

## **Exogenní (hypergenní = supergenní) nerostotvorné procesy**

Jsou vyvolávány vnějšími geologickými silami a dochází k nim v připovrchových částech zemské kůry, v kontaktu s hydrosférou a atmosférou (a někdy i biosférou – bakterie).

**Patří sem procesy zvětrávání hornin a minerálů,  
transportu a sedimentace, diagenese.**

### **Zvětrávání**

Je to soubor fyzikálních a chemických procesů, při kterých dochází k rozkladu mnohých minerálů a hornin,

protože se dostávají do podmínek které se liší od podmínek jejich vzniku (v povrchových podmínkách nejsou stabilní).

**Vznikají nové minerály (supergenní, sekundární), stálé za daných fyzikálně – chemických podmínek.**

### **Procesy zvětrávání**

**Některé nerosty jsou velmi odolné a prakticky nepodléhají zvětrávacím procesům (pouze dochází k jejich mechanickému opracování při transportu):**

**Křemen  $\text{Si O}_2$**

**Akcesorické minerály, odolné zvětrávání :**

- **zirkon  $\text{Zr Si O}_4$ ,**
- **granáty (pyrop, almandin),**
- **staurolit, ...**

- **rutil**

Tyto minerály, také díky své větší hustotě se hromadí ve spodních polohách klastických sedimentů - *náplavech* (rýžoviskách):

- **drahé kovy (Au, Pt)**
- **drahokamy (korund, topaz, diamant, pyrop, spinel)**
- **rudní minerály (magnetit, chromit, ilmenit, monazit, xenotim, cínovec, ....)**

**Běžné horninotvorné minerály relativně (ale různě rychle) zvětrávají**

- **obecně - čím dříve krystalovaly (v Bowenově schématu), tím rychleji zvětrávají**

(př. živce, olivín, slídy, ....)

**Při zvětrávání horninotvorných minerálů se uvolňují různě pohyblivé ionty, které jsou z místa zvětrávání odnášeny vodou různě rychle:**

*a) mobilní kationty:  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ .....*

*b) nemobilní kationty:  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Ti^{3+}$ ,  $Si^{4+}$*

## Nejběžnější pochody při zvětrávání:

- oxidace
- hydrolýza
- hydratace
- karbonatizace

### Oxidace

#### Minerály s Fe<sup>II+</sup> přecházejí na fáze s Fe<sup>III+</sup>

Pyrit, markazit, siderit, ... ----- limonit (goethit Fe O OH)  
(lepidokrokite FeO OH)

Mn.....

**Síra sulfidů (S<sup>-II</sup>) se oxiduje až na S<sup>+VI</sup> síranů** v supergenních minerálech gossanů  
(sádrovec, anglesit, ...)

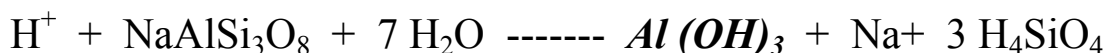
### Hydrolýza silikátů

výrazně ovlivňuje:

- přítomnost CO<sub>2</sub>, rozpuštěného ve vodě
- hydrodynamický režim

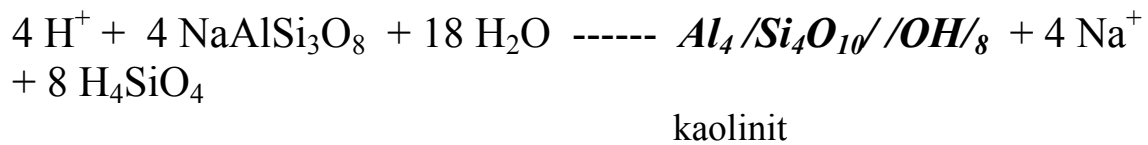
př. zvětráváním albitu (nebo K-živce) může vznikat gibbsit (bauxity) nebo kaolinit (kaolínová ložiska, jíly),  
- za specifických podmínek montmorillonit (podle pH prostředí)

**tropické klima:**



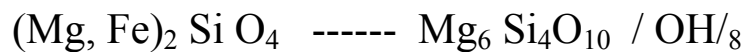
Bauxity kromě gibbsitu diaspor a boehmit (Al O OH)  
(koloidní SiO<sub>2</sub> – zpevňuje a tmelí sedimenty)

*humidní klima:*



## Hydratace

*př. zvětrávání olivínovce na serpentinity (hadce)*



olivín

serpentin (antigorit, chrysotil)

pozn. někdy vzniká mezi konečnými produkty zvětrávání hadce  
brucit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$

další příklady hydratace

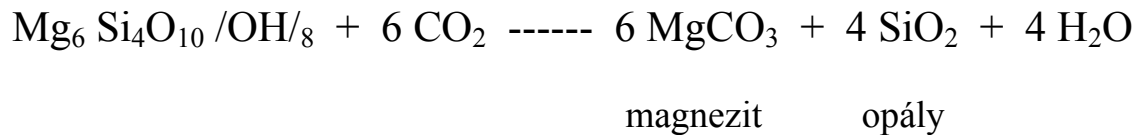
**biotit** ----- hydrobiotit -----vermikulit

**muskovit** ----- hydromuskovit ----- jílové minerály

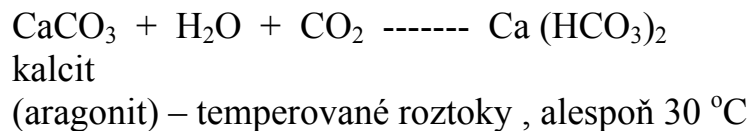
## Karbonatizace

působení  $\text{CO}_2$  při chemickém zvětrávání

*př. zvětrávání minerálů serpentínové skupiny*



*př. zvětrávání karbonátových hornin*



## **Zvětrávání na ložiskách sulfidických rud**

**Zvětrávací profil ložiskem sulfidů – obr.**

- **zóna oxidační (subzóna vyluhování) ----- „gossan“ = klobouk ložiska, oxidační podmínky**  
pozn. Subzóna vyluhování je prakticky zbavena původních rudních minerálů i kovů)
- **zóna cementační (nabohacení kovy) – pod úrovní hladiny podzemní vody, redukční podmínky.** Cementační zóna mívá nejvyšší kovnatosti na ložisku.
- zóna primárních rud

Tvar a hloubkový dosah zvětrávacího profilu jsou ovlivněny pronikáním vody a atmosferických plynů, klimatické poměry.

---

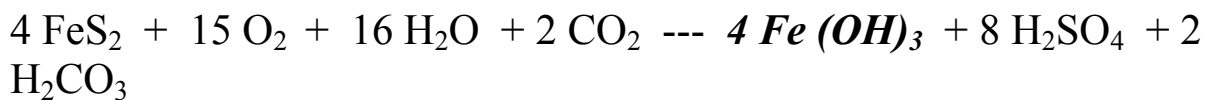
Vznik sekundárních (supergenních) minerálů (sírany, hydroxidy, karbonáty, fosfáty, arzenáty, vanadáty, .....). Jde většinou o vodnaté fáze, tvoří se oxidací a hydratací primárních rudních minerálů.

**Vznikají bohaté a typické nerostné parageneze (zejména v oxidační zóně), jejichž složení závisí na složení primárních minerálů sulfidického ložiska.**

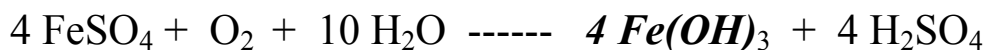
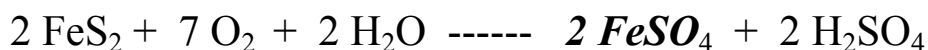
**Limonit – směs oxidů a hydroxidů Fe - nejdůležitější a nejhojnější supergenní fáze povrchových částí sulfidických ložisek**

**V limonitů gossanů bývají dutiny s krystalky různých supergenních minerálů**

*vznik hydroxidů Fe (součást limonitu) v podmínkách oxidační zóny:*

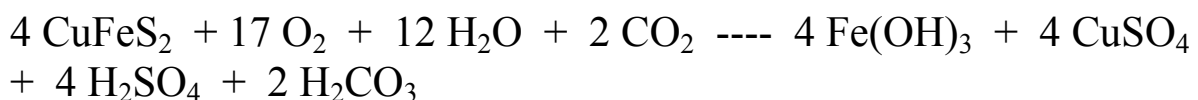


*tvorba síranů Fe s následnou přeměnou na hydroxidy Fe:*



- goethit, lepidokrokit - podobně

*Zvětrávání chalkopyritu v oxidační zóně:*



***Další možnosti zvětrávání pyritu v oxidační zóně:***

Pyrit  $\text{FeS}_2$  ----- melanterit  $\text{Fe SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$

----- smolníkit  $\text{Fe SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

(nutná přítomnost volné kyseliny sírové k udržení dvojmocného Fe v roztoku)

– Chvaletice, Smolník

- za přítomnosti Ca:

Pyrit  $\text{FeS}_2$  ----- sádrovec  $\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Pyrit  $\text{FeS}_2$

----- epsomit  $\text{Mg SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  Smolník

----- vivianit  $\text{Fe}_3 / \text{PO}_4 / 2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$

----- halotrichit  $\text{Fe}^{+II} \text{Al}_2 / \text{SO}_4 / 4 \cdot 22 \text{H}_2\text{O}$

----- alunogen  $\text{Al}_2 / \text{SO}_4 / 3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$

***Zvětrávání galenitu v oxidační zóně:***

- anglesit  $\text{Pb SO}_4$

- cerusit  $\text{Pb CO}_3$

- pyromorfit  $\text{Pb}_5 / \text{PO}_4 / 3 \cdot \text{Cl}$

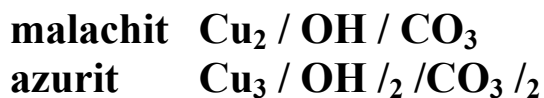
***V případě přítomnosti V, As, Cr nebo Mo***

- vanadinit  $\text{Pb}_5 / \text{VO}_4 / 3 \cdot \text{Cl}$

- mimetesit  $\text{Pb}_5 / \text{AsO}_4/3 \cdot \text{Cl}$
- krokoit  $\text{Pb} / \text{CrO}_4/$
- wulfenit  $\text{Pb} / \text{MoO}_4/$  Mežica (Slovinsko)

***Zvětrávání na ložisku chalkopyritu v oxidační zóně:***

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý  $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  chalkantit, nebo zásaditý langit
- při styku těchto roztoků s  $\text{CO}_2$ , rozpuštěným ve spodních vodách vznikají zásadité uhličitany Cu:



př. Borovec u Štěpánova, Ludvíkov u Vrbna, Lubietová, Špania Dolina)

- v reakci s rozpuštěným  $\text{SiO}_2$  :

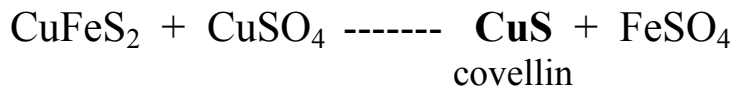
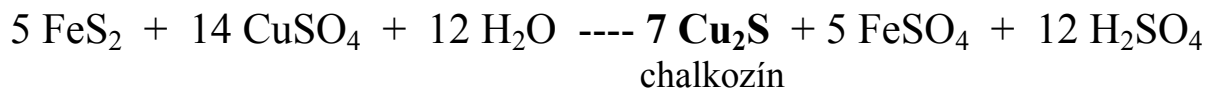
**chryzokol (koloidní)**  $\text{Cu Si O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$  Zálesí u  
 Javorníka

**dioplas**  $\text{Cu}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{18} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

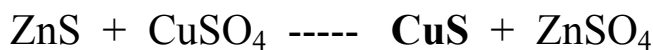
***Cementační zóna - reakce sestupujících síranů rozpuštěných ve vodách s primárními sulfidy (redukční prostředí) – vznikají sekundární sulfidy a ryzí kovy:***



### a) sekundární sulfidy



covellin se může tvořit i na úkor sfaleritu:



Pozn. Také může vznikat redukcí sestupujícího síranu měďnatého  
**kuprit**                    **Cu<sub>2</sub>O**

### b) mezi supergenní minerály cementační zóny patří také ryzí kovy:

- **Au** (Zlaté Hory)
- **Ag** (Příbram), také vzniká **argentit Ag<sub>2</sub>S**, **akantit**
- **Cu** (Borovec u Nedvědice, Zlaté Hory, Smolník)

### *Zvětrávání na ložisku Pb-Zn sulfidů (galenit, sfalerit):*

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý - **ZnSO<sub>4</sub>**                    **goslarit**
- v případě Pb nerozpustný - **anglesit PbSO<sub>4</sub>**
- **působením vod s CO<sub>2</sub>** jmenované fáze pomalu přechází na:

**cerusit  $\text{Pb CO}_3$**

v případě přítomnosti Zn (v primárním sfaleritu):

**smithsonit -  $\text{Zn CO}_3$**

**hydrozinkit - vodnatý  $\text{Zn CO}_3$**

další alternativou je vznik:

- **pyromorfit  $\text{Pb}_5 / \text{PO}_4/3 \cdot \text{Cl}$**

- **hemimorfit  $\text{Zn}_4 (\text{OH})_2 / \text{Si}_2\text{O}_7 / \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$**

***Ložiska s arzenidy Co, Ni (Jáchymov, Zálesí u Javorníka):***

- **annabergit -  $\text{Ni}_3 / \text{AsO}_4 /_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$**

- **erytrín -  $\text{Co}_3 / \text{AsO}_4 /_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$**

- **skorodit  $\text{Fe} / \text{AsO}_4 / \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$**

- **mimetesit  $\text{Pb}_5 / \text{AsO}_4 /_3 \cdot \text{Cl}$**

## ***Ložiska uranových rud:***

Primární **uraninit** ( $\text{UO}_2$ ) přechází na **uranové slídy**:

- **torbernit** -  $\text{Cu /UO}_2 \text{ /}_2 \text{ /PO}_4 \text{ /}_2 \cdot 8-12 \text{ H}_2\text{O}$
- **autunit** -  $\text{Ca /UO}_2 \text{ /}_2 \text{ /PO}_4 \text{ /}_2 \cdot 8-12 \text{ H}_2\text{O}$
- **nováčekit**

pozn. Uranové slídy s předponou „**meta**“ mají menší počet molekul vody (metatorbernit, metaautunit)

- řada vzácných fosfátů, sulfátů a arzenátů

## **Chemogenní (chemická) sedimentace**

- při chemické sedimentaci dochází k ukládání minerálů z vodných roztoků, které obsahují převážně rozpustné produkty zvětrávání
- obrovský objem minerálů se vytvořil a stále vzniká chemickou sedimentací z mořské vody

**Obsah solí v mořské vodě je poměrně stabilní – salinita asi 3.5 %. Jde hlavně o ionty  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{K}^+$ .**

Odpařování mořské vody v uzavřených zátokách vede ke zvyšování koncentrace rozpuštěných solí a při překročení meze rozpustnosti jednotlivé soli postupně krystalizují a sedimentují.

### Pořadí krystalizace solí z mořské vody:

- sádrovec, anhydrit

- halit

- minerály K, Mg :

*epsomit*  $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ , *sylvín*, *carnallit*  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6 H_2O$

- (boráty)- nepartné množství

### **K chemogenní sedimentaci dochází i při odpařování vody z bezodtokých jezer:**

- boráty (borax, colemanit, pandemit)

*borax*  $Na_2B_4O_7$ , Kalifornie - oblast Borax Lake

*colemanit*  $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5 H_2O$ , Dead Valley, sev. Amerika

*pandemit*  $Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7 H_2O$ , Panderma - Marmarské moře

Kaspické moře - mirabilit  
některá jezera – soda

- Vysrážením Fe z roztoků, přinášejících do moří nebo jezer dochází ke vzniku oxidických železných rud (limonit, goethit, hematit, magnetit)

- Za chemogenní sediment můžeme považovat i krasovou výzdobu jeskyní ve vápencích – vzniká rozpouštěním a opětovným vysrážením karbonátů z vodných roztoků

## Biochemická sedimentace

Srážení látek z roztoků může být způsobeno nebo do jisté míry ovlivněno činností organismů (látková výměna mezi organismem a okolním prostředím může vést ke vzniku minerálů v okolí určitých organismů.

Nahromaděním takových minerálů vznikají **biochemické sedimenty**:

- **Vápenec, travertin (kalcit)** – inkrustace stonků vyšších rostlin, stélek řas nebo mechů
- Redukcí  $\text{Ca SO}_4$  (sádrovec, anhydrit) za spoluúčasti bakterií (např. *Desulphovibrio desulphuricans*) se mohou tvořit **akumulace elementární síry**.
- Bakterie se také uplatňují při srážení železných oxidických rud

## Biominalizace

Je proces, kdy organismy produkují tzv. biogenní minerály, které se stávají součástí jejich organismu (schránky, vnitřní kostry, zuby):

- **karbonáty Ca (kalcit, aragonit), fosfáty Ca (apatit, francolit), amorfní  $\text{SiO}_2$  (opál)**
- v ojedinělých případech vzniká biomineralizací fluorit, pyrit, sádrovec, celestin, baryt, goethit

## Vznik minerálů během diagenese

Termínem diagenese se označuje soubor procesů probíhajících po uložení sedimentu (vedou ke zpevnění sedimentu). Diagenetické procesy se zpravidla dělí na mechanické a chemické.

**Při chemických procesech dochází k:**

- přeměně montmorillonitu na illit

- složitou přeměnou montmorillonitu a illitu **vzniká živec (K-živec, albit)**
- **dolomitizace** (dochází k metasomatickému zatlačování vápenců)
- fosfatizace – diageneticky **vznikají fosfáty Ca (apatit, francolit)** – reakcemi  $\text{CaCO}_3$  s organickou hmotou
- **pyritizace:** vznikají nestabilní sulfidy Fe (např. mackinawit  $\text{FeS}$  a greigit  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), které se brzy mění na stabilní pyrit

Zdrojem síry pro vznik diagenetických sulfidů jsou sulfáty z mořské vody, zdrojem železa oxidy a hydroxidy Fe, v pozdějších stádiích diagenese i silikáty Fe.

- **silicifikace** : dochází k zatlačování původních minerálů hmotami  $\text{SiO}_2$   
(opál, chalcedon, křemen)