

Minerogenetické (nerostotvorné) 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.**

Hydrotermální procesy a mineralizace

- dochází ke krystalizaci minerálů z hydrotermálních roztoků

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

Teplotní dělení:

- vysokoteplotní (katatermální) roztoky : 700 – 300 °C
- středně teplotní (mezotermální) roztoky: 300 – 200 °C
- nízkoteplotní (epitermální) roztoky: 200 – 50 °C
- /teletermální roztoky/
- „alpské parageneze“ 350 – 50 °C

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 °C za tlaku 22 Mpa.

- kritická teplota hydrotermálních roztoků je vyšší v závislosti na obsahu rozpuštěných látek
(např. 20% rozpuštěných solíkritický bod 600 °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, HCO₃, CO₃, SO₄, F

Pro transport chalkofilních prvků (Pb, Zn, Ag, Cu,.....) mají velký význam ionty HS⁻ a S²⁻.

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

Bi - As- Au,

Cu,

U - Zn - Pb,

Ag

Sb – As

Hg

Hydrotermální ložiska sulfidických rud tvoří jednak:

- **rudní žíly** (vyplňování puklin nebo trhlin v horninách)
- **metasomatická ložiska** (zatlačení původního nerostu a nahrazení jiným nerostem)
- **ložiska impregnační** (sulfidy a doprovodné minerály se vylučují většinou v porézních horninách)

Formace sulfidických ložisek lze rozlišit podle charakteristických minerálů a dle klesající teploty vzniku:

1. Zlatá a zlato-stříbrná formace

Hlavním nerostem křemen, tvořící hlušinu žil.

Z rudních minerálů pyrit, arzenopyrit, chalkopyrit, vzácněji antimonit. Sulfidy jsou nositeli malých obsahů zlata.

Zlato bývá také v ryzí formě v křemenu.

2. Ag-Co-Ni-Bi-U formace

Je zde několik typů, v nichž převládá některý z jmenovaných prvků (Jáchymov).

- typ stříbrných rud: argentit, proustit a pyrargyrit, sternbergit, stefanit, též ryzí stříbro (Kongsberg). V menším množství ryzí As, Sb, dále chloantit, smaltin, nikelín, löllingit.

Hlušinou žil bývá kalцит, dolomit (s pigmentem hematitu), křemen, fluorit, baryt.

- typ s převládajícími arzenidy Co a Ni: smaltin, arzenopyrit, Bi

- typ s uranem a Bi: vedle arzeniků sloučeniny Bi (bismutin). Uraninit (smolinec). Vedlejšími minerály Hg, pyrit, chalkopyrit nebo Ag-rudy a galenit.

Hlušinou žil bývají vedle křemene kalцит, dolomit, méně baryt, vzácněji fluorit.

3. Pyritová a chalkopyritová formace

Ložiska s převládajícím pyritem a celkově chudou paragenezí nerostů (podružný chalkopyrit, arzenopyrit, sfalerit, galenit).

Nerudní složkou je siderit nebo baryt, řídce kalцит

Druhým typem jsou ložiska s převládajícím chalkopyritem, často s bornitem, pyritem a tetradritem. Přecházejí do ložisek polymetalického charakteru :
+ sfalerit a galenit.

4. Pb-Zn-Ag formace

Galenit a sfalerit. Galenit je stříbrnosný a sfalerit obsahuje Cd. Vzácnější Ag-minerály.

Někdy přechod do výše temperované chalkopyrit-pyritové formace, či níže temperované antimonitové formace

Nerudní výplň žil bývá baryt, siderit a kalцит.

5. Sb-As-Se formace

Převládá antimonit, provázený pyritem. Vzácněji galenit nebo sfalerit.

Ložiska arzenu pak obsahují hlavně realgar a auripigment.

V obou případech kalcit

6. Hg formace

Obsahuje jako hlavní a v podstatě jediný minerál rumělkou.

Hlušinou komponentou je kalcit.

Teploty vzniku se blíží atmosferickým teplotám.

Vznik nerostů z nadkritických fluid, vznik greisenů

(dříve pneumatolytické pochody)

Vysokoteplotní hydrotermální mineralizace

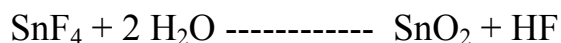
V procesu krystalizace pegmatitů (z taveniny) se vyloučí zbývající část silikátů, v minerálech se realizují vzácné plyny a prvky, převážná část manganu a fosfátů.

Koncentrace lehkých těkavých komponent se opět zvýší. Z kovových prvků ve fluidech přetrvávají a koncentrují se těžké kovy (Pb, Zn, Cu...) a prvky, které tvoří sloučeniny především s F a Cl.

Teplota zůstává nad kritickým bodem vody.

V této etapě krystalizace se vylučují zejména prvky Sn, W a Mo.

Sn je mobilní jako fluorid Sn a hydrolyzuje se v oblastech nižších teplot:



Vzniká **kasiterit (cínovec)** a uvolňuje se fluorovodík. Ten je velmi agresivní ke svému okolí, vyvolává greisenizaci žul – tvorbu **topazu** z původních živců.

Následně se formují vysokoteplotní (katatermální) hydrotermální roztoky, obsahující část prvků z pegmatitové fáze (B, F, Li, Be, Mn).

Krystalizuje význačná parageneze minerálů:

- křemen
- topaz
- cinvaldit K, Li, Fe, Al - slída
- apatit (fluorapatit)
- triplit (Mn, Fe)₂ F PO₄
- fluorit
- beryl
- turmalín

Pozn. cínovec se objevuje již v pegmatitech, zejména Li-pegmatitech (Rožná).

(není ostré hranice mezi pegmatitovým stádiem a pneumatolytickým stádiem)

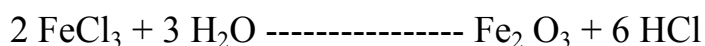
Kasiterit je většinou doprovázen wolframitem. Na úkor wolframitu se někdy tvoří mladší scheelit.

Z nadkritických fluid krystalizují i některé sulfidy. Typický je molybdenit. Z následných vysokoteplotních hydrotermálních roztoků se nejčastěji vylučují chalkopyrit a arzenopyrit.

Formace Sn – W

Formace Sn – W - Li

Pneumatolytickým minerálem může být také **hematit**. Železo mobilní v podobě chloridu Fe podléhá za poklesu teploty hydrolyze:



Takto vznikající hematit tvoří obvykle krásné drúzy krystalů (Elba).

Popsané procesy mineralizace z nadkritických fluid a vysokoteplotních hydrotermálních roztoků jsou fungující jen za vyšších tlaků, jinak dojde k úniku těžkých komponent.

Příklady z oblasti Krušných Hor a Slavkovského lesa

- oblast je charakterizována mladovariskou Sn-W mineralizací (*asociace li-snw dle Bernarda*) se silnými pneumatolytickými jevy (silně alterované kyselé žuly „mladšího“ komplexu: 256 M.A.)

Horní Slavkov - Krásno – Sn-W

Geologie:

- karlovarský žulový pluton, pararuly, migmatity, ortoruly

Huberův či Hubský peň (obr.), Schnödův peň, Vysoký kámen, Klinge

- **elevace žul silně přeměněné v greisenové pně** (také topazizace, kaolinizace, sericitizace, cinvalditizace, albitizace, fluoritizace)
- **křemenné žíly: slídy, Sn-W minerály, molybdenit, chalkopyrit**
- **aplitové žíly s turmalínem**

Minerály:

- **kasiterit – 1 až 15 cm velké XX, jedny z nejkrásnějších celosvětově, převládají dvojčata**
- wolframit – štěpné tabulky v křemenných žilách
- scheelit – bílá, až 5 cm velká zrna, zaměnitelný s křemenem
- **apatit – typický, zelené a fialové sloupečky až 3 cm velké**
- **topaz – sloupcovité XX, nejhezčí v ČR**
- fluorit – zonálně zbarvené XX
- cinwaldit – jemněji lupenité agregáty než na Cínovci
- beryl

- albit
- **karfolit – nový minerál (slámově žluté jehlicovité agregáty, radiálně paprscité)**
- fosfáty: triplit
- **sulfidy: molybdenit, arzenopyrit, černý sfalerit, stanin, bismutin**
- **bismut**
- **sekundární minerály: W a Mo-okry, mnoho dalších**

Cínovec, s. od Teplíc – na hranicích s SRN (viz mapka) – Li -Sn-W

Geologie:

- **komplex křemenného teplického porfyru, albitické žuly klenbovité stavby**
- **mikroklinizace, albitizace, fluoritizace**
- **nepravidelná greisenová tělesa v žule**

Ploché křemenné žíly s výplní:

- **křemennou**
- **cinvalditovou**
- **topazovou**
- **K-živcovou**

Minerály:

- **křemen (XX záhněda, morion)**
- **kasiterit – 1 až 3 cm velké XX, muzejní ukázky, převládají dvojčata**
- **wolframit – hlavní rudní nerost na ložisku, XX až 10 cm velké, unikátní z celosvětového hlediska, v rovnováze ferberit: hübnerit**
- **scheelit – žlutohnědé XX až 1 cm velké**
- **apatit – vzácný, sloupcovitý**
- **topaz – sloupcovité XX – pyknit, zrnité agregáty**
- **fluorit – fialové nebo bezbarvé XX v dutinách žil**
- **cinvaldit – popsán jako nový minerál, až několik cm velké pseudohexagonální tabulky**
- **sekundární minerály: W a Mo-okry, mnoho dalších**

Recentní submarinní hydrotermální procesy

Vznik submarinní hydrotermální mineralizace je podmíněn:

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

Dochází k tomu :

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

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

Podloží recentních hydrotermálně sedimentárních sulfidických akumulací a jeho hydrotermální alterace

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

Na středoceanických 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 °C
- „white smokers“ 20-300 °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.

Hydrotermální kupy – 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/ **Kotlina „Atlantis II“ v riftové zóně Rudého moře:**

- 94 mil. tun rud s kovatostí 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 **v riftovém údolí Galapážského hřbetu.** 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, SiO₂
- 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 střeoceanických hřbetů jsou tvořeny především:

- sulfidy Fe, Cu a Zn, z nerudních minerálů převládají různé formy SiO₂ a sulfáty
- **akumulace takových rud: středoatlanský, východopacifický a galapážský hřbet, Rudé moře (Atlantis)**
- jde o recentní analogy rudních ložisek „kuroko“ a kyperského typu

„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 °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 černozeleň, ve vějířovitých a paprscitých 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 černozelelé agregáty), v trhlinách pegmatitů**
- hematit – lupenité agregáty, často s epidotem a stilbitem
- 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 zdvojitých**

- **adulár (mikroklin)**
- **aktinolit** v podobě azbestu
- **apatit (nízce sloupečkovité XX bílé nebo nafialovělé barvy)**
- **diopsid** je nejstarším minerálem (350 °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 °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