt und dadurch stark beschleunigt.

Fazit:

- **Die rein anorganisch-chemische Verwitterung ist ein extrem langsamer Vorgang.**
Die Drift von Kontinenten ist um den Faktor 10.000 schneller!!
- **Die Abtragungsraten liegen bei Normalbedingungen (ca. 20°C , pH 5 bis 6) zwischen 0,07 (Muskowit) und 24 µm/a (Olivin). (Calcit hat 175 µm/a)**
- **Nur die wechselseitige Wirkung von physikalischer und chemischer Verwitterung erklärt die tatsächliche Verwitterung!**
- **Die chem. Verwitterung wirkt nicht nur an der Erdoberfläche; sie beginnt, sobald die Kristalloberfläche mit Wasser in Kontakt kommt.**
In vielen Fällen ist eine Abgrenzung der Verwitterung von hydrothermalen bis telethermalen Alterationen kaum möglich. (Kaolinisierung, Chloritisierung, Sericitisierung, Uralitisierung, Saussuritisierung)
- **Der Einfluss der Biosphäre auf die exogenen Vorgänge wird auch von Geowissenschaftlern häufig unterschätzt. Dies gilt insbesondere für den Einfluss von Mikroorganismen.**

Feldbeobachtungen zeigen eine schnellere Verwitterung im feucht-tropischen Klima. Es ist anzunehmen, dass dies sowohl auf das höhere Wasserangebot, als auch auf die höheren Temperaturen und damit höhere biologische Aktivität zurückzuführen ist. - Laboraten: Steigerung der Verwitterungsgeschwindigkeit von Silikaten von etwa 10% pro Grad° C im Bereich 10° bis 30°C.

Verwitterung und Bildung von nutzbaren Lagerstätten

- Seifen (placer deposits) ⇒ Mineral ist relativ verwitterungsbeständig, hart und hat meist eine Dichte höher als Quarz ⇒ Anreicherung beim Transport (Fluss, Brandung, Gezeitenströmung) z.B. Gold, Diamant, Zinnstein, Columbit/Tantalit, Titanomagnetit, Rutil, Zirkon, Ilmenit, Granat, Pt.
- Verwitterungsreste: Bauxit / Bei der Verwitterung von Ni-haltigen Olivin entstehen Nickelhydrosilikate wie Garnierit / Bei der Verwitterung von Zr-haltigen Silikaten, die in Nephelinsyeniten vorkommen, bleibt Baddeleyit ZrO_2 zurück.
- Anreicherung von Elementen im Ausgehenden von Sulfidieren in der Oxydationszone, bzw. Reduktionszone (Zementation) z.B. Cu, Ag, Au, Zn, Bi.
- Neubildung von Mineralen durch Reaktion von Sulfiden mit Wasser, Sauerstoff, Kohlensäure und mit Cl^- , PO_4^{3-} , VO_4^{3-} , SO_4^{2-} ⇒ Eiserner Hut (gossan)
Die meisten der etwa 4200 bekannten Minerale sind unter Oberflächenbedingungen gebildet worden!

Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit von Bausteinen

Grundlage: Dünnschliff \Rightarrow Mineralbestand \Rightarrow Gefüge, Porosität

leaching-tests \Rightarrow Soxhlet-Extraktion, bei Frosteinwirkung auch Quervain-Test

Bei einer Erniedrigung des pH-Werts erhöht sich die Verwitterungsgeschwindigkeit aller Minerale, allerdings ist die Steigerung erheblich grösser bei den schneller verwitternden Mineralen!!

Gleiches gilt für eine Steigerung der Temperatur von 20°C auf 100°C.

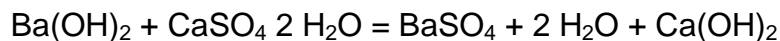
Durch eine experimentelle Verwitterung bei pH 2.2 und 100°C wird eine Beschleunigung um 2 bis 3 Zehnerpotenzen erreicht. Die Methode ist allerdings nicht anwendbar für Materialien die Karbonate enthalten!!

Experimentelle Tests können insbesondere zeigen, ob durch selektive Verwitterung eine Lockerung des Gesteinsverbandes eintritt \Rightarrow **Absanden**

Oft tritt bei eintretender Auflösung schnell ein Absanden von unverwitterten Mineralen auf, da der Kornverband gelockert wird! - Unter Umständen ist ein Gestein aus schneller verwitternden Mineralen wie Basalt, bei dem aber keine Lockerung des Kornverbandes eintritt, länger stabil als ein zur Vergrusung neigender Granit! (Schliesslich ist die Verwitterungsgeschwindigkeit absolut nicht sehr gross!)

Die Verwitterung wird stets begünstigt durch eine Porosität!

Stuckgips-Teile für Fassaden können witterungsbeständiger gemacht werden:



der Baryt ist extrem schwerlöslich, die Teile werden anschliessend mit Kali-Wasserglas getränkt, dadurch wird das Calciumhydroxid in ein aushärtendes und wasserunlösliches Kalium-Calcium-Glas überführt.

Zement ist eine bei hoher Temperatur (ca. 1400°C) gesinterte Masse aus Kalk+Ton+Fe-oxiden, wird nach dem Abkühlen fein gemahlen.

Mit Wasser angerührt wird diese Masse langsam fest. Dabei bilden sich Calciumhydroxi-Silikate und Aluminate, sowie Calciumhydroxid. Die Aushärtung erfolgt auch unter Wasser und ohne Luftzutritt.

Beton ist eine möglichst dichte Packung von Kies + Grobsand, deren Poren durch abgebundenen Zement gefüllt sind. Korngrößenverteilung von Kies und Sand, sowie die Art des benutzten Zements sind von entscheidender Bedeutung für die Festigkeit, aber auch für die Verwitterungsbeständigkeit des Betons!!

Die Verwitterungsgeschwindigkeit der Zementmatrix ist normalerweise vergleichbar etwa mit der von Calcit, bzw. von Dolomit!!

Beton kann verwitterungsbeständiger gemacht werden durch eine Behandlung mit einer Lösung von Mg-, bzw. von Zn-silicofluorid. MgSiF_6 . Dabei bildet sich durch Umsetzung mit dem Calciumhydroxid, bzw. den Calciumhydroxisilikaten ein Gemisch

von Fluorit, MgF_2 , bzw. Zinkfluorid und kolloidalem SiO_2 , dabei sinkt insbesondere die Porosität erheblich \Rightarrow **Fluatieren**.

Nichtporöse, glatte Oberflächen (poliert) sind mindestens mittelfristig weniger anfällig für Verwitterungseinflüsse!

Alle organischen Schutzschichten (Lacke, Füllung von Poren mit Kunststoffen) sind sehr skeptisch zu beurteilen. Praktisch alle organischen Materialien werden von Organismen angegriffen, bzw. reagieren unter Versprödung unter dem Einfluss von Licht + Wasser mit Sauerstoff oder Stickoxiden. Relativ beständig sind lediglich total fluoridierte Produkte, die überdies auch hydrophobe Oberflächen bilden. Über ihre extreme Langzeitbeständigkeit liegen aber kaum Daten vor. - Bei Restaurationsarbeiten werden poröse Steine öfter mit Kieselsäureestern behandelt: durch langsame Verseifung der Ester wird in den Poren Kieselsäure ausgeschieden. - Neuere Methode: Tränken mit Lösungen von kolloidaler Kieselsäure.

Beständigkeit anderer technischer Produkte

Hochgebrannte, nicht poröse Keramik, wie etwa Porzellan und Steingut, ist sehr beständig. Die Verwitterungsgeschwindigkeit ist vergleichbar mit Orthoklas. Günstig ist eine Glasur \Rightarrow Klinker. - Bei gewöhnlichen Ziegeln hängt die Beständigkeit stark von der Zusammensetzung und der Porosität ab. - Kalksandsteine sind in ihrer Verwitterungsgeschwindigkeit vergleichbar mit Beton.

Glas wird im tropischen Klima (hohe Luftfeuchte) von bestimmten Pilzen besiedelt und entglast partiell!

Cr/Ni-Stahl (Edelstahl) ist nur bei Luftzutritt beständig! -

Gut eloxiertes Aluminium ist sehr beständig, kann aber bei Verletzung der Oberfläche korrodieren. - Titan und einige seiner Legierungen sind extrem beständig wegen Ausbildung einer Oxidschicht, leider sehr teuer.

Gold ist an Luft zwar korrosionsfest, aber nur genügend dicke, elektrolytisch aufgebraute Schichten sind nicht porös!

Beste Beständigkeit : Korund, Spinell, SiC/Si, SiC

Spezielle Anwendungen: SiC in Beton für Treppenstufen / Präparation von Holz mit Kaolin

In Zukunft könnten Beschichtungen auch für spezielle Baustoffe eine Rolle spielen. Es sind eine Reihe von Verfahren entwickelt worden mit denen sehr dünne, aber extrem korrosionsfeste Schichten auf Metalle, Oxide und Silikate aufgebracht werden können. (Bedampfung, Plasmaspritzen, Chemische Abscheidung aus der Gasphase, Reaktion eines Gases mit der Unterlage usw.) Abgeschiedene Stoffe: SiC, Diamant, Graphit und amorpher Kohlenstoff (Glaskohle), TiO_2 , Borcarbid, Wolframcarbid und andere Carbide und Nitride. Die Schichten dürfen aber nicht porös sein, müssen gut haften und sollten sich im thermischen Ausdehnungskoeffizient nicht zu stark von der Unterlage unterscheiden.