

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, 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 Si O_2

Akcesorické minerály, odolné zvětrávání :

- zirkon 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^{II+} přecházejí na fáze s Fe^{III+}

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

Síra sulfidů (S^{-II}) se oxiduje až na S^{+VI} síranů v supergenních minerálech gossanů
(sádrovec, anglesit, ...)

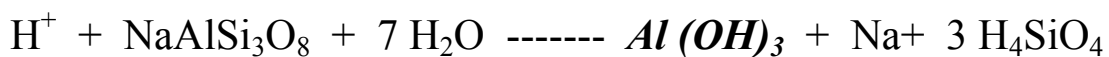
Hydrolýza silikátů

výrazně ovlivňuje:

- přítomnost CO₂, rozpuštěného ve vodě
- hydrodynamický režim

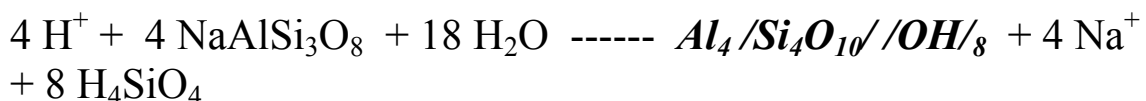
př. zvětráváním albitu (nebo K-živce) může vznikat gibbsit (bauxity) nebo kaolinit (kaolínová ložiska, jíly),
- za specifických podmínek montmorillonit (podle pH prostředí)

tropické klima:



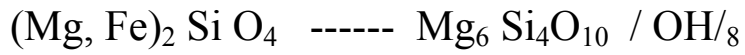
Bauxity kromě gibbsitu diaspor a boehmit (Al O OH)
(koloidní SiO₂ – zpevňuje a tmelí sedimenty)

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

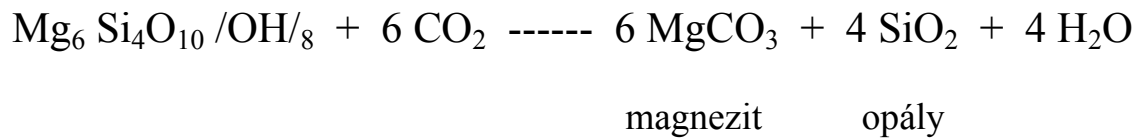


Biotit – vermikulit, Brno

Karbonatizace

působení CO₂ při chemickém zvětrávání

př. zvětrávání minerálů serpentínové skupiny



Magnezit, Věžná



Opál, Smrček u Nedvědice

př. zvětrávání karbonátových hornin



kalcit

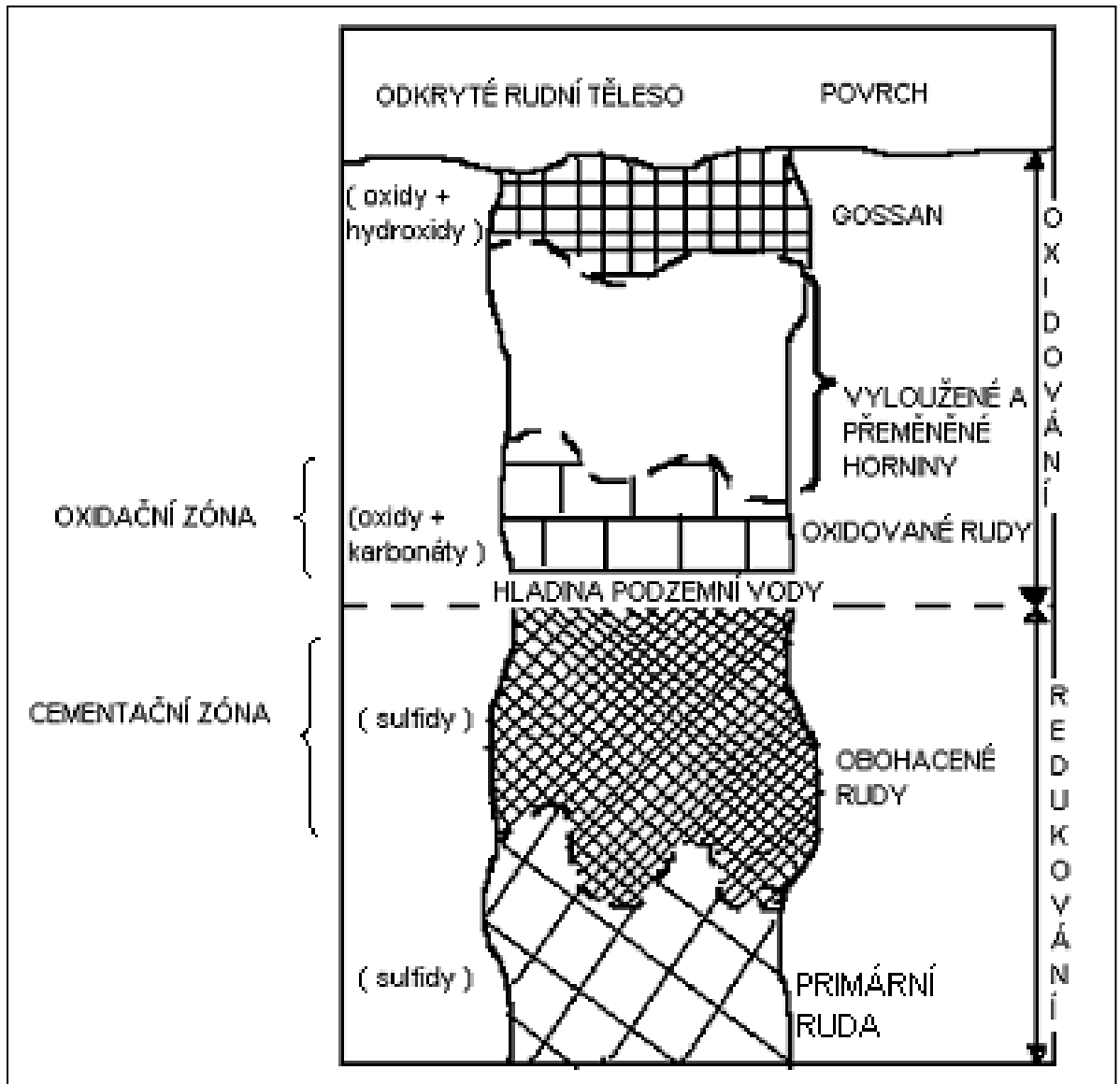
(aragonit) – temperované roztoky , alespoň 30 °C

- 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)

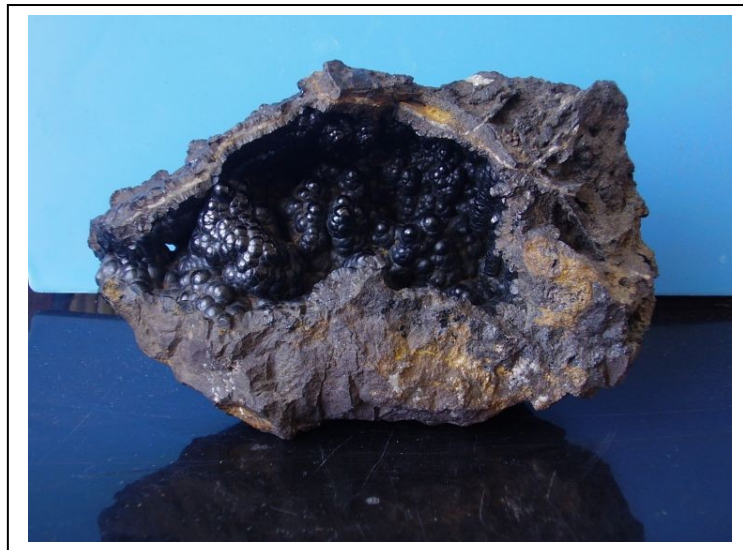
- **zóna cementační (nabohacení kovy)** – pod úrovní hladiny podzemní vody, **redukční podmínky**. Cementační zóna mívá nejvyšší kovatosti na ložisku.
- zóna primárních rud

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

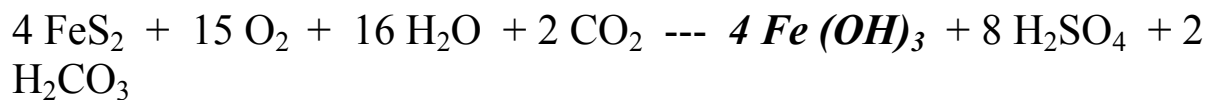
Limonit – směs oxidů a hydroxidů Fe - nejdůležitější a nejhojnější supergenní fáze povrchových částí sulfidických ložisek



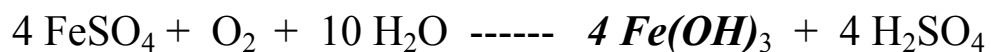
Limonit, Železník (SR)

V limonitů gossanů bývají dutiny s krystalky různých supergenních minerálů

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

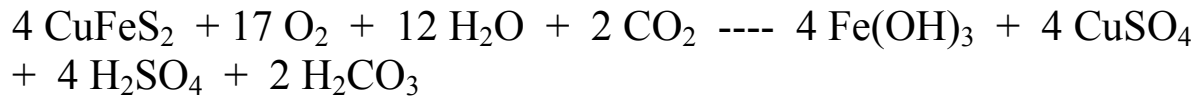


tvorba síranů Fe s následnou přeměnou na hydroxidy Fe:



- goethit, lepidokrokít - podobně

Zvětrávání chalkopyritu v oxidační zóně:



Další možnosti zvětrávání pyritu v oxidační zóně:

Pyrit 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 FeS_2 ----- sádrovec $\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

Pyrit 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 Pb SO_4
- cerusit Pb CO_3
- pyromorfit $\text{Pb}_5 / \text{PO}_4 /_3 \cdot \text{Cl}$



Pyromorfit, Příbram

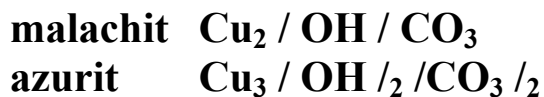
V případě přítomnosti V, As, Cr nebo Mo

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

- krokoit Pb / CrO₄/
- wulfenit Pb / MoO₄/ Mežica (Slovinsko)

Zvětrávání na ložisku chalkopyritu v oxidační zóně:

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý **CuSO₄ · 5 H₂O chalkantit**,
nebo zásaditý **langit**
- při styku těchto roztoků s CO₂, rozpuštěným ve spodních vodách
vznikají zásadité uhličitany Cu:



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

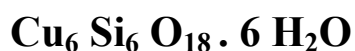


Malachit, Piesky

- v reakci s rozpuštěným SiO₂ :

chryzokol (koloidní) Cu Si O₃ · n H₂O Zálesí u
 Javorníka

dioplas

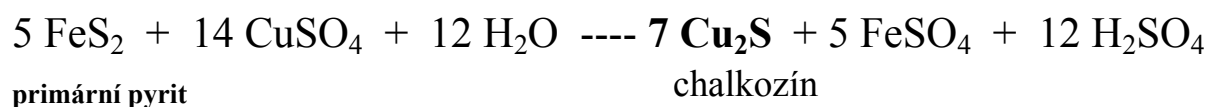


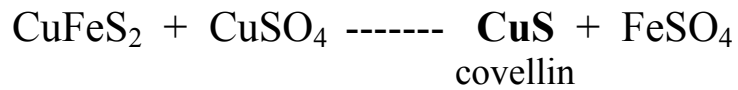
MINERÁL	VZOREC
atacamit	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$
azurit	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
brochantit	$\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$
chalkantit	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
chryzokol	$(\text{CuAl})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
kuprit	Cu_2O
libethenit	$\text{Cu}_2(\text{PO}_4)(\text{OH})$
malachit	$\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
pseudomalachit	$\text{Cu}_5(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4$
spertiniit	$\text{Cu}(\text{OH})_2$
tenorit	CuO

Hojné sekundární minerály mědi oxidační zóny

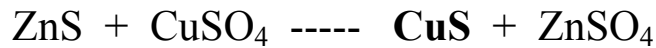
Cementační zóna - reakce sestupujících síranů rozpuštěných ve vodách s primárními sulfidy (redukční prostředí) – vznikají sekundární sulfidy a ryzí kovy:

a) sekundární sulfidy





covellin se může tvořit i na úkor sfaleritu:



Pozn. Také může vznikat redukcí sestupujícího síranu měďnatého
kuprit **Cu₂O**

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

- **Au** (Zlaté Hory)
- **Ag** (Příbram), také vzniká **argentit Ag₂S**, **akantit**
- **Cu** (Borovec u Nedvědice, Zlaté Hory, Smolník)



Zlato, Zlaté Hory

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

- nejprve dobře rozpustný a pohyblivý - **ZnSO₄** **goslarit**
- v případě Pb nerozpustný - **anglesit** **PbSO₄**
- **působením vod s CO₂** jmenované fáze pomalu přechází na:

cerusit **Pb CO₃**

v případě Zn:

smithsonit - **Zn CO₃**

hydrozinkit - vodnatý **Zn CO₃**

další alternativou je vznik:

- **pyromorfit** **Pb₅ / PO₄/₃ . Cl**

- **hemimorfit** **Zn₄ (OH)₂ / Si₂O₇/ . 2 H₂O**

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

- **annabergit** - **Ni₃ /AsO₄ /₂ . 8 H₂O**

- **erytrín** - **Co₃ /AsO₄ /₂ . 8 H₂O**

- **skorodit** **Fe /AsO₄ / . 2 H₂O**

- **mimetesit** **Pb₅ /AsO₄ /₃ . Cl**



Erytrín, Jáchymov

MINERÁL	VZOREC
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** (UO_2) přechází v zóně zvětrávání na **uranové slídy**:

- **torbernit** - $\text{Cu /UO}_2 \text{ /}_2 \text{ /PO}_4 \text{ /}_2 \cdot 8\text{-}12 \text{ H}_2\text{O}$
- **autunit** - $\text{Ca /UO}_2 \text{ /}_2 \text{ /PO}_4 \text{ /}_2 \cdot 8\text{-}12 \text{ H}_2\text{O}$
- **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 Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} a K^+ . 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:

- 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 Ca SO_4 (sádrovec, anhydrit) za spoluúčasti bakterií (např. *Desulphovibrio desulphuricans*) se mohou tvořit **akumulace elementární síry**.



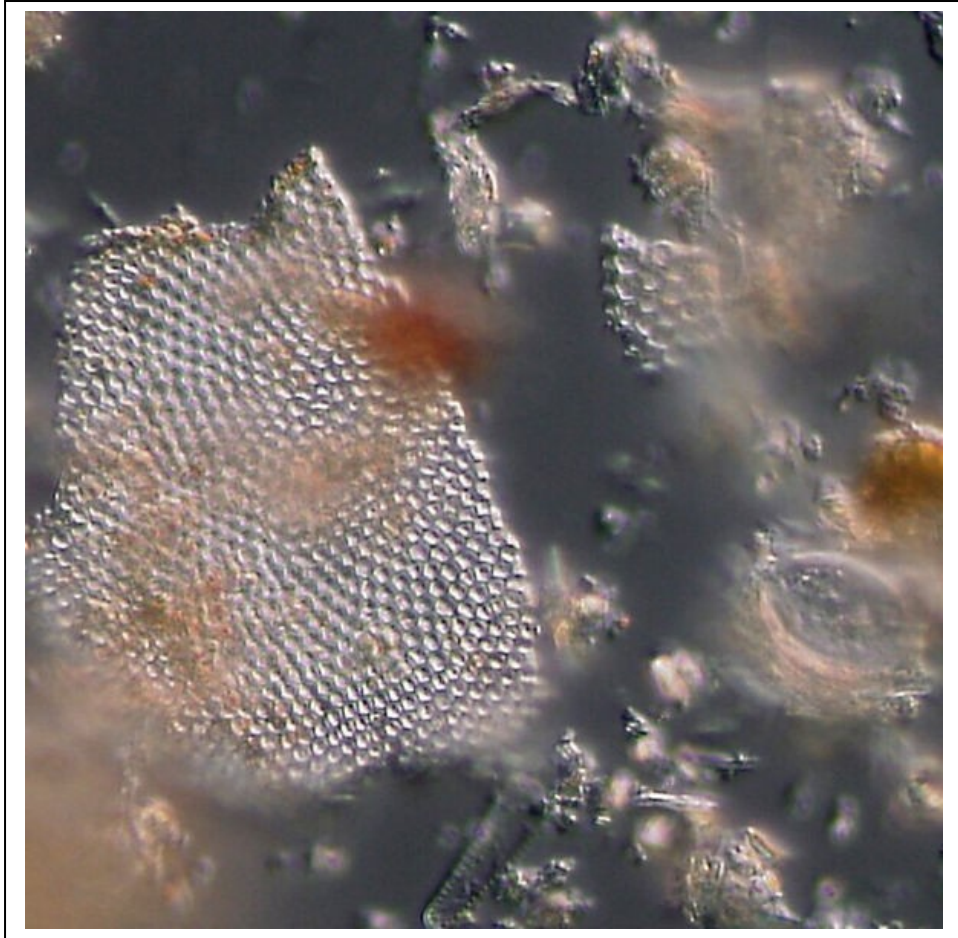
Síra, Tarnobrzeg (Polsko)

- 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_2 (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 CaCO_3 s organickou hmotou
- **pyritizace:** vznikají nestabilní sulfidy Fe (např. mackinawit FeS a greigit Fe_3S_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 SiO_2

