

## **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 – např. činnost bakterií).

**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 – vzniklé při procesu zvětrávání, sekundární- časové hledisko), 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):

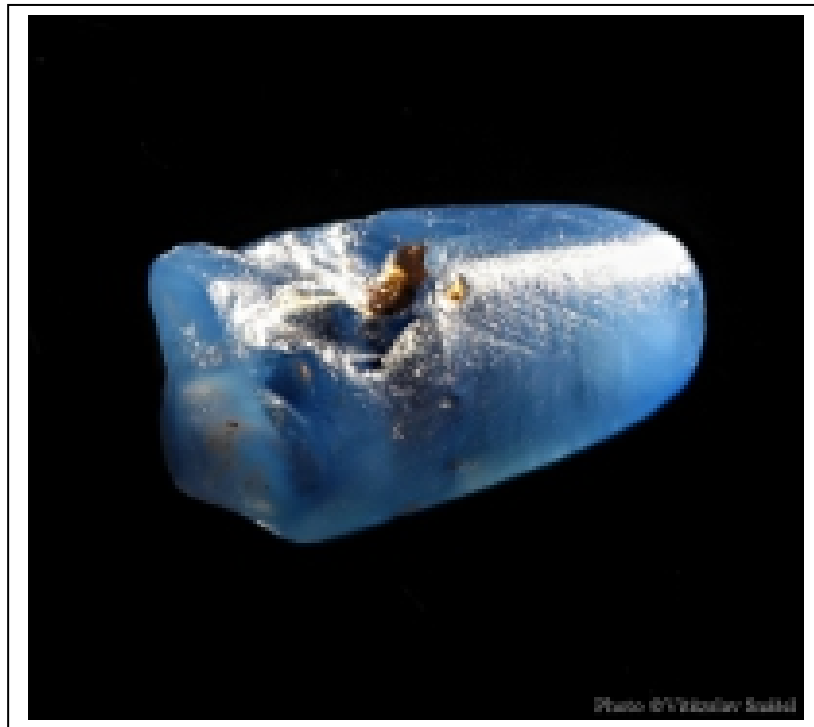
**Křemen  $\text{Si O}_2$**

**Akcesorické minerály, 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, ....)**



Safir, Jizerská louka

**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)  
(lepidokrokit FeO OH)

**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:

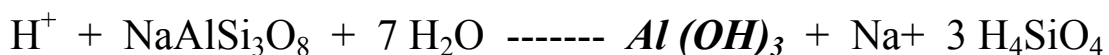
- přítomnost CO<sub>2</sub>, rozpuštěného ve vodě

- hydrodynamický režim

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

- za specifických podmínek montmorillonit (podle pH prostředí)

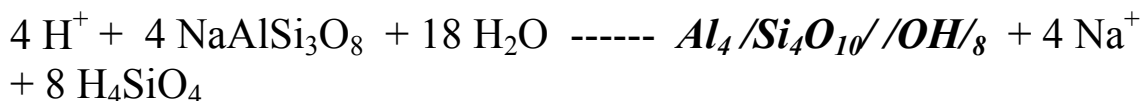
***tropické klima:***



Bauxity kromě gibbsitu diaspor a boehmit (Al O OH)

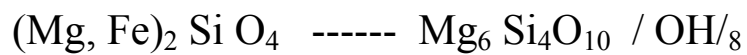
(koloidní SiO<sub>2</sub> – zpevňuje a tmelí sedimenty)

***humidní klima:***



## Hydratace

*př. zvětrávání peridotitu (olivínovce) na serpentinitu (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

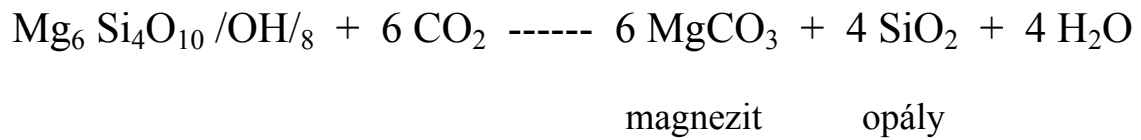


Biotit – vermikulit, Brno

## Karbonatizace

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

*př. zvětrávání minerálů serpentínové skupiny*



Magnezit, Věžná



Opál, Smrček u Nedvědice

*př. zvětrávání karbonátových hornin*



**kalcit**

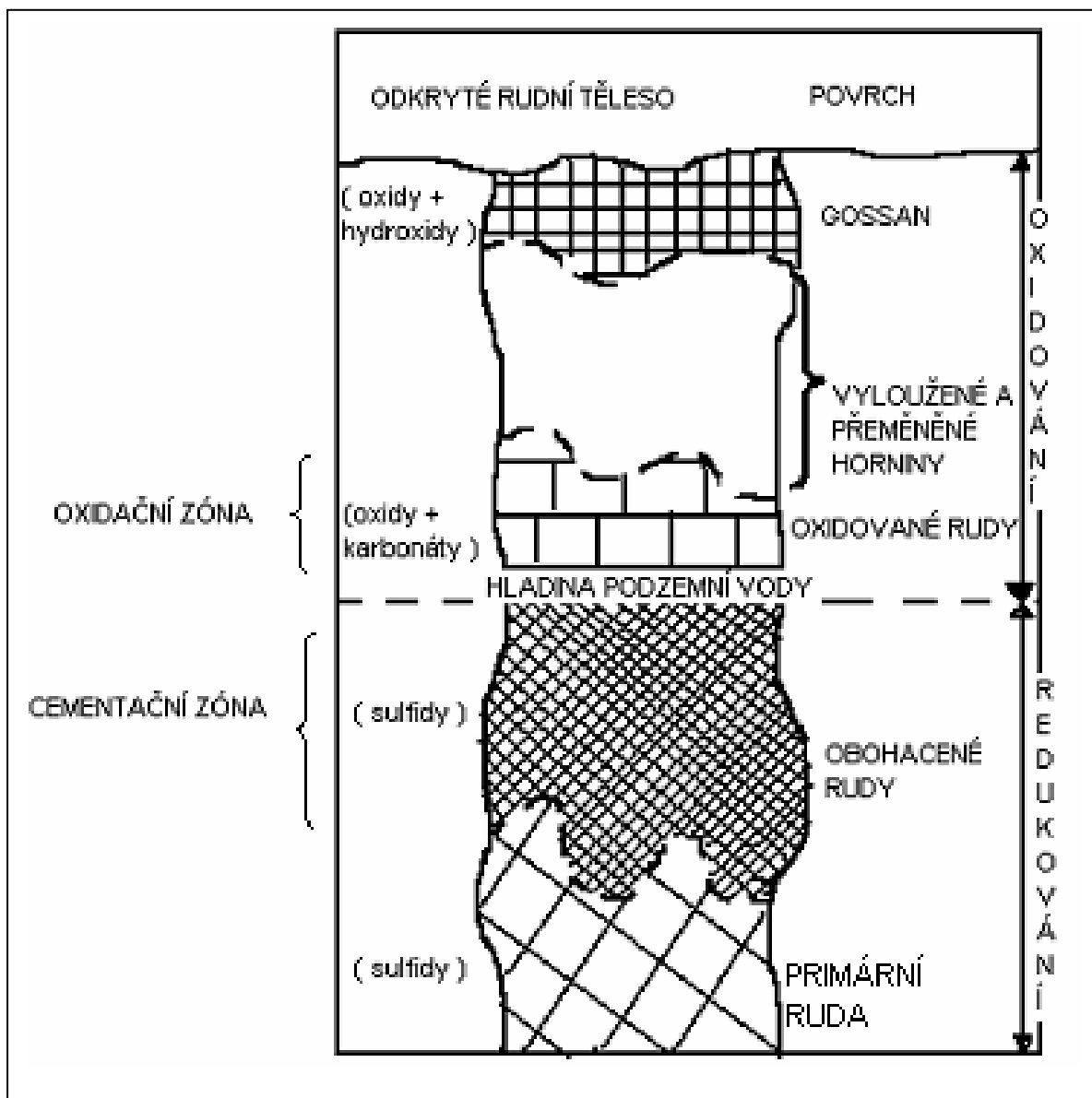
(aragonit) – temperované roztoky , alespoň 30 °C

**- vznik krasových jevů**

.....

## 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 kovatosti na ložisku.
- zóna primárních rud

Tvar a hloubkový dosah zvětrávacího profilu jsou ovlivněny pronikáním vody a atmosferických plynů, klimatickými 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.**

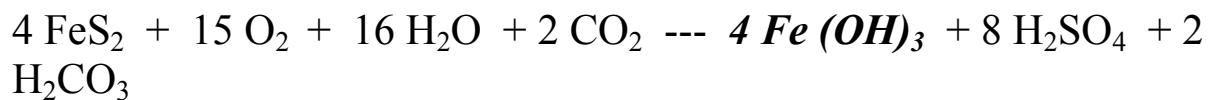
**Limonit – směs oxidů a hydroxidů Fe - nejdůležitější a nejhojnější supergenní fáze povrchových částí sulfidických ložisek**



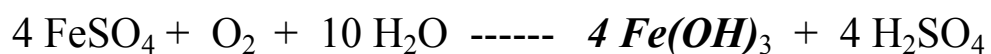
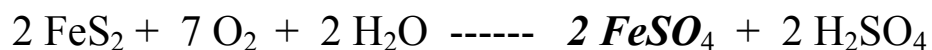
Limonit z gossanu, Železník (SR)

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

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

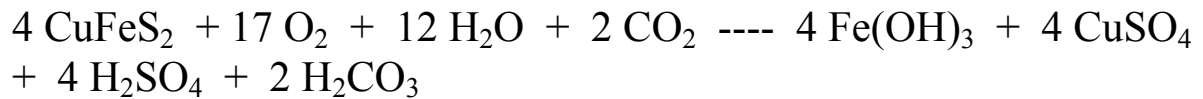


*tvorba síranů Fe s následnou přeměnou na hydroxidy Fe:*



- goethit, lepidokrokít - 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



Melanterit, Jáchymov

- 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

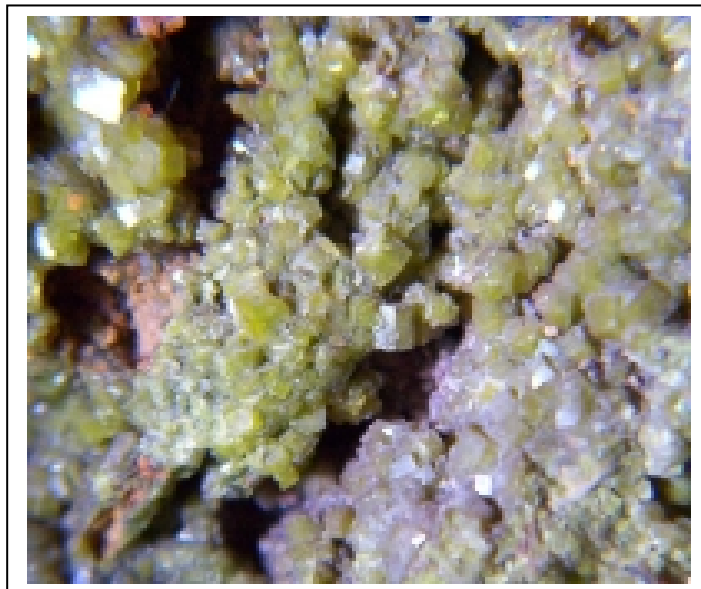
----- vivianit  $\text{Fe}_3 / \text{PO}_4 /_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$

----- 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  $\text{Pb}_5 / \text{PO}_4 /_3 \cdot \text{Cl}$



Pyromorfit, Příbram

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

- vanadinit  $Pb_5 / VO_4/3 \cdot Cl$
- mimetesit  $Pb_5 / AsO_4/3 \cdot Cl$
- krokoit  $Pb / CrO_4/$
- wulfenit  $Pb / MoO_4/$  Mežica (Slovinsko)

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

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý  $CuSO_4 \cdot 5 H_2O$  chalkantit, nebo zásaditý langit
- při styku těchto roztoků s  $CO_2$ , rozpuštěným ve spodních vodách vznikají zásadité uhličitany Cu:

**malachit**  $Cu_2 / OH / CO_3$

**azurit**  $Cu_3 / OH /_2 / CO_3 /_2$

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



Malachit, Piesky

- v reakci s rozpuštěným SiO<sub>2</sub> :

**chryzokol (koloidní) Cu Si O<sub>3</sub> . n H<sub>2</sub>O** Zálesí u  
Javorníka

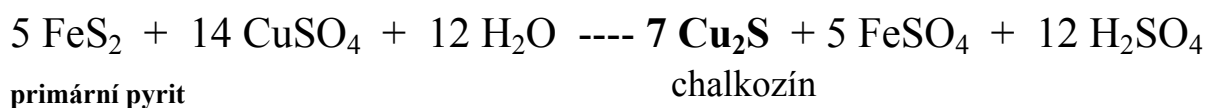
**dioplas Cu<sub>6</sub> Si<sub>6</sub> O<sub>18</sub> . 6 H<sub>2</sub>O**

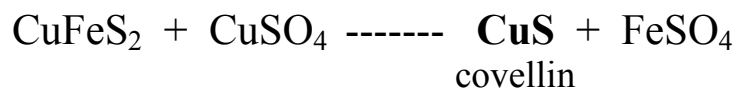
MINERÁL	VZOREC
atacamit	Cu <sub>2</sub> Cl(OH) <sub>3</sub>
azurit	Cu <sub>3</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
brochantit	Cu <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> SO <sub>4</sub>
chalkantit	CuSO <sub>4</sub> . 5H <sub>2</sub> O
chryzokol	(CuAl) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> . nH <sub>2</sub> O
kuprit	Cu <sub>2</sub> O
libethenit	Cu <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> )(OH)
malachit	Cu <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub>
pseudomalachit	Cu <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>
spertiniit	Cu(OH) <sub>2</sub>
tenorit	CuO

Hojné sekundární minerály mědi oxidační zóny

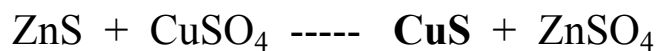
***Cementační zóna - reakce sestupujících síranů rozpuštěných ve vodách s primárními sulfidy (redukční prostředí) – vznikají sekundární sulfidy a ryzí kovy:***

**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)



Zlato, Zlaté Hory

***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** **Pb CO<sub>3</sub>**

v případě Zn:

**smithsonit** - **Zn CO<sub>3</sub>**

**hydrozinkit** -        vodnatý **Zn CO<sub>3</sub>**

další alternativou je vznik:

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

- **hemimorfit**        **Zn<sub>4</sub> (OH)<sub>2</sub> / Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/ . 2 H<sub>2</sub>O**

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

- **annabergit** -        **Ni<sub>3</sub> /AsO<sub>4</sub> /<sub>2</sub> . 8 H<sub>2</sub>O**

- **erytrín** -            **Co<sub>3</sub> /AsO<sub>4</sub> /<sub>2</sub> . 8 H<sub>2</sub>O**

- **skorodit**        **Fe /AsO<sub>4</sub> / . 2 H<sub>2</sub>O**

- **mimetesit**        **Pb<sub>5</sub> /AsO<sub>4</sub> /<sub>3</sub> . Cl**





Erytrín, Jáchymov

<b>MINERÁL</b>	<b>VZOREC</b>
annabergit	$\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
bayldonit	$\text{PbCu}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
bukovskýit	$\text{Fe}^{3+}_2(\text{AsO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
erytrin	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
farmakolit	$\text{CaH}(\text{AsO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
farmakosiderit	$\text{Fe}^{3+}(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_4 \cdot 5-7\text{H}_2\text{O}$
kaňkit	$\text{Fe}^{3+}\text{AsO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$
mixit	$\text{BiCu}_6(\text{AsO}_4)_3(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
olivenit	$\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$
skorodit	$\text{Fe}^{3+}(\text{AsO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
zeunerit	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10-16\text{H}_2\text{O}$

Hojné sekundární minerály arzenu oxidační zóny

### *Ložiska uranových rud:*

Primární **uraninit** ( $\text{UO}_2$ ) přechází v zóně zvětrávání 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, metaautunit)

- řada vzácných fosfátů, sulfátů a arzenátů



Torbernit, Jáchymov

## 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  $\text{K}^+$ ,  $\text{CO}_3$**

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:

- *dolomit*

- *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*



Halit, Wieliczka (Polsko)

**K chemogenní sedimentaci dochází i při odpařování vody z bezodtokých jezer (v případě ložisek borátů dotovaných solankami s přínosem B):**

- 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**.



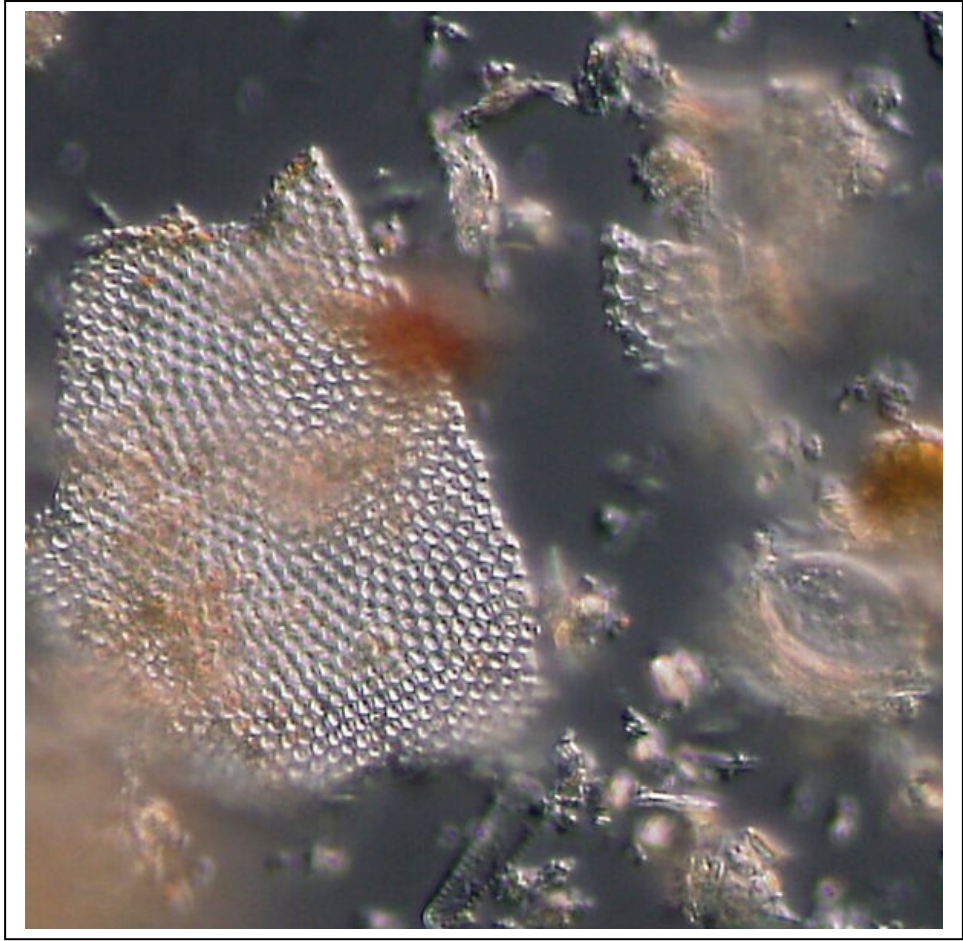
Síra, Tarnobrzeg (Polsko)

- Bakterie se také uplatňují při srážení železných oxidických rud

## **Biomineralizace**

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 SiO<sub>2</sub> (opál)**
- v ojedinělých případech vzniká biomineralizací fluorit, pyrit, sádrovec, celestin, baryt, goethit



**Rozsivky (Diatomaceae) - křemelina**

## 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  $\text{SiO}_2$