

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 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,)**

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)
(lepidokrokit FeO OH)

Mn.....

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

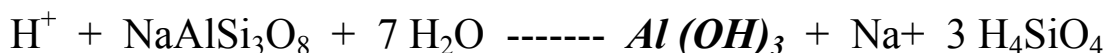
Hydrolýza silikátů

výrazně ovlivňuje:

- přítomnost CO₂, rozpuštěného ve vodě
- hydrodynamický režim

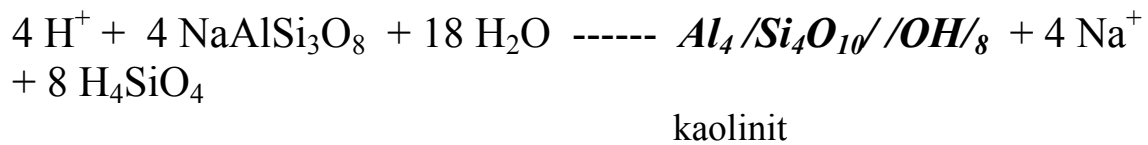
př. zvětráváním albitu (nebo K-živce) může vznikat gibbsit (bauxity) nebo kaolinit (kaolínová ložiska, jíly),
- za specifických podmínek montmorillonit (podle pH prostředí)

tropické klima:



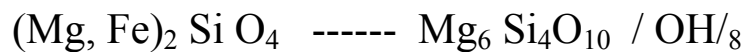
Bauxity kromě gibbsitu diaspor a boehmit (Al O OH)
(koloidní SiO₂ – zpevňuje a tmelí sedimenty)

humidní klima:



Hydratace

př. zvětrávání 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

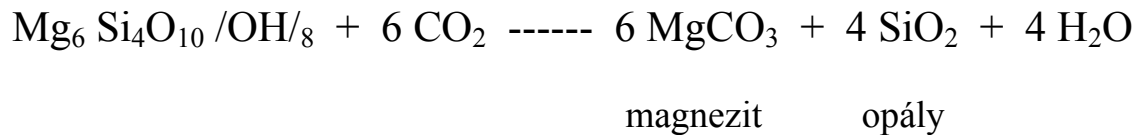
biotit ----- hydrobiotit ----- vermikulit

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

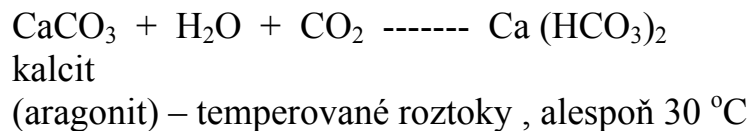
Karbonatizace

působení 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.

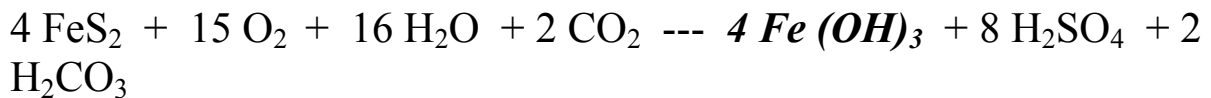
Vznik sekundárních (supergenních) minerálů (sírany, hydroxidy, karbonáty, fosfáty, arzenáty, vanadáty,). Jde většinou o vodnaté fáze, tvoří se oxidací a hydratací primárních rudních minerálů.

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

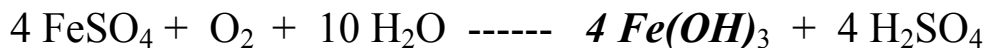
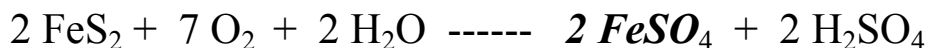
Limonit – směs oxidů a hydroxidů Fe - nejdůležitější a nejhojnější supergenní fáze povrchových částí sulfidických ložisek

V limonitů gossanů bývají dutiny s krystalky různých supergenních minerálů

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

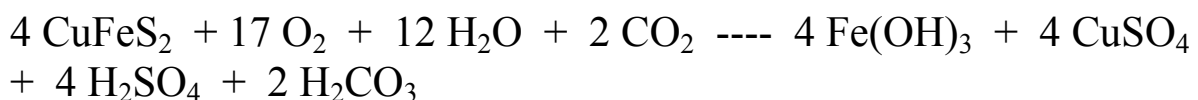


tvorba síranů Fe s následnou přeměnou na hydroxidy Fe:



- goethit, lepidokrokit - podobně

Zvětrávání chalkopyritu v oxidační zóně:



Další možnosti zvětrávání pyritu v oxidační zóně:

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

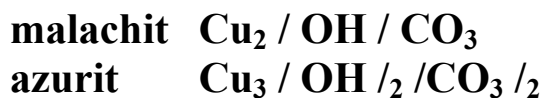
V případě přítomnosti V, As, Cr nebo Mo

- 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 CO_2 , rozpuštěným ve spodních vodách vznikají zásadité uhličitany Cu:



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

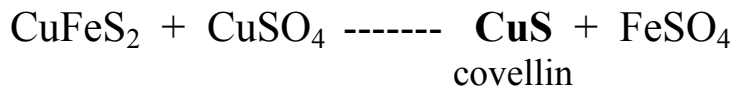
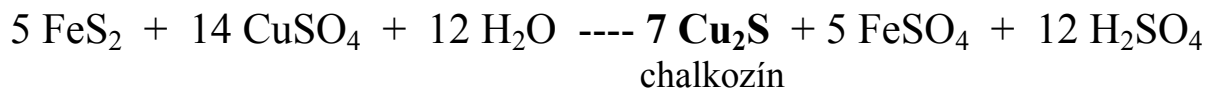
- v reakci s rozpuštěným SiO_2 :

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

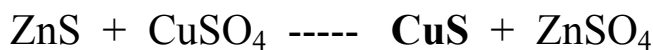
dioptas $\text{Cu}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{18} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$

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 **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)

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 CO_3

v případě přítomnosti Zn (v primárním sfaleritu):

smithsonit - Zn CO_3

hydrozinkit - vodnatý 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** (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 Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} a 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, přinášných 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 činnostmi 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**.
- 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 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 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
(opál, chalcedon, křemen)