

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

Jsou vyvolávány vnějšími geologickými silami a dochází k nim v přípovrchových 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), stále 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** : zirkon  $\text{Zr Si O}_4$ , granáty, staurolit, ...

Tyto minerály, také díky své větší hustotě se hromadí v *náplavech* (rýžoviskách):

- drahé kovy (Au, Pt)
- drahokamy (korund, topaz, diamant, pyrop)
- 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 horn. 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)

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

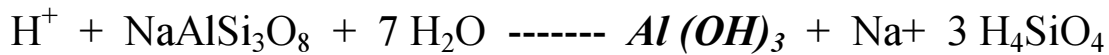
## Hydrolyza silikátů

výrazně ovlivňuje:

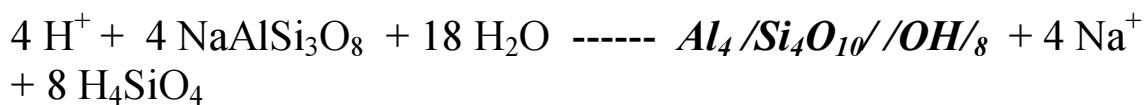
- přítomnost CO<sub>2</sub>, rozpuštěného ve vodě
- hydrodynamický režim

př. zvětráváním albitu (nebo K-živce) může vznikat gibbsit (bauxity) nebo kaolinit (kaolínová ložiska, jíly)

*tropické klima:*



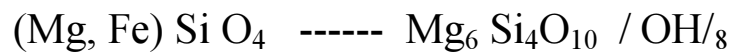
*humidní klima:*



(koloidní SiO<sub>2</sub>)

## Hydratace

*př. zvětrávání olivínovce na serpentinitu (hadce)*



olivín

serpentin (antigorit, chrysotil)

### **Karbonatizace**

působení CO<sub>2</sub> při chemickém zvětrávání

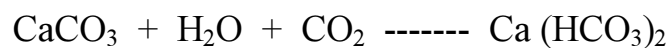
*př. zvětrávání minerálů serpentinitové skupiny*



magnezit

opály

*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.

---

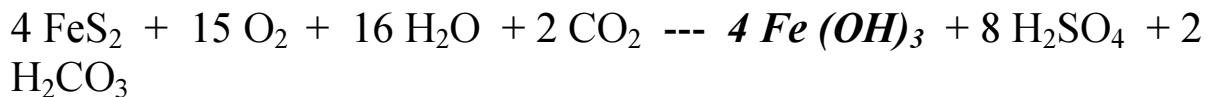
Vznik sekundárních (supergenních) minerálů (sírany, hydroxidy, karbonáty, fosfáty, arzenáty, vanadáty, .....). Jde většinou o vodnaté fáze, tvoří se oxidací a hydratací primárních rudních minerálů.

**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:*

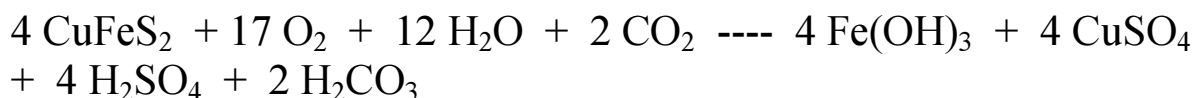


*tvorba síranů Fe s následnou přeměnou na hydroxidy Fe:*



- goethit, lepidokrokit - podobně

*Zvětrávání chalkopyritu v oxidační zóně:*



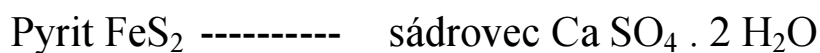
*Další možnosti zvětrávání pyritu v oxidační zóně:*



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

– Chvaletice, Smolník

- za přítomnosti Ca:



-----	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      **Pb SO<sub>4</sub>**
- cerusit      **Pb CO<sub>3</sub>**
- pyromorfit   **Pb<sub>5</sub> / PO<sub>4</sub>/<sub>3</sub> . Cl**

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

- vanadinit      Pb<sub>5</sub> / VO<sub>4</sub>/<sub>3</sub> . Cl
- mimetesit     Pb<sub>5</sub> / AsO<sub>4</sub>/<sub>3</sub> . Cl
- krokoit        Pb / CrO<sub>4</sub>/
- wulfenit       Pb / MoO<sub>4</sub>/                      Mežica (Slovinsko)

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

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý **CuSO<sub>4</sub> . 5 H<sub>2</sub>O chalkantit**,  
nebo zásaditý **langit**
- při styku těchto roztoků s CO<sub>2</sub>, rozpuštěným ve spodních vodách  
vznikají zásadité uhličitany Cu:

**malachit   Cu<sub>2</sub> / OH / CO<sub>3</sub>**  
**azurit      Cu<sub>3</sub> / OH /<sub>2</sub> /CO<sub>3</sub> /<sub>2</sub>**

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

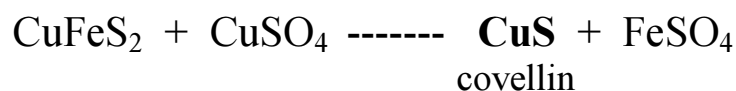
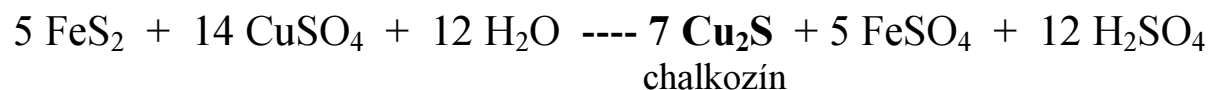
- v reakci s rozpuštěným  $\text{SiO}_2$  :

**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**                       **$\text{Cu}_2 \text{O}$**



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

- **Au** (Zlaté Hory)
- **Ag** (Příbram), také vzniká **argentit  $\text{Ag}_2\text{S}$** , **akantit**
- **Cu** (Borovec u Nedvědice, Zlaté Hory, Smolník)

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

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý -  **$\text{ZnSO}_4$**  **goslarit**
- v případě Pb nerozpustný - **anglesit  $\text{PbSO}_4$**
- **působením vod s  $\text{CO}_2$**  jmenované fáze pomalu přechází na:

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

v případě Zn:

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

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

- 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  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ , sylvín, carnallit  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$*
- *(boráty)- nepatrné množství*

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

- boráty (borax, colemanit, pandemit)  
*borax  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , Kalifornie - oblast Borax Lake*  
*colemanit  $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ , Dead Valley, sev. Amerika*  
*pandemit  $\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{19} \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ , Panderma - Marmarské moře*

Kaspické moře - mirabilit  
některá jezera – soda

- Vysrážením Fe z roztoků, přinášených 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  $\text{SiO}_2$