Nerostotvorné (= minerogenetické) procesy

Procesy vedoucí ke vzniku minerálů můžeme rozdělit do 2 skupin:

- **Endogenní (hypogenní) nerostotvorné procesy**
  Jsou spjaty s vnitřními geologickými silami.
  Probíhají hlavně ve svrchním zemském plášti a zemské kůře

  Do této skupiny patří především **magmatické, metamorfní a hydrotermální procesy**

- **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.

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

Magmatické procesy

- **Vedou ke vzniku magmatických hornin**

Magmatický proces zahrnuje vznik magmatu natavením nebo roztavením pevných hornin, jeho výstup do svrchních částí zemské kůry (případně až na zemský povrch), jeho diferenciaci a krystalizaci.

Magma je přírodní, zpravidla silikátová tavenina

Hlavními složkami magmatu jsou SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, FeO, CaO, MgO, Na_2O a K_2O, rozpuštěná voda
Uvedené složky jsou základem většiny minerálů magmatických hornin
(příklady)

Existují i magmata zcela odlišného chemického složení (karbonátové, sulfidické taveniny).

V určitém množství je v magmatu přítomna plynná fáze :

H_2O, CO_2, HCl, HF, H_2S, H_2, CO, SO_3 a N_2 (tyto látky jsou zčásti absorbovány v kapalné fázi, zčásti jsou v ní chemicky vázány)

Magma může obsahovat do 10 % pevné fáze :
- **minerály z počátečních stadií krystalizace magmatu**
- **relikty (zbytky) původních hornin, jejichž roztavením magma vzniklo**

Základní typy magmat:

- **bazické (bazaltové magma)**
- **kyselé magma (granitové)**
- **magma intermediárního složení (andezitové magma)**
- **ultrabazické magma (peridotity)**

Likvace

- rozdělení původně homogenní taveniny na dvě vzájemně nemísitelné taveniny (silikátovou a sulfidickou), při teplotě cca 1500 ^{o}C

- **počáteční krystalizace (akcesorické minerály) – zirkon, apatit, pyrop, spinelidy, ilmenit, ...**

- **hlavní krystalizace (Bowenovo reakční schema – idealizace) – obr.**

Recentní poznatky o krystalizaci magmatu

Procesy diferenciace magmatu:

- **frakční krystalizace**
- **gravitační**
- **filtrační**
- **var magmatu (oddělení plynné fáze)**

Asimilace – proces, při němž magma pohlcuje okolní horniny a rozpouští je v sobě

Vznik minerálů ze sopečných exhalací

- exhalační ložiska -

fumaroly (100-800 ^{o}C)
solfatary (100-200 ^{o}C)

Hlavní složky sopečných plynů: H_2O (pára), HCl, NH_4Cl, H_3BO_3, H_2S, SO_2 a CO_2

Sopečné sublimáty (fumarolové nebo solfatarové) vznikají mimo sublimace:
- chemickými reakcemi mezi plynnými složkami exhalátů při jejich ochlazování
- chemickými reakcemi mezi sožkami exhalátů a atmosferickým kyslíkem

př: vznik ložiskových akumulací síry:

$2\ H_2S + SO_2$ ------- $2\ H_2O + 3\ S$

$2\ H_2S + O_2$ ------- $2\ H_2O + 2\ S$

Typické sublimáty: ***salmiak (NH_4Cl), sassolin (H_3BO_3), halit, sylvín, thenardit (Na_2SO_4)***
- lokálně: hematit, magnetit, pyrit, realgar, auripigment, antimonit, cinnabarit

Minerály vznikající přeměnou vulkanických hornin interakcí s exhalacemi:
sírany - ***alunit $KAl_3/SO_4/_2/OH/_6$, sádrovec***

Hydrotermální procesy

- dochází ke krystalizaci minerálů z hydrotermálních roztoků

V podmínkách zemské kůry mají hydrotermální roztoky charakter vodných roztoků o teplotě cca 50 – 700 ^{o}C.

Teplotní dělení:

- vysokoteplotní (katatermální) roztoky :	700 – 300 ^{o}C
- středně teplotní (mezotermální) roztoky:	300 – 200 ^{o}C
- nízkoteplotní (epitermální) roztoky:	200 – 50 ^{o}C
/teletermální roztoky/	
alpské parageneze	350 - 50

pozn. **ve starší literatuře se setkáváme s termínem** *pneumatolytické roztoky.*

Jde o vysokoteplotní roztoky, jejichž teplota je vyšší než kritická teplota čisté vody – t.j. 374 ^{o}C za tlaku 22 Mpa.

- **kritická teplota hydrotermálních roztoků je vyšší v závislosti na obsahu rozpuštených látek**

(např. 20% rozpuštěných solí .....kritický bod 600 ^{o}C)

Původ vody hydrotermálních roztoků:

- magmatogenní
- diagenetický
- metamorfní

- povrchový (meteorické, - vadózní vody), nasávání mořské vody v oblasti riftů a jejich ohřev, mineralizace

Zdroje mineralizace

- podobně jako zdroje vody roztoků

Formy transportu látek

- *největší význam má transport nerostných látek v podobě lehce rozpustných sloučenin, disociovaných na jednoduché ionty* ***nebo polymerní molekuly***

Informace o látkovém složení hydrotermálních roztoků dostáváme:

- ***výzkumem plynokapalných uzavřenin v hydrotermálních minerálech***
- ***studiem nerostných paragenezí hydrotermálního původu***
- ***izotopický výzkum O, C, S***

- přímo lze zkoumat hydrotermální roztoky v oblastech s doznívající sopečnou aktivitou (roztoky výrazně ovlivněny meteorickou vodou)

Složení hydrotermálních roztoků je velmi variabilní, zpravidla obsahují 2 – 16 hm.% rozpuštěných solí,

- maximálně kolem 40 %

Kationty: Na, K, Ca, Mg, Ba

Anionty: Cl, HCO_3, CO_3, SO_4, F

Pro transport chalkofilních prvků (Pb, Zn, Ag, Cu,.....) mají velký význam ionty HS^- a S^{2-} .

Schematická řada vylučování sulfidů jednotlivých kovů s klesající teplotou hydrotermálního roztoku:

Bi - As- Au, Cu, U - Zn - Pb, Ag - Sb - As - Hg

Formace sulfidických ložisek dle klesající teploty vzniku:

1. **Zlatá a zlato-stříbrná formace**
2. **Ag-Co-Ni-Bi-U formace**
3. **Pyritová a chalkopyritová formace**
4. **Pb-Zn-Ag formace**
5. **Sb-As-Se formace**
6. **Hg formace**

Recentní submarinní hydrotermální procesy

<u>Vznik submarinní hydrotermální mineralizace je podmíněn</u>:

- ***výměnou tepelné energie a látek mezi litosférou a hydrosférou***

<u>Dochází k tomu :</u>

- **především podél globálního systému divergentních deskových rozhraní (tj. na riftových zónách)**
- **na ostrovních oblucích**
- **v zaobloukových pánvích**
- v areálech vnitrodeskového vulkanismu

Vznikají často sulfidické akumulace, které můžeme považovat za recentní analogy ložisek „Kuroko“, „Besshi“ a kyperského typu

<u>Podloží recentních hydrotermálně sedimentárních sulfidických akumulací a jeho hydrotermální alterace</u>

- **uložení na vulkanitech, případně vulkanoklastických horninách**

Na středooceanických hřbetech jde o bazalty typu MORB (= mid-ocean ridge basalts), lokálně i andezity

- v zaobloukových pánvích kromě basaltů též ryolity, autobrekciované lávy a vulkanoklastické horniny, složením odpovídající uvedeným vulkanitům

Vznik sulfidických rud, jejich nerostné složení a morfologie rudních těles

- **vznik z hydrotermálních roztoků, vyvěrajících na mořské dno**

Typickým produktem hydrotermální aktivity v obou geotektonických pozicích jsou **komínovitá tělesa s.l. (komíny = „smokers“) a hydrotermální kupy („hydrothermal mounds“)**

Morfologie komínů je variabilní. Např. v hydrotermálním poli EPR:

- štíhlé komíny s téměř kruhovým průřezem a úzkým centrálním kanálem /několik cm/, o výšce 1-2 m, výjimečně i přes 5 m
- mocnost stěny při bázi komínu závisí na jeho stáří /mm až dm/

V případě aktivních komínů z nich rychle vystupují hydrotermální fluida obvykle zbarvená černě nebo bíle (v závislosti na přítomnosti a povaze suspendovaných částic)

- „black smokers“ teploty 330-380 ^{o}C

- „white smokers“ 20-300 ^{o}C

Charakteristickým znakem všech „smokerů“ je jejich zonální /koncentrická/ stavba. Jde o mineralogickou zonálnost, jejíž hlavní příčinou je pokles teploty směrem k okraji komínu a **reakce hydrotermálních fluid s mořskou vodou ve vnějších částech stěny komínu**

Vnitřní zóna:

- **chalkopyrit**
- **dále od kanálu hlavně pyrit, bornit, případně magnetit, lokálně pyrhotin, cubanit**

Ve střední části stěny:

- sfalerit, wurtzit, chalkopyrit, pyrit a anhydrit

Vnější zóna stěny:

- je menší mocnosti
- **pyrit, markazit, opál, baryt**

pozn. jsou známé také komíny barytové

Často jsou popisovány **dendritické útvary a kostrovité krystaly** některých rudních minerálů (sfalerit, baryt, galenit)

Morfologicky zcela odlišným typem komínů jsou tzv. difuzéry („diffusers“), které nemají centrální kanál.

Hydrotermální fluida vystupují k povrchu relativně pomalu centrální porézní zónou a stěnami. K výstupu roztoků dochází tedy na celém povrchu tělesa. Difuzér v typickém příkladu získává **kuželovitý tvar**.

Mineralogicky se difuzéry liší vysokým obsahem pyrhotinu a absencí anhydritu. Některé difuzéry obsahují množství barytu. Dalšími rudními minerály jsou pyrit, sfalerit a cubanit.

<u>Hydrotermální kupy</u> – tělesa, která se tvoří srůstem většího množství komínů a nahromaděním fragmentů, vznikajících jejich rozpadem.

Rostoucí kupou prostupují hydrotermy, které způsobují metasomatické přepracování a rekrystalizaci materiálu uvnitř kupy.

Velikost sulfidických akumulací

1/ **<u>Kotlina „Atlantis II“ v riftové zóně Rudého moře:</u>**

- 94 mil. tun rud s kovnatostí 2.1 % Zn, 0.5 % Cu, 39 ppm Ag a 0.5 ppm Au

2/ Těleso masivních sulfidických rud o rozměrech 1000 x 150 m a výšce 35 m **<u>v riftovém údolí Galapážského hřbetu.</u>** Odhad 10 mil. tun rud.

Hydrotermální chocholy („hydrothermal plumes“)

- typický fenomén pro hydrotermální pole

- **jde o černé „kouře“, vystupující z ústí aktivních komínů, z trhlin na povrchu hydrotermálních kup,** případně i z trhlin přímo v mořském dně

- **vystupují do výše několik X0 až X00 m nad dno, zde se jejich pohyb mění na horizontální a následně dochází k sedimentaci**

Tvar horizontální části chocholu závisí na proudění mořské vody

Černé zbarvení těchto „kouřů“ je způsobeno suspenzí sulfidů**, které vznikají při reakci hydrotermálního roztoku z mořskou vodou.**

Proces precipitace minerálů trvá několik sekund po vývěru:
- pyrhotin
- pyrit
- sfalerit
- chalkopyrit
- další fáze Fe, S, SiO_2
- **méně hojné jsou částice anhydritu, opálu, oxid-hydroxidů Fe, síry** α
- **vzácně markazit, covellin, cubanit, baryt a některé silikáty**

Rozměry částic v suspenzi jsou velmi malé: 0.1 – 850 μm.

Sedimentace z hydrotermálních chocholů probíhá ve vzdálenostech do několika X00 m až 2000 m **(viz. příklady)**

Sulfidické rudy střeooceanických hřbetů jsou tvořeny především:

- sulfidy Fe, Cu a Zn, z nerudních minerálů převládají různé formy SiO_2 a sulfáty
- **akumulace takových rud: středoatlanský, východopacifický a galapážský hřbet, Rudé moře (Atlantis)**

- jde o recentní analogy rudních ložisek „kuroko“ a kyperského typu

Složení sulfidických akumulací na spreadingových zónách v zaobloukových pánvích

je více variabilní **v závislosti na litologii v prostoru konvekčně cirkulačních systémů:**

- opět jde o recentní analogy rudních ložisek „kuroko“ a kyperského typu, která jsou ale mineralogicky pestřejší

- kromě výše jmenovaných jsou hojné minerály tetraedrit-tennantitové skupiny (obsahy Ag), sulfidy Pb a Ag, Au, baryt, anglesit

„Alpské parageneze“

Termínem „alpská parageneze“ jsou označovány specifické nízkoteplotní hydrotermální asociace, vyskytující se nejčastěji na puklinách hornin.
Krystalovaly z vodných roztoků o teplotě 100-360 ^{o}C.

V České republice je alpská parageneze nejvýrazněji vyvinuta:

- na Čáslavsku a Kutnohorsku
- v Jeseníkách
- na Českomoravské vrchovině

Minerální asociace A

(dle Bernarda)

– v kvarcitech, svorech, fylitech, rulách (nízké obsahy Ca)

Vernířovice u Sobotína – „Hackschlüssel“

- **okolní horninou chloritické ruly desenské skupiny**

Minerály:

- **křemen zastoupen křišťálem a záhnědou, XX až 15 cm velké,** čisté a bohaté na krystalové tvary (Burkart 1953)

- **albit**
- **klinochlor (tmavozelené lístky)**
- hematit
- pyrit (až 1 cm XX)
- magnetit
- **titanit vytváří velmi malé (do 1 mm) bezbarvé či světle zelené XX se silným leskem)**
- kalcit (XX)

Kutná Hora
– lomy „Prachovna“, „V Hutích“, „Kamenná bába“
lom u Vrbova mlýna

- **okolní horninou katazonálně metamorfované ruly a migmatity kutnohorského krystalinika**

Minerály:
- **křemen zastoupen křišťálem, XX až 2 cm velké**
- **chlorit černozelený,** ve vějířovitých a paprsčitých shlucích
- **anatas (ocelově modré až šedé dipyramidy s silným leskem, do 5 mm)**
- brookit – vzácnější (nahnědlé rýhované tabulky, do 3 mm)
- **rutil (jako varieta „sagenit“ v XX křišťálu)**
- **klinochlor (tmavozelené lístky)**
- turmalín - skoryl
- **fluorit ve štěpných agregátech nebo XX**
- ilmenit
- kalcit
- **laumontit – sukcesně nejmladší minerál**

Minerální asociace B
(dle Bernarda)
– v granitech, granodioritech, pegmatitech, rulách (přechodný typ mineralizace s kolísavým obsahem Ca)

Černá Voda u Žulové – „Nový lom“

- **okolní horninou biotitové granity, granodiority a pegmatity žulovského masivu**

Minerály:
- **křemen** vytváří šedobílé XX kolem 1 cm velké
- **albit XX v drúzách**
- **epidot – klinozoisit (stébelnaté až paprsčité agregáty i několik cm velké, zbarvení šedé až ostře zelené, klasifikačně většinou epidoty)**

- **chlorit = chamosit** (Losos a kol. 1994), **ve varietě „strigovit“ (jemně zrnité až celistvé černozelené agregáty), v trhlinách pegmatitů**

- hematit – lupenité agregáty, často s epidotem a stopbitem

- titanit
- kalcit
- pyrit

- **stilbit – časté snopkovité a vějířovité agregáty (průměr až 3 cm) a XX na puklinách granitoidů**

- heulandit

Minerální asociace C

(dle Bernarda)

– na puklinách amfibolitů, amfibolických rul, skarnů, dioritů, gaber (mineralizace s vysokým obsahem Ca)

Sobotín – „Pfarrerb“

- **asi 0.5 km východně od kostela v Sobotíně, při cestě na kótu Smrčina**
- **horniny sobotínského amfibolitového masivu (amfibolity, amfibolické ruly)**

Minerály:

- **epidot je zde světově známým minerálem, jeho XX jsou sytě zelené, někdy průhledné. Největší X 140 x 26 mm** (Nepejchal 1994)

- **albit – tvoří drúzy bílých nebo bezbarvých XX, několik mm velkých, často zdvojčatělých**

- **adulár (mikroklin)**

- **aktinolit** v podobě azbestu

- **apatit (nízce sloupečkovité XX bílé nebo nafialovělé barvy)**

- **diopsid** je nejstarším minerálem (350 ^{o}C a tlak 2-3 kbar dle Nováka a kol.1991)

- **titanit (sfén) – klínovité XX do 0.5 cm velikosti, žlutozelené barvy a průhledné**

- **prehnit** (bílý až světle zelený, v kulovitých a hřebenitých agregátech v dutinách)

- **ilmenit**

- **Ca-**zeolity /**heulandit**/ (nejmladší fáze asociace) – cca 150 ^{o}C a tlak 1 kbar

Mirošov – činný lom

- **horniny strážeckého moldanubika (amfibolity, amfibolické ruly migmatitizované)**

Minerály:
- **epidot (dlouze sloupcovitý, paprsčité XX**
- **albit**
- **křemen (xx kolem 1 cm, někdy křišťál)**
- **amfibol (aktinolit – paprsčitý), prehnit**
- **titanit – klínovité a psaníčkovité typy XX**
- **chlorit (klinochlor) – kulovité radiálně lupenité agregáty**
- axinit
- **pyrit,** markazit, hematit
- **apatit**
- **stilbit (nasedá na křišťál), chabazit**

Minerální asociace D

(dle Bernarda)

– specifický typ převážně karbonátových žilek v sedimentárním komplexu chvaletického ložiska Fe-Mn rud (mineralizace s vysokým obsahem Mn)

Chvaletice

- **horniny chvaletického proterozoika**

Minerály:

- **rodochrozit a kutnohorit, ankerit**

- **neotokit (/Mn Fe/ Si O3 . H2O)**

- **Mn-cummingtonit v azbestové formě**
- **cronstedtit** (sk. serpentinu)
- **hyalofan**
- **K, Ba – živce, Ba-heulandit**
- **pyrofanit**
- **dravit- jemně vláknitý**
- **křemen**
- **sulfidy: alabandin (MnS), pyrit, markazit**

- **hevlín, rutil, opál**