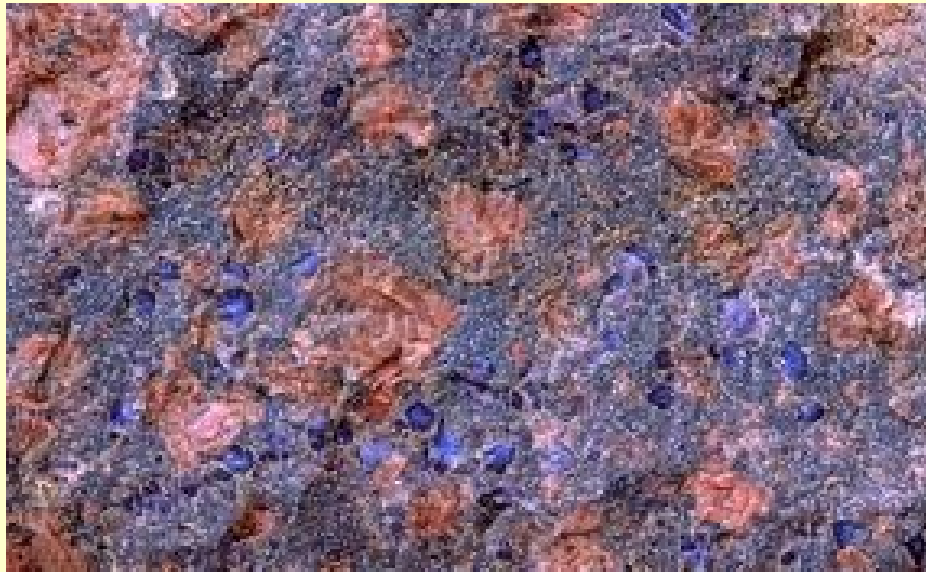


Petrologie G3021

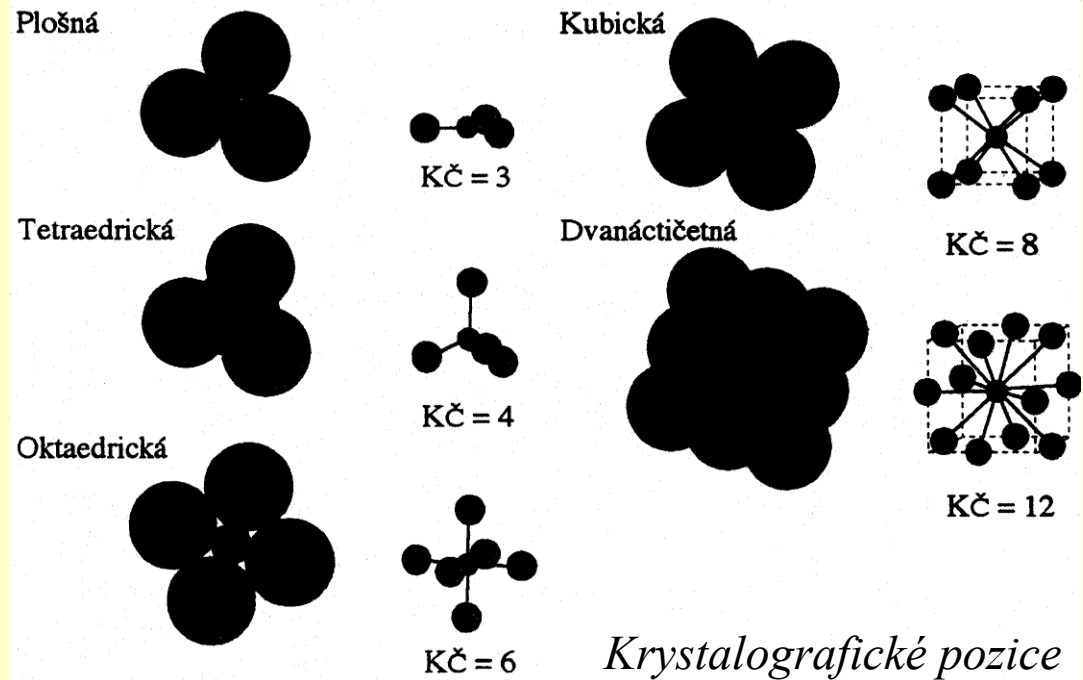
5. Minerály metamorfovaných hornin a termobarometrie



Krystalochemie horninotvorných minerálů

- substituce jednoduché – stejný náboj/podobný at. poloměr – neomezená mísivost (Mg-Fe)
- odlišný at. poloměr – omezená mísivost (Mg-Ca)
- podvojně - atomy s nestejným nábojem ve dvou pozicích

↓ *Důležité substituce*



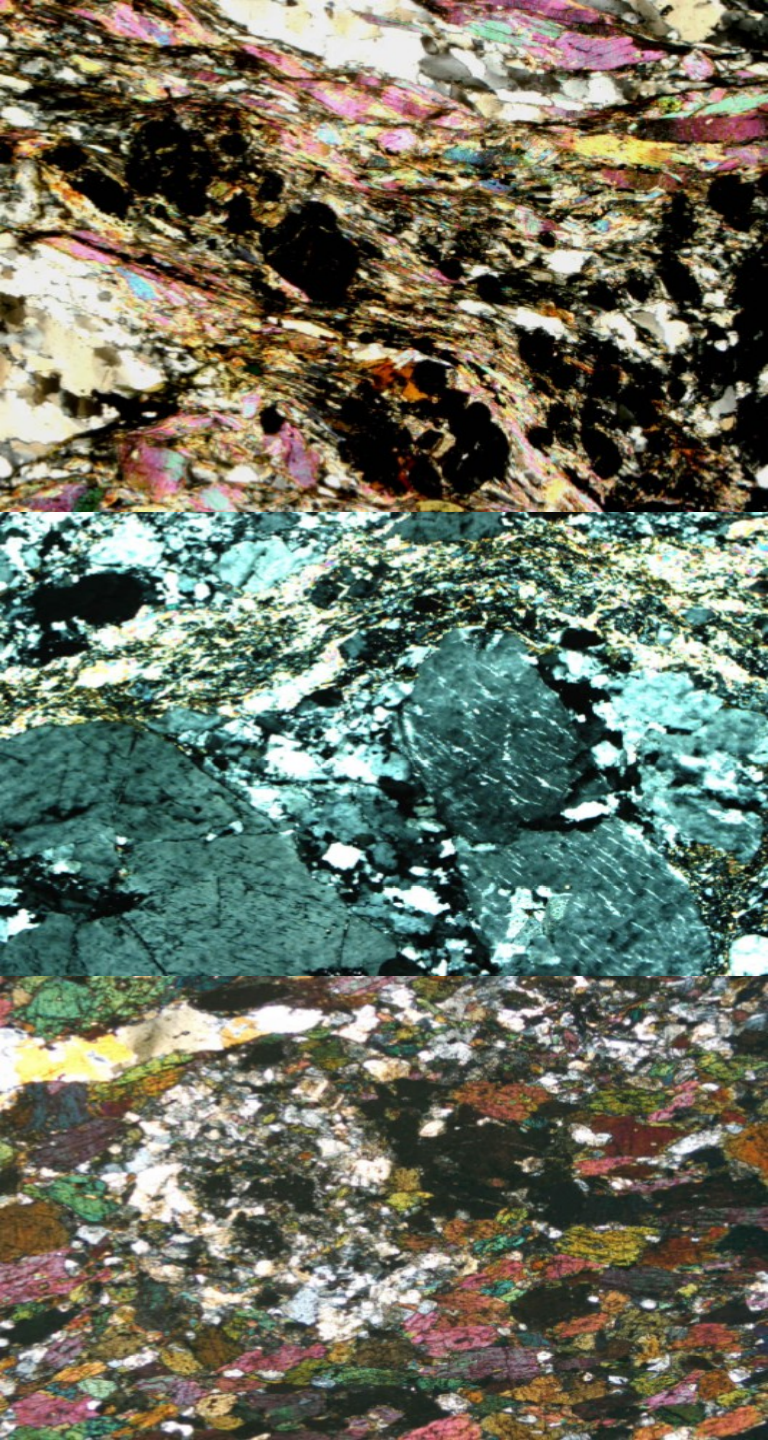
$\text{Fe}^{2+}\text{Mg}_{.1}$ (olivín, pyroxeny, amfiboly, AFM minerály)	$\text{Fe}^{3+}\text{Al}_{.1}$ (oxidy, epidot, Al_2SiO_5)
$\text{Fe}^{2+}\text{Mn}_{.1}$ (karbonáty, granát, cordierit, chloritoid)	$\text{Cr}^{3+}\text{Al}_{.1}$ (spinely, pyroxeny, chlorit, amfiboly)
$\text{FOH}_{.1}$ (slídy, amfiboly)	$\text{CaMg}_{.1}$ (pyroxeny, amfiboly, granát, olivín, ...)
$\text{SiH}_{.1}$ (granát, olivín, jiné ortosilikáty)	$\text{KNa}_{.1}$ (slídy, živce, foidy)
$\text{MgSiAl}_{.2}$ (pyroxeny, amfiboly, slídy, chlorit, ...)	$\text{NaSiCa}_{.1}\text{Al}_{.1}$ (plagioklas, pyroxeny, amfiboly, ...)
	$\text{SiNa}_{.1}\text{Al}_{.1}$ (nefelín, amfiboly)
	$\text{CaMgNa}_{.1}\text{Al}_{.1}$ (pyroxeny, amfiboly)

SYMBOLS FOR ROCK- AND ORE-FORMING MINERALS

→ Act	actinolite	Bn	bornite	Dum	dumortierite	Hs	hastingsite
Ae	aegirine	Brk	brookite	Eck	eckermannite	Hyn	häuyne
Ak	åkermanite	Brc	brucite	Ed	edenite	Hd	hedenbergite
→ Ab	albite	Bst	bustamite	Elb	elbaite	Hlv	helvite
Aln	allanite	→ Cpx	Ca clinopyroxene	En	enstatite	→ Hem	hematite
→ Alm	almandine	→ Cal	calcite	→ Ep	epidote	Hc	hercynite
→ Amp	amphibole	Ccn	cancrinite	Fa	fayalite	Hrd	herderite
Anl	analcime	Cst	cassiterite	Fac	ferro-actinolite	Hul	heulandite
Ant	anatase	Cls	celestite	Fcl	ferrocolumbite	→ Hbl	hornblende
→ And	andalusite	Cbz	chabazite	Fed	ferro-edenite	Hu	humite
Adr	andradite	Cc	chalcocite	Fs	ferrosilite	Ill	illite*
Anh	anhydrite	Ccp	chalcopyrite	Ftn	ferrotantalite	→ Ilm	ilmenite
Ank	ankerite	→ Chl	chlorite*	Fts	ferrotschermakite	Jd	jadeite
Ann	annite	→ Cld	chloritoid	Fl	fluorite	Jh	johannsenite
→ An	anorthite	Chn	chondrodite	→ Fo	forsterite	Jsv	johnsomervilleite
Atg	antigorite	Chr	chromite	Gn	galena	Krs	kaersutite
Ath	anthophyllite	Cel	chrysocolla	→ Grt	garnet*	Kls	kalsilite
→ Ap	apatite	Ctl	chrysotile	Ged	gedrite	Kln	kaolinite
Apo	apophyllite	Chu	clinohumite	Gh	gehlenite	Ktp	katophorite
Arg	aragonite	→ Cpx	clinopyroxene*	Gbs	gibbsite	→ Kfs	K-feldspar*
Arf	arfvedsonite	→ Czo	clinozoisite	Glt*	glaucosite	Krn	kornepine
Apy	arsenopyrite	Coe	coesite	Gln	glaucophane	→ Ky	kyanite
Asp	aspidolite	→ Crd	cordierite	Gt	goethite	Ltp	latrappite
Aug	augite	Crn	corundum	Gft	grastonite	Lmt	laumontite
Brt	barite	Cv	covellite	Gdd	grandidierite	Lws	lawsonite
Bet	betafite	Crs	crystalite	Gr	graphite	Lpd	lepidolite*
Brl	beryl	Cum	cumingtonite	Gre	greenalite	Lct	leucite
Bry	beryllonite	Dsp	diaspore	→ Grs	grossular	Lz	lizardite
Beu	beusite	Dg	digenite	Gru	grunerite	Lol	löllingite
→ Bt	biotite*	→ Di	diopside	Gp	gypsum	Lop	loparite
Bhm	böhmite	→ Dol	dolomite	HI	halite	Lue	lueshite
Bor	boralsilite	Drv	dravite	Ham	hambergite	Mgh	maghemite

Mkt	magnesiokatophorite	→	Opx	orthopyroxene*		Rdn	rhodonite	→	Tlc	talc
Mrb	magnesioriebeckite		Osm	osumilite	→	Rt	rutile		Tap	tapiolite
Mgs	magnesite		Pg	paragonite		Sa	sanidine		Tep	tephroite
Mgt	magnetite		Prg	pargasite		Spr	sapphirine		Thm	thomsonite
Mcl	manganocolumbite		Pct	pectolite		Sar	sarcopside	→	Ttn	titanite
Mtn	manganotantalite		Pn	pentlandite	→	Scp	scapolite*		Toz	topaz
Mrg	margarite		Per	periclase		Srl	schorl		Tur	tourmaline*
Mel	melilite		Prv	perovskite		Skn	sekaninaite	→	Tr	tremolite
Mc	microcline	←	Phk	phenakite		Srp	serpentine*		Trd	tridymite
Mic	microlite		Phl	phlogopite		Sd	siderite		Tph	triphylite
Min	minnesotaite		Pgt	pigeonite	→	Sil	sillimanite		Tro	troilite
MLb	molybdenite	→	Pl	plagioclase		Sdl	sodalite		Ts	tschermakite
Mnz	monazite		Pmc	plumbomicrolite	→	Sps	spessartine	→	Usp	ulvöspinel
Mtc	monticellite		Pol	pollucite		Sp	sphalerite		Umc	uranmicrolite
Mnt	montmorillonite		Prh	prehnite	→	Spl	spinel		Vrm	vermiculite
Mul	mullite		Prm	prismatine		Spd	spodumene	→	Ves	vesuvianite
Ms	muscovite	←	Pmp	pumpellyite	→	St	staurolite		Vtm	viitaniemiite
Ntr	natrolite		Py	pyrite		Stl	stellerite		Wai	wairakite
Ne	nepheline	→	Prp	pyrope		Stb	stibiobetafite		Wrd	werdingite
Nrb	norbergite		Prl	pyrophyllite		Stm	stibiomicrolite		Wth	witherite
Nsn	nosean		Po	pyrrhotite		Stb	stilbite	→	Wo	wollastonite
Ol	olivine*	←	Qtz	quartz	→	Stp	stilpnomelane		Wus	wüstite
Omp	omphacite		Rbk	riebeckite		Sti	stishovite		Zrn	zircon
Or	orthoclase	←	Rds	rhodochrosite		Str	strontianite	→	Zo	zoisite

- ***Důležité horninotvorné minerály metamorfovaných hornin***
- Křemen a další polymorfy SiO_2
- Živce (plagioklasy – albit, anortit, ortoklas, sanidin) $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-NaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_8$
- Biopyriboly = pyroxeny (enstatit, ferosilit, diopsid, hedenbergit, jadeit, omfacit)
amfiboly (aktinolit, tremolit, obecný amfibol, glaukofan)
slídy (muskovit, biotit, paragonit, flogopit), mastek, pyrofylit
- Skupina olivínu (olivín, forsterit) Mg_2SiO_4
- Granáty (almandin, pyrop, grossular) $\text{X}^{\text{II}}_3\text{Y}^{\text{III}}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Epidotová skupina (epidot, zoisit, klinozoisit, pumpellyit)
- Alumosilikáty (sillimanit, andalusit, kyanit)
- Al-bohaté minerály (staurolit, chloritoid, diaspor)
- Jiné silikáty (cordierit, chlority, wollastonit, lawsonit, prehnit)
- Zeolity (analcim, heulandit, laumontit, stilbit)
- Karbonáty (kalцит, dolomit)
-



Minerály metapelitů a ortorul

Metapelity (fyllit, svor, rula)

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$

Minerály: křemen, plagioklas, muskovit, (draselný živec), biotit, Al_2SiO_5 , chloritoid, chlorit, staurolit, cordierit, granát

Křemen-živcové horniny (ortoruly)

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$

Minerály: křemen, plagioklas, draselný živec, muskovit, biotit, granát

Metabazity (zelená břidlice, amfibolit, modrá břidlice, eklogit)

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$

Minerály: plagioklas, amfiboly, křemen, chlorit, granát, zeolity, epidotová skupina, pyroxeny

Minerály hornin bohatých na Ca a Mg

Vápenatosilikátové horniny $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-H}_2\text{O}$

Metakarbonáty $\text{MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

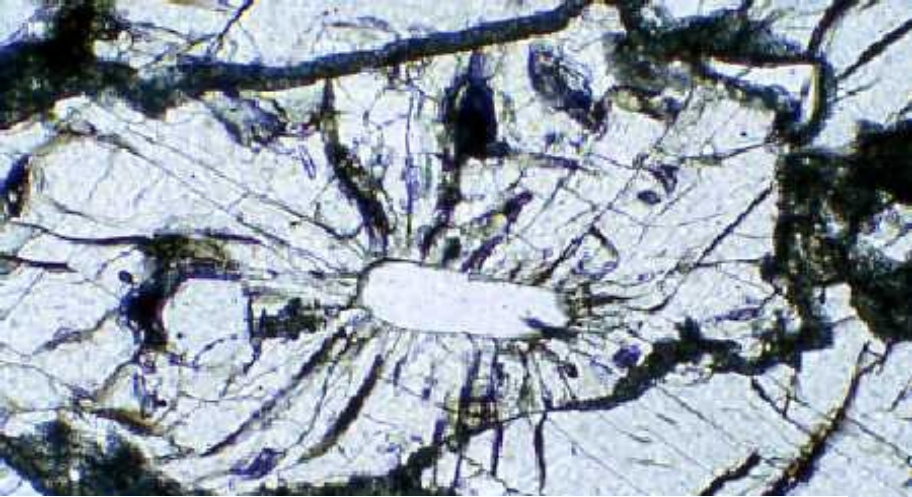
Křemité dolomity $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

Ultramafity $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

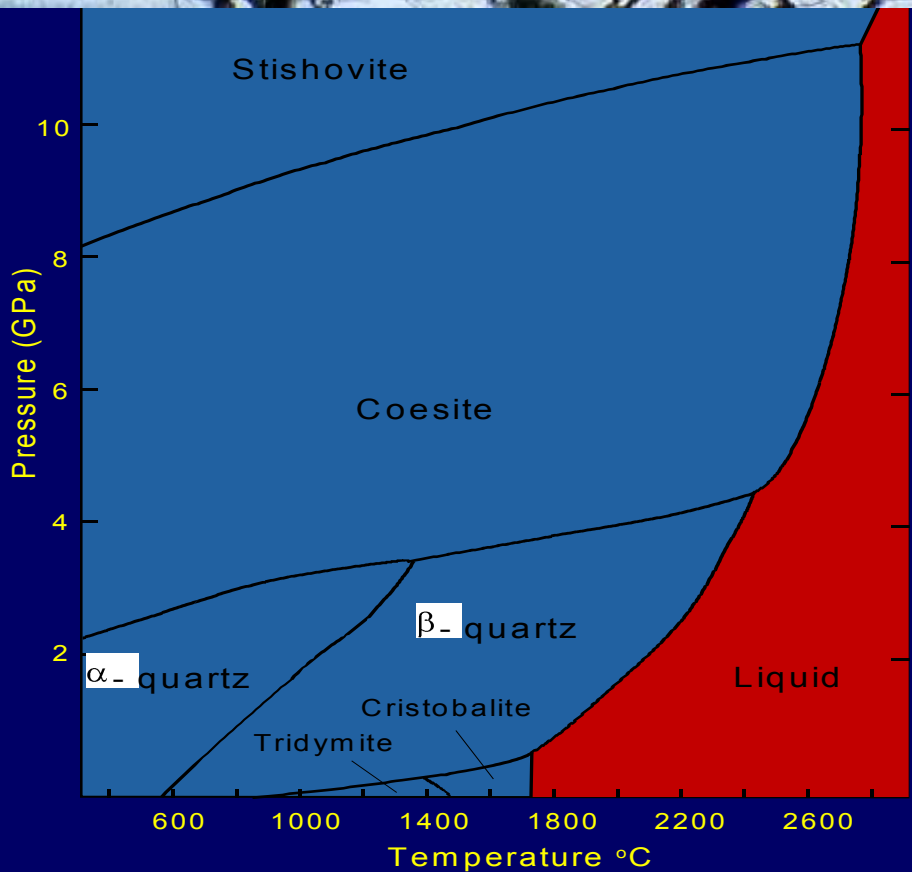
Minerály: pyroxeny, vesuvian, granát, Ca-Mg amfiboly, olivín, wollastonit, minerály serpentinové skupiny, (křemen, plagioklas), spinelidy.

ultramafity – serpentinit, mastková břidlice, chloritická břidlice

vápenatosilikátové horniny – pyroxenická rula (erlán), rodingit, skarn

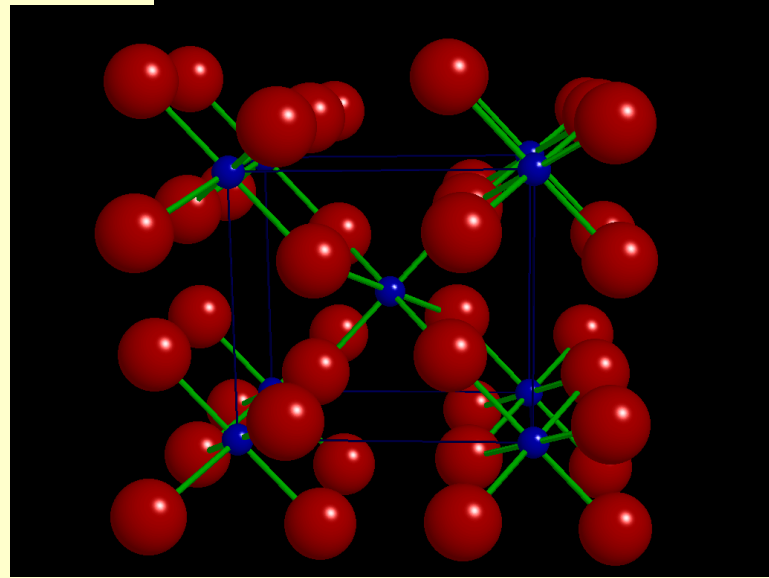
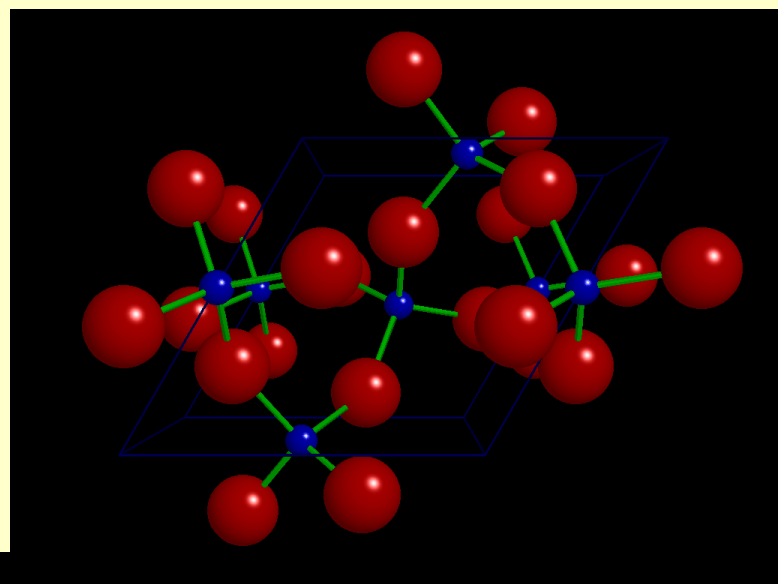


Uzavřenina coesitu v granátu - eklogit



Křemen (SiO_2)

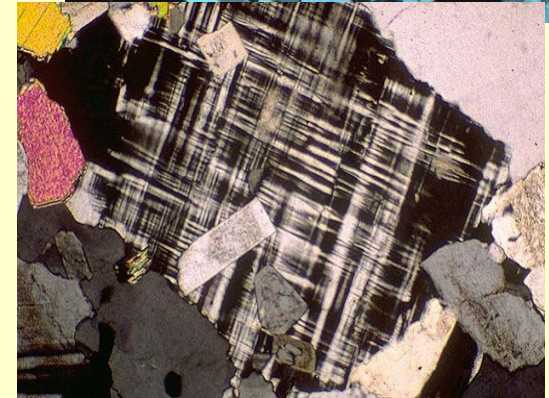
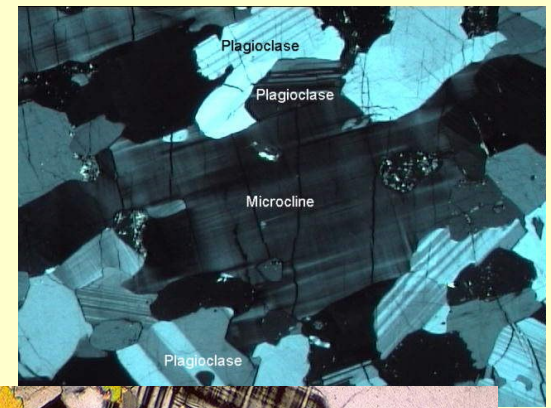
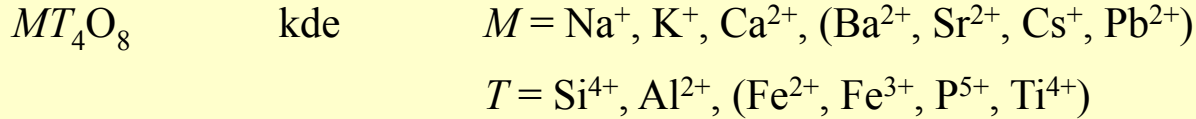
Nižší křemen Si^{IV}



Stishovit Si^{VI}

Živce

- bezvodé tektoalumosilikáty s obecným vzorcem:



- jsou nejrozšířenější minerály v zemské kůře
- tvoří 59 objemových % zemské kůry
- jsou součástí svrchního pláště
- spodní plášť a jádro živce neobsahují
- připadá na ně asi 0,2 % hmotnosti planety



alkalické živce (*ortoklas, mikroclin a albit do 5% An*)

- izomorfní řada albit – ortoklas
- izovalentní zastupování Na^+ za K^+
- **Sanidin** $(\text{K}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$
- **Draselný živec** - KAlSi_3O_8

sodnovápenaté živce (plagioklasy)

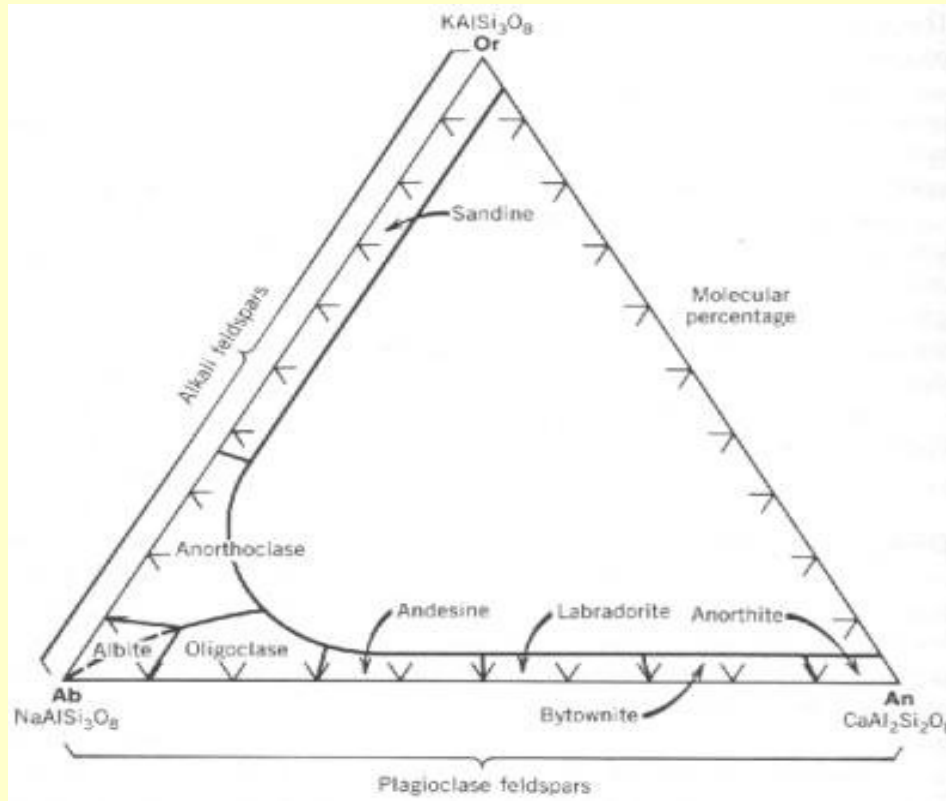
- úplná izomorfní řada albit – anortit
- heterovalentní zastupování Na^+ za Ca^{2+} valence se kompenzují zastupováním Si^{4+} za Al^{3+}
- **Albit** - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
- **Anortit** - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

Alkalické živce

Výskyt: ortoruly, granulity, vysokoteplotní kontaktní rohovce (sanidin)

Plagioklasy

Za teplot pod 400 °C se v systému $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ vyskytuje buď albit nebo anortit. Okolo 500 °C dochází ke skokové změně z albitu na oligoklas (peristeritová díra).



- Albit → zelené břidlice, fylity
- Oligoklas → ruly, amfibolity
- Andesin →
- Labradorit →
- Bytownit →
- Anortit →

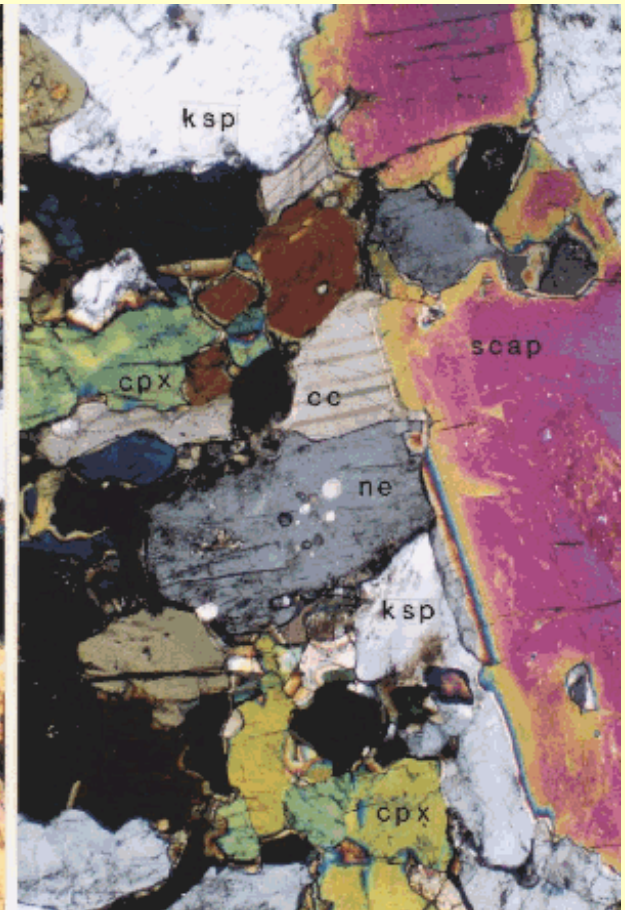
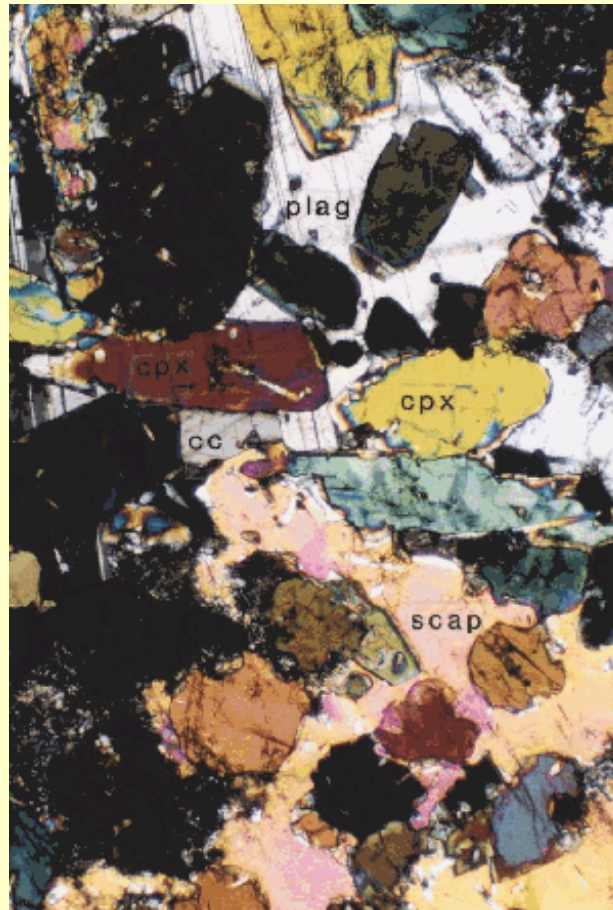
vápenato-silikátové horniny

- využití v termometrii: barometry (např. GASP) a termometr pomocí solvu
- živce podléhají přeměnám na jiné minerály
- bývají postiženy celé krystaly, jednotlivé růstové zóny nebo systémy dvojčatných lamel

Přeměny:

- myrmekitizace: orientovaný srůst draselného živce a vápenatého plagioklasu,
 - zatlačování draselného živce plagioklasem - odnos K a přínos Ca a Na
 - plagioklas tvoří v draselném živci útvary podobné chodbičkám
 - termínem myrmekit se také označují agregáty tvořené živcem a křemenem
- sericitizace: přeměna na agregát jemnozrnného muskovitu (tzv. sericitu)
 - často je sericit doprovázen albitem
 - vzniká působením hydrotermálních roztoků na alkalické živce
- kaolinitizace: přeměna alkalických živců na kaolinit
 - probíhá při zvětrávání ve slabě kyselém prostředí
 - může k ní docházet působením hydrotermálních roztoků
- saussirizace: přeměna vápníkem bohatých plagioklasů na jemnozrnný agregát různých minerálů,
 - nejčastěji epidotu (klinozoisitu), albitu, křemene, kalcitu, sericitu, skapolitu, vesuvianu atd.
 - probíhá za nízkoteplotních metamorfních a metasomatických podmínek

- **Skupina skapolitu**
- metabazity, karbonátové horniny, metaevapority
- kompletní mísivost mezi **marialitem** ($3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{NaCl}$) a **meionitem** ($3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{CaCO}_3$ nebo CaSO_4)
- tetragonální
- tektosilikáty

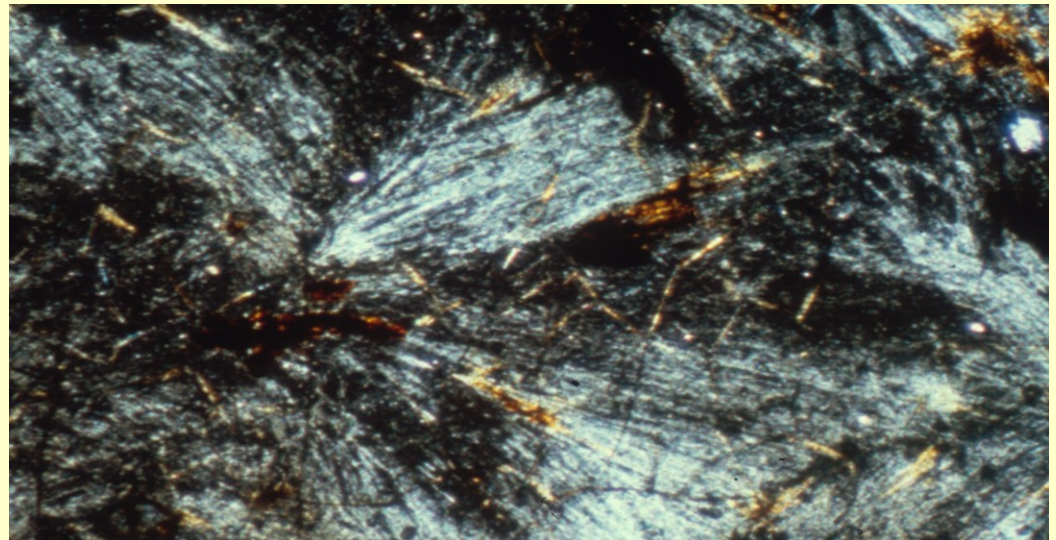


- Skapolit ve vyvřelé hornině ovlivněné asimilací: minerální složení augit (cpx), plagioklas (plag), skapolit (scap), kalcite (cc) nefeline (ne) draselný živec (ksp)

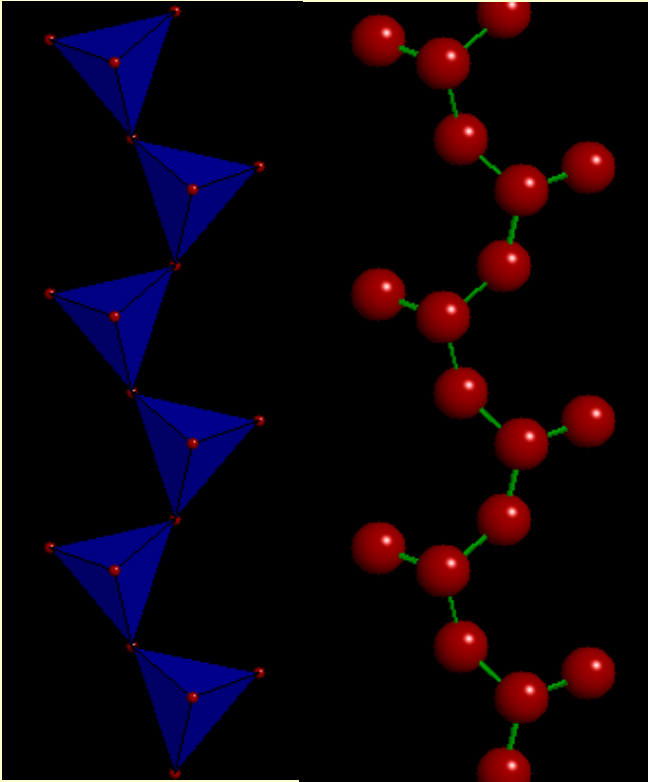
Skupina zeolitů

- skupina hydratovaných tektoalumosilikátů
- velké (obvykle 0,3–0,8 nm) dutiny a kanály ve struktuře
- v dutinách jsou nepříliš pevně vázány molekuly H_2O (tzv. “zeolitová voda”), kationty alkalických kovů (Na^+ , K^+ , Li^+ , Cs^+) a alkalických zemin (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+}).
- obecný vzorec skupiny lze napsat: $M_x D_y [Al_{x+2y} Si_{n-(x+2y)} O_{2n}] \cdot mH_2O$
- kde: $M = Na^+, K^+, Li^+$ a $D = Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Mg^{2+}$
- zeolity vznikají v některých slabě regionálně metamorfovaných horninách (zeolitová facie) a některých kontaktních metamorfitech (slabě metamorfované bazické horniny a jejich tufy)

- **Analcim** - krychlový
- $NaAlSi_2O_6 \cdot 6H_2O$
- **Natrolit** - kosočtverečný
- $Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot 2H_2O$
- **Chabazit** - trigonální
- $CaAlSi_2O_6 \cdot 3H_2O$

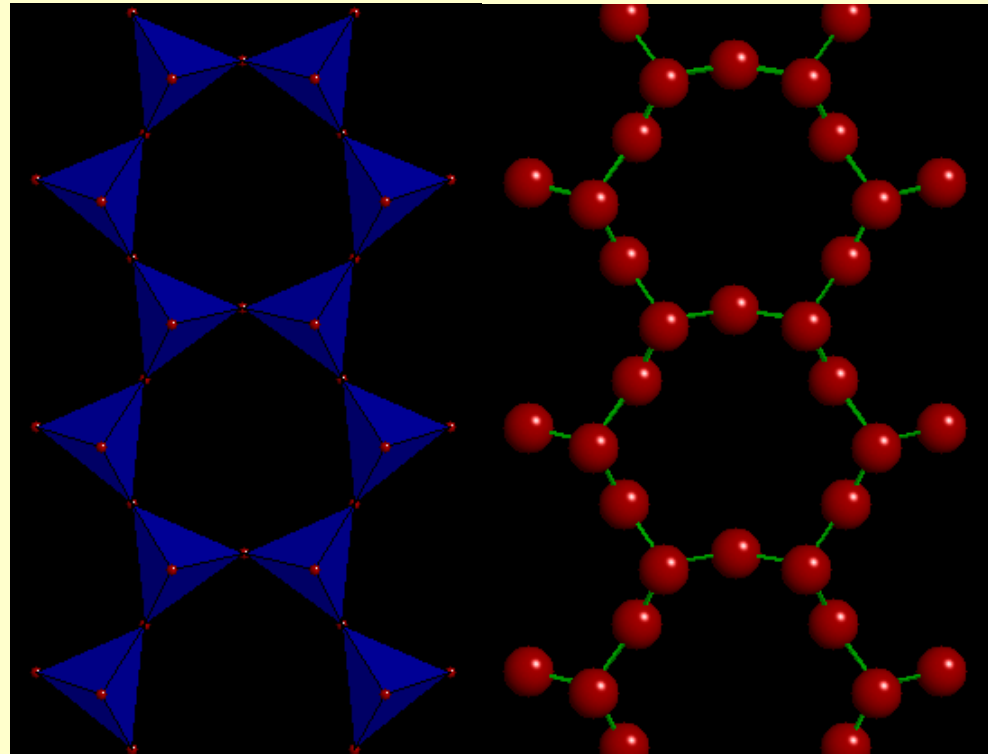


Inosilikáty



$[\text{SiO}_3]^{2-}$ jednoduché řetězy

pyroxeny



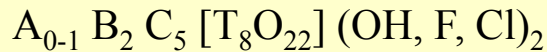
Inosilikáty

$[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{4-}$ dvojité řetězy

amfiboly

Amfiboly

Obecný vzorec:

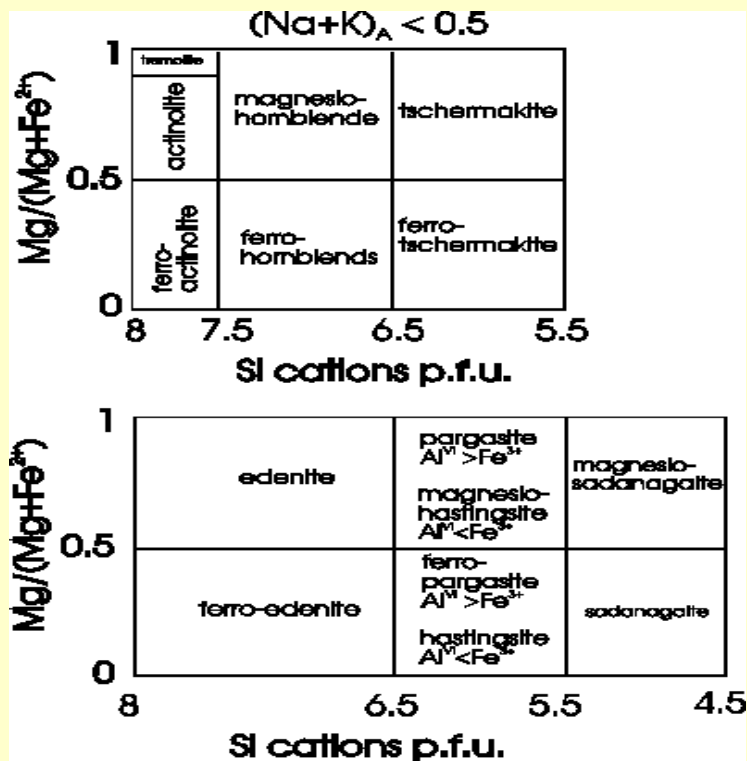


A = Na K

B = Ca Na Mg Fe²⁺ (Mn Li)

C = Mg Fe²⁺ Mn Al Fe³⁺ Ti

T = Si Al



➤ amfiboly jsou monoklinické a rombické

➤ je popsáno cca 75 koncových členů

➤ široká izomorfním mísivost

➤ amfiboly můžeme rozdělit na :

(a) Mg–Fe amfiboly,

(b) Ca-amfiboly,

(c) alkalické amfiboly

substituce v amfibolitech umožňují využít tento minerál pro určení tlaku, teploty a fugacity kyslíku

Holland a Blundy (1994) publikovaly nejnovější empirickou kalibraci amfibol-plagioklasového termometru. Je tvořen dvěma reakcemi:

A) edenit-tremolit reakce je použitelná pro metabazity v nichž je zastoupen křemen.



$$T = \frac{-76.95 + 0.79P + Y_{Ab} + 39.4X_{Na}^{[A]} + 22.4X_K^{[A]} + (41.5 - 2.89P)X_{Al}^{[M2]}}{-0.0650 - R \ln \left(\frac{27 X_{vac}^{[A]} X_{Si}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}}{256 X_{Na}^{[A]} X_{Al}^{[T1]}} \right)}$$

$$\text{for } X_{Ab}^{Pl} > 0.5 : Y_{Ab} = 0$$

$$\text{for } X_{Ab}^{Pl} \leq 0.5 : Y_{Ab} = 12(1 - X_{Ab}^{Pl})^2 - 3$$

B) edenit-richteritová reakce je vhodná také pro horniny bez křemene.



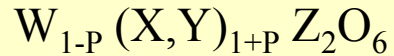
$$T = \frac{78.44 + Y_{Ab-An} - 33.6X_{Na}^{[M4]} - (66.8 - 2.92P)X_{Al}^{[M2]} + 78.5X_{Al}^{[T1]} + 9.4X_{Na}^{[A]}}{0.0721 - R \ln \left(\frac{27 X_{Na}^{[M4]} X_{Si}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}}{64 X_{Ca}^{[M4]} X_{Al}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}} \right)}$$

$$\text{for } X_{Ab}^{Pl} > 0.5 : Y_{Ab-An} = 3$$

$$\text{for } X_{Ab}^{Pl} \leq 0.5 : Y_{Ab-An} = 12(2X_{Ab}^{Pl} - 1)^2 + 3$$

Chemismus Pyroxenů

Obecný vzorec pyroxenů:



- W = **Ca** Na
- X = **Mg** **Fe²⁺** Mn Ni Li
- Y = Al **Fe³⁺** Cr Ti
- Z = **Si** Al

- pyroxeny mají monoklinickou (klinopyroxeny, cpx.) a rombickou (ortopyroxeny, opx.) symetrii
- bezvodé minerály
- při retrográdní metamorfóze mění na amfiboly
- za nižších PT podmínek snadno podléhají přeměnám: enstatit na serpentínové minerály, augit na chlority, cpx a opx na amfiboly (uralitizace)

Pyroxene End-Members with site-occupancies and symmetries				
M2	M1	T ₂	O ₆	
Mg	Mg	Si	Enstatite	
Fe ²⁺	Fe ²⁺	↓	Ferrosilite	
Ca	Mg		Diopside	
Ca	Fe ³⁺		Hedenbergite	
Ca	Mn		Johannsenite	
Na	Al		Jadette	
Na	Fe ²⁺		Aegerine	
Ca	Al		Al,Si	Ca-Tschermaks
Mg	Al		Al,Si	Mg-Tschermaks

Orthorhombic

Monoclinic

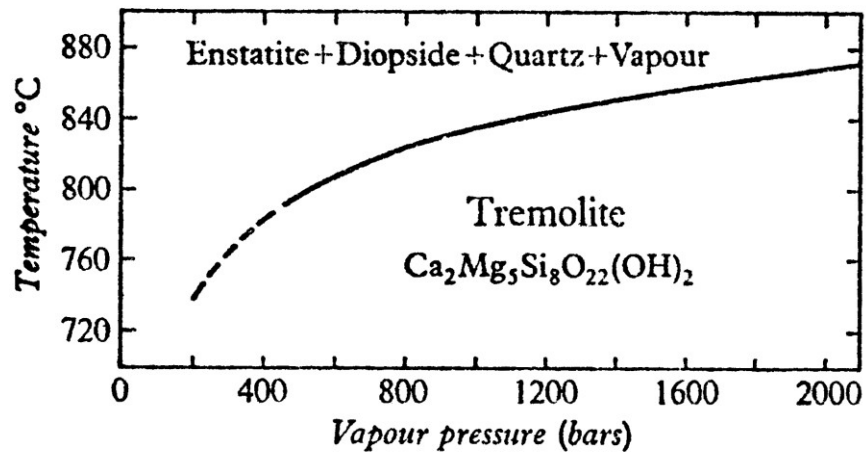


FIG. 65. The univariant equilibrium curve for the reaction tremolite \rightleftharpoons enstatite + diopside + quartz + vapour (after Boyd, 1954).

Příklad využití pyroxenu v metamorfní petrologii:

- Garnát-Cpx-fengitový barometr Holland and Powell (1990, J Metamorphic Geol. 8, 89-124)
- založeno na reakci **pyrope + 2grossular = 6diopside + 3Al₂Mg₋₁Si₋₁**
- P-T rozsah barometru 6 - 40 kbar, 400 - 900°C
- $P(\text{kbar}) = 28.05 + 0.02044T - 0.002995T \cdot \ln K$ (T = teplota v kelvinech)

•Jednoklonný pyroxen: augit

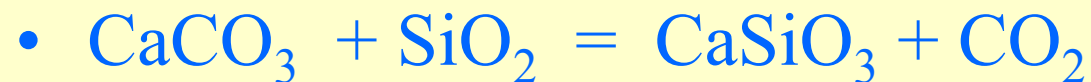
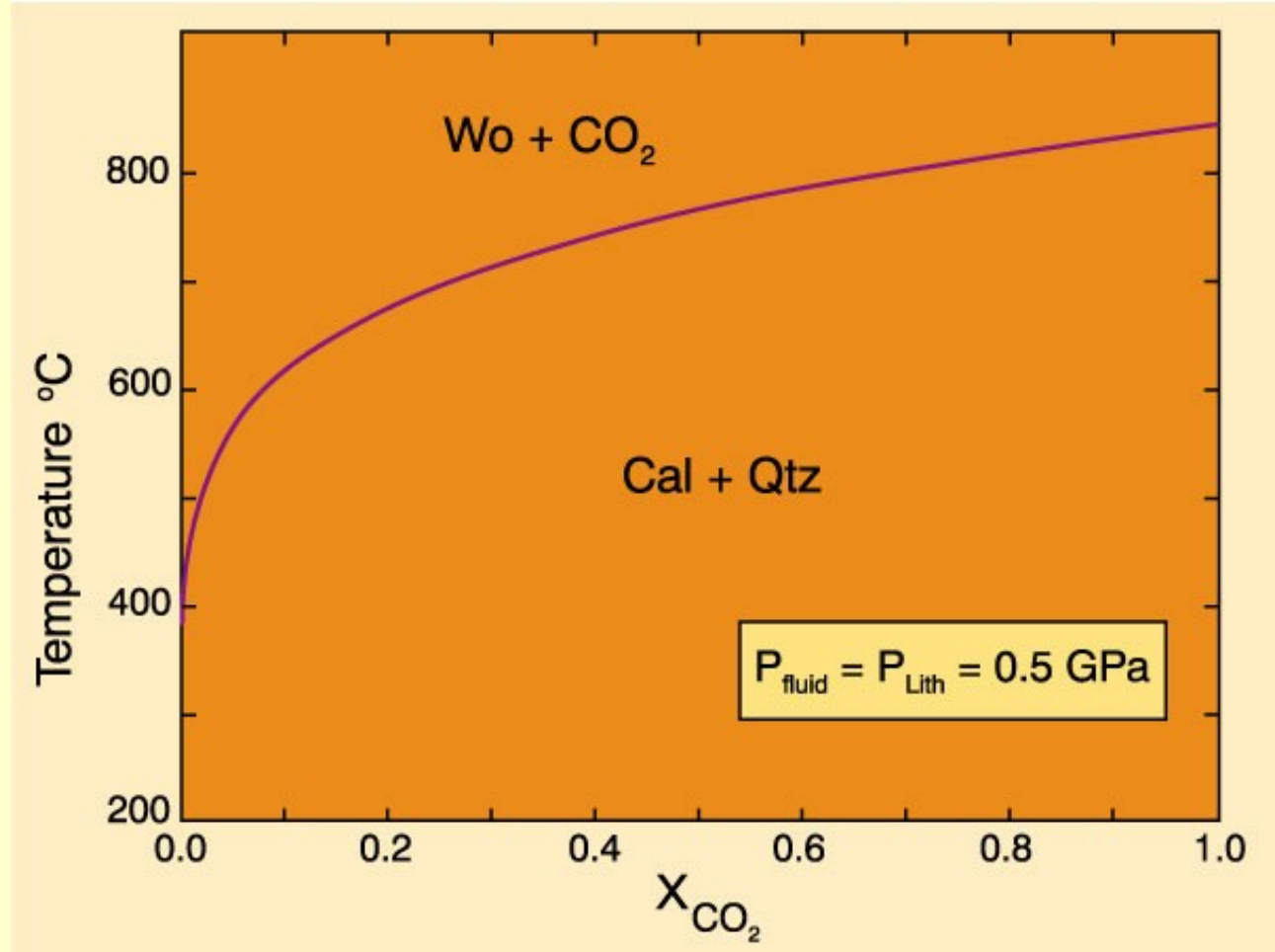
•Alkalické pyroxen: egerin - NaFeSi₂O₆

Kosočtverečný pyroxen



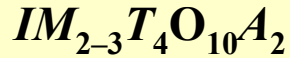
Wollastonit

- CaSiO_3
- blízce příbuzný pyroxenům (Pyroxenoid)
- mramory, erlany, skarny



Skupina slíd

- Skupina významných horninotvorných minerálů, trojvrstevných fylosilikátů s obecným vzorcem:



- kde:

$I = K^+, Na^+, \dots$ (mezivrstevní kationty)

$M = Li^+, Al^{3+}, Fe^{3+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}$. (ve středech oktaedrů)

$T = Si, Al, Fe^{3+}, \dots$ (ve středech tetraedrů)

$A = OH^-, F^-, \dots$



Koncové členy muskovitu a biotitu

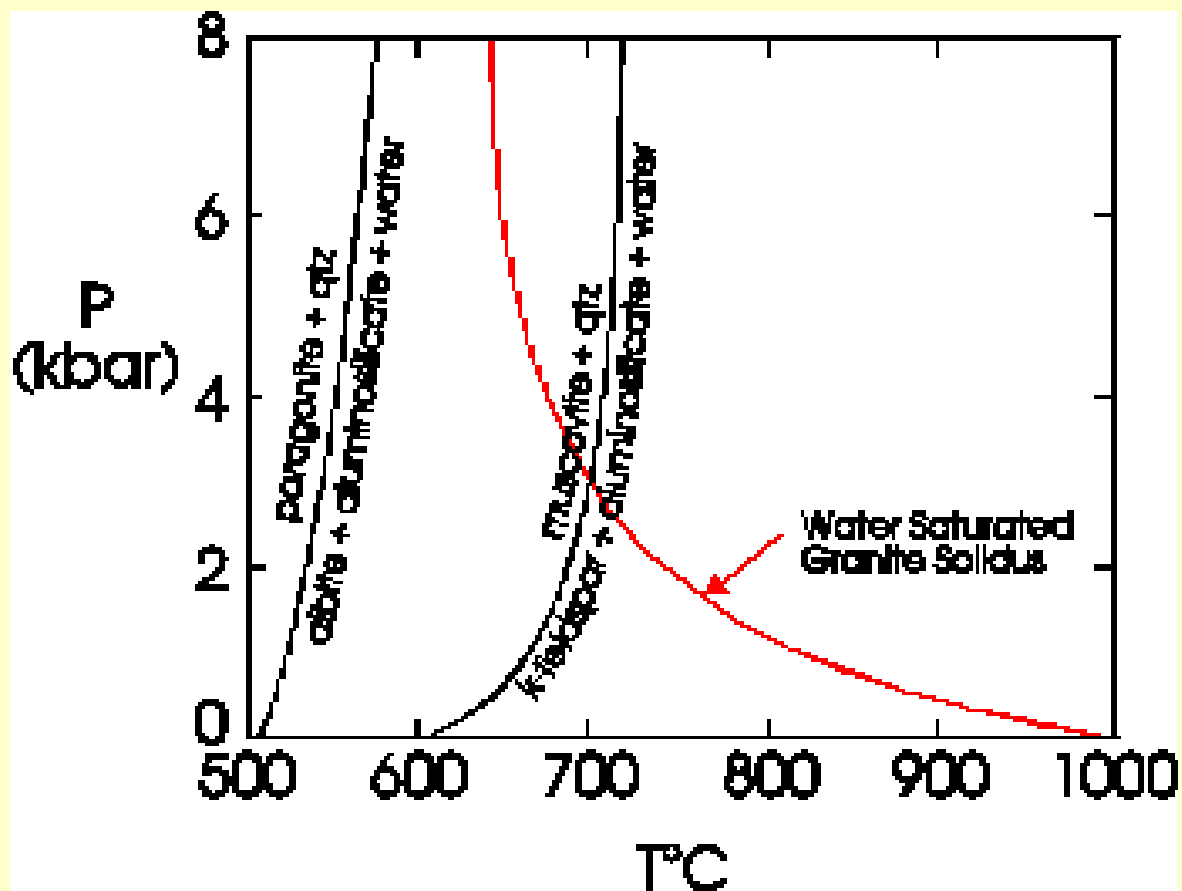
Biotit

- $KMg_3[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$: flogopit
- $KFe_3[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$: annit
- $K[Mg_2Al][Al_2Si_2]O_{10}(OH)_2$: eastonit
- $NaMg_3[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$: Na-flogopit

Muskovit

- $KAl_2[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$: muskovit
- $NaAl_2[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$: paragonit
- $CaAl_2[Al_2Si_2]O_{10}(OH)_2$: margarit
- $K[MgAl][Si_4]O_{10}(OH)_2$: Mg-Al-celadonit
- $K[FeAl][Si_4]O_{10}(OH)_2$: Fe-Al-celadonit

- muskovit a biotit se objevují v metamorfovaných pelitech, psamitech a kyselých magmatických horninách od facie zelených břidlic po facii amfibolitovou (muskovit) a granulitovou (biotit)
- paragonit se někdy vyskytují v nízké a středně metamorfovaných metapelitech nebo metabazitech a stejně jako muskovit je stabilní jen do amfibolitové facie
- biotit je hojný v mesozonálně metamorfovaných horninách, jako jsou pararuly, amfibolity a svory. Vyskytuje se i v některých skarnech a greisenech.



- flogopit je typický pro regionálně i kontaktně metamorfované vápence
- jemnozrný muskovit vzniká hydrotermálně přeměnou silikátů, nejčastěji živců
- pro metamorfní petrologii je důležitá tschermakitová substituce ($MgSiAl_2$) v muskovitech která indikuje růst tlaku (fengit)

Skupina chloritů

- složení lze zjednodušeně vyjádřit obecným vzorcem:
- $(\text{Mg}_{6-x}\text{Al}_x)(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{O})_8$
kde x nabývá hodnot od cca 0,6 do cca 1,6
- Mg^{2+} je často částečně nahrazeno Fe^{2+} případně jiným dvojmocným kationtem,
- Al^{3+} může nahradit Fe^{3+} případně jiný trojmocný kationt.
- V metamorfovaných hornin nízkého až středního stupně (facie zelených břidlic, zejména metabazity a metapelity)
- jsou sekundárními produkty hydratace primárních Mg-Fe silikátů, nejčastěji biotitu, pyroxenů, amfibolů, granátů či skel
- chloritizace může být způsobena:
 - (1) autometamorfózou, tj. působením plynů a roztoků v chladnoucím magmatu na již vykrystalizované minerály; např. spilitizace bazaltů,
 - (2) působením hydrotermálních roztoků



Minerály serpentínové skupiny

- $\text{Mg}_3 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_4$
- **lizardit, antigorit, chryzotil** (*hadcový azbest*)
- **Výskyt:** Všechny tři formy vznikají hydrotermálním rozkladem olivínu a Mg-pyroxenů při přeměně peridotitů, dunitů a pyroxenitů na serpentinity (hadce), méně často obdobnými pochody v mramorech a erlanech.
- **Serpentinizace:** $2 \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 3 \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Mg}(\text{OH})_2$

Skupina mastku – pyrofylitu

- skupina trojvrstvých fylosilikátů, hlavní zástupci:
 - trioktaedrický člen: mastek - $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ trikl.
 - dioktaedrický člen: pyrofylit - $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ mon.

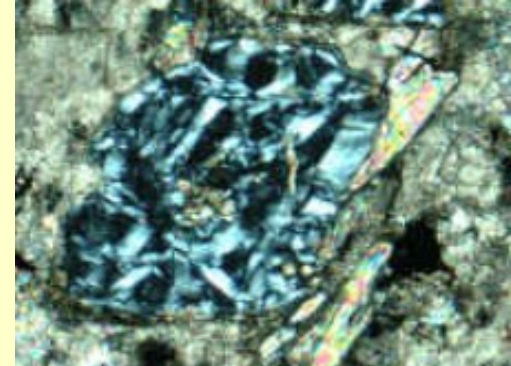
Vznik

Mastek vzniká hydrotermálním přínosem SiO_2 do hornin bohatých Mg:

- (1) přeměnou Mg-silikátů, např. olivínu, enstatitu, chloritu či tremolitu při metamorfóze ultrabazických hornin (krupníky, mastkové břidlice, některé serpentinity),
- (2) metasomaticky působením SiO_2 bohatých roztoků na karbonátové horniny při kontaktní i regionální metamorfóze (dolomitové vápence, dolomity, magnezity).

Pyrofylit vzniká jako produkt alterace živců hliníkem bohatých hornin v kyselém prostředí při teplotě nad 300°C

- (1) při nižších teplotách vzniká ve stejném prostředí kaolinit, v alkalickém prostředí muskovit nebo montmorillonit
- (2) bývá přítomen v nízce metamorfovaných metapelitech



MINERÁLY SKUPINY Al_2SiO_5

- Do skupiny Al_2SiO_5 patří tři minerály které se vyskytují v Al bohatých hornin:

Kyanit:

- trojklonný
- někdy obsahuje malé příměsi Fe.
- vyskytuje se v horninách metamorfovaných za vysokých tlaků

Andalusit

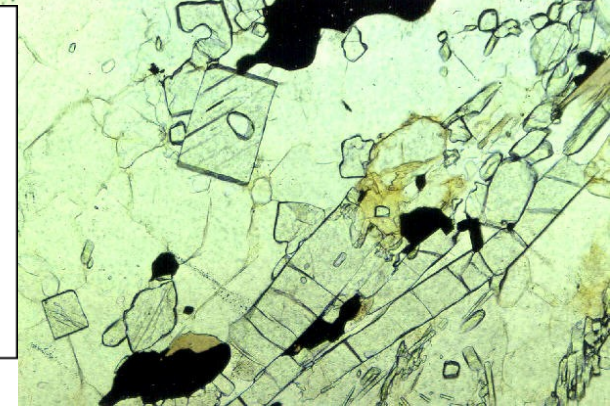
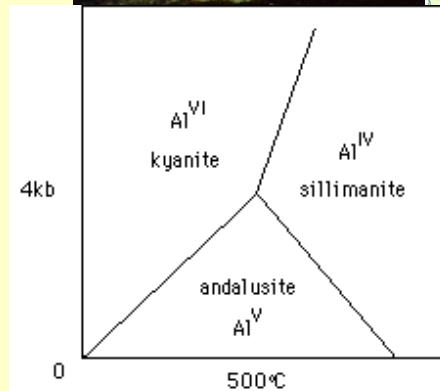
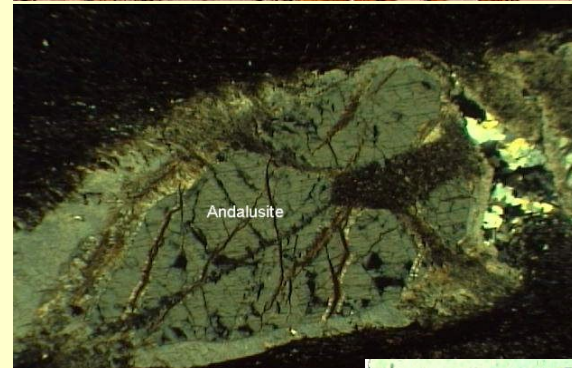
- kosočtverečný
- někdy příměsi Fe, Mg, Mn a alkalických prvků
- vyskytuje se v kontaktních aureolách

Sillimanit

- kosočtverečný
- někdy může obsahovat malé množství Fe a Ti
- vyskytuje se hlavně v Al bohatých metapelitech metamorfovaných v amfibolitové facii

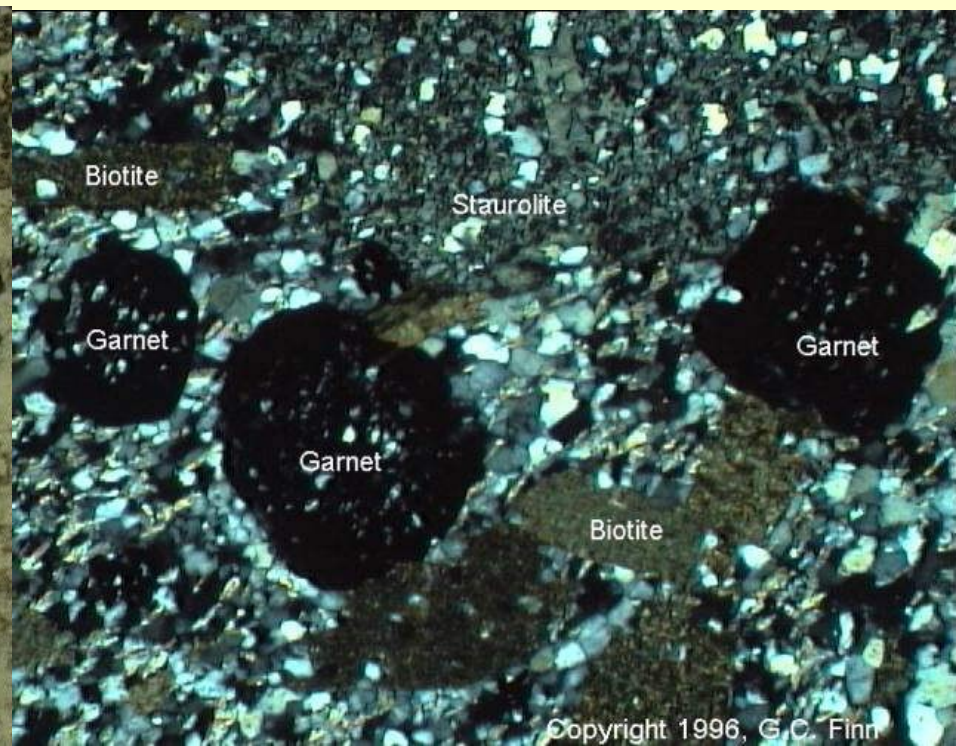
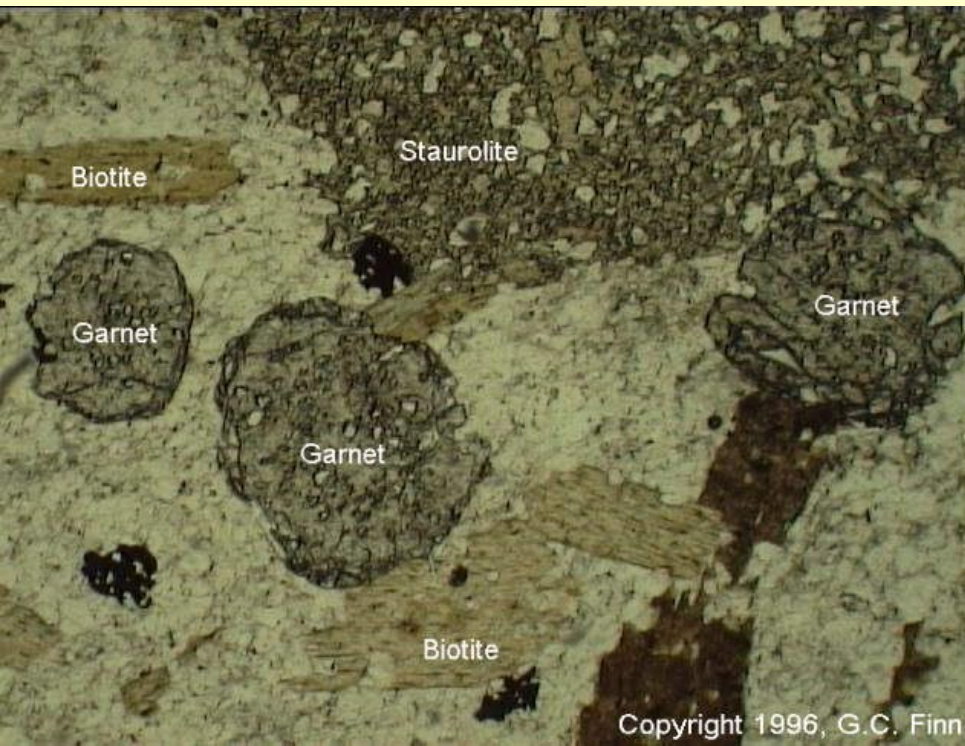
Význam pro petrologii

- indikují PT podmínky vzniku horniny
- ukazují že v hornině je dostatek Al



GRANÁTY

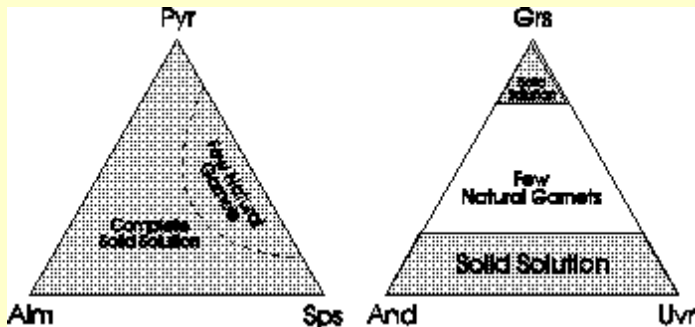
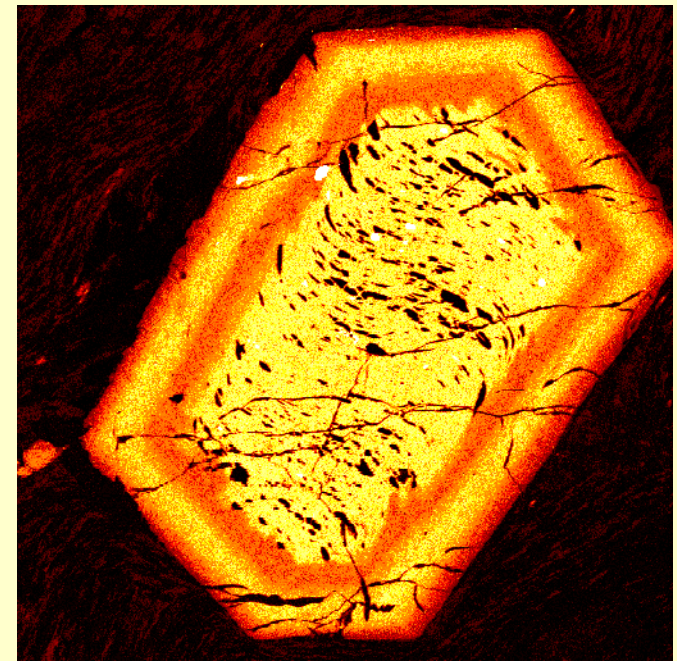
- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_3^{2+}B_2^{3+}[SiO_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, Fe²⁺, Mn, Ca
- Pozici B trojmocné kationty jako Al, Fe³⁺, Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.



GRANÁTY

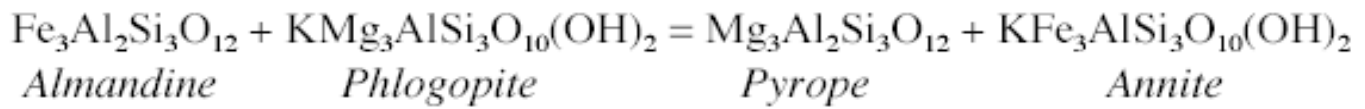
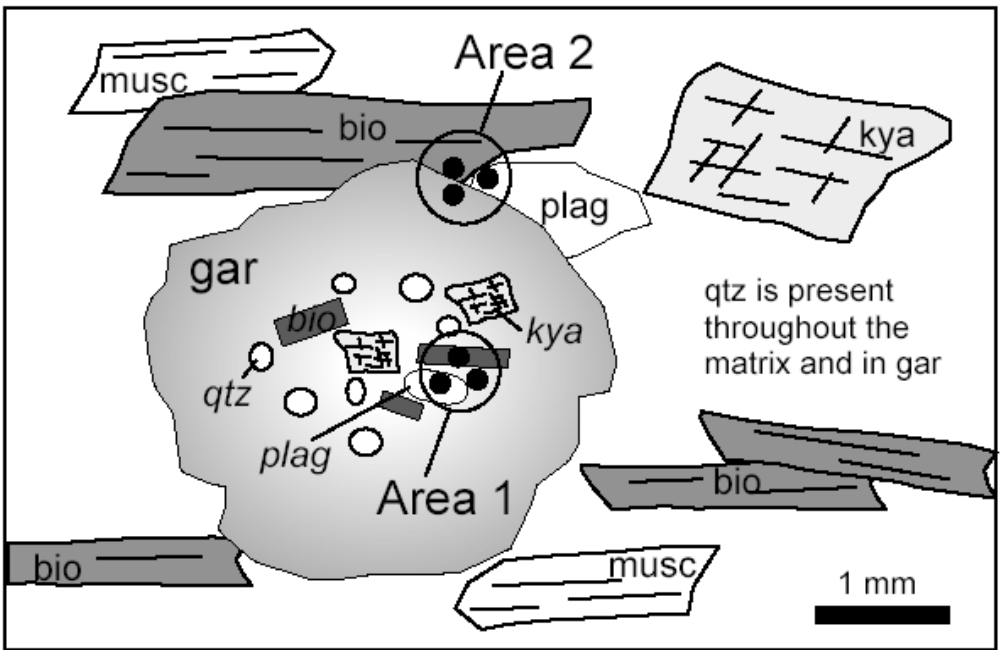
- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_3^{2+}B_2^{3+}[SiO_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, Fe²⁺, Mn, Ca
- Pozici B trojmocné kationty jako Al, Fe³⁺, Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.
- Skupinu granátů tvoří několik krajních členů mezi nimiž je velmi dobrá mísivost.
- Přírodní granáty proto obsahují vždy několik komponent :
- Pyrop $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$
- Almandin $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$
- Spessartin $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$
- Grosulár $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$
- Andradit $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$
- Uvarovit $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$

část pozic křemíku může být vakantní, aby byla zachována valenční rovnováha je v takové případě část atomů kyslíku nahrazena OH- skupinami (Hydrogranáty)



Geothermometry a geobarometry

Granát –biotitový termometr např.
 FERRY & SPEAR (1978)



This distribution is described by the following equation:

$$\ln K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{Gt-Bt}} = -\left(\frac{52,108}{3R}\right)\frac{1}{T} + \frac{19.51}{3R} - P\left(\frac{0.238}{3R}\right)\frac{1}{T}$$

where

$$K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{Gt-Bt}} = \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{Bt}} / X_{\text{Mg}}^{\text{Bt}}}{X_{\text{Fe}}^{\text{Gt}} / X_{\text{Mg}}^{\text{Gt}}} = \frac{(\text{Fe/Mg})^{\text{Bt}}}{(\text{Fe/Mg})^{\text{Gt}}}$$

Use cation values, not oxides!!

Staurolit

- monoklinický
- typický metamorfní minerál (hlavně metapelity)
- $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- Fe^{2+} je v tetraedrické koordinaci a může být nahrazováno Mg^{2+} a Zn^{2+}
- většina staurolitů má je bohatá Fe: $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,86 - 0,55$
- $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,09$ to $0,28$

Reakce produkující staurolit:

- chloritoid + křemen = staurolit + granát
- chloritoid + chlorit + muskovit = staurolit + biotit + křemen + voda
- dehydratační reakce 400-500 °C

Reakce konzumující staurolit:

- staurolit + muskovit + křemen = almandin + Al_2O_3 + biotit + voda
- okolo 700 °C
- Mg staurolit je stabilní do vyšších teplot než Fe staurolit



Chloritoid

- $(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
- metapelity
- chloritoid bohatý železem a někdy také Mn je běžný v nížce metamorfovaných metapelitech (fylity)
- **Vznik chloritoidu** (~ 400 °C): Fe-chlorit + pyrofylit = Fe-chloritoid + křemen + H_2O
- **Reakce konzumující chloritoid** (~ 500 °C): chloritoid + biotit = granát + chlorit,
- Fe-chloritoid = Fe-staurolit + almandin + H_2O a chloritoid = granát + chlorit + staurolit + H_2O

Cordierit

- $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$
- rombický, pseudohexagonální
- štěpný podle $\{100\}$, odlučný podle $\{001\}$
- snadno mění v jemně šupinaté šedé nebo zelenošedé agregáty muskovitu, biotitu nebo chloritu – pinit
- vyskytuje se v metamorfitech bohatých Al: v kontaktních rohovcích, plodových břidlicích, v LP/HT regionálně metamorfovaných horninách (ruly, migmatity), v metasedimentech bohatých na ortoamfiboly (cordierit-antofylitické skaliny)

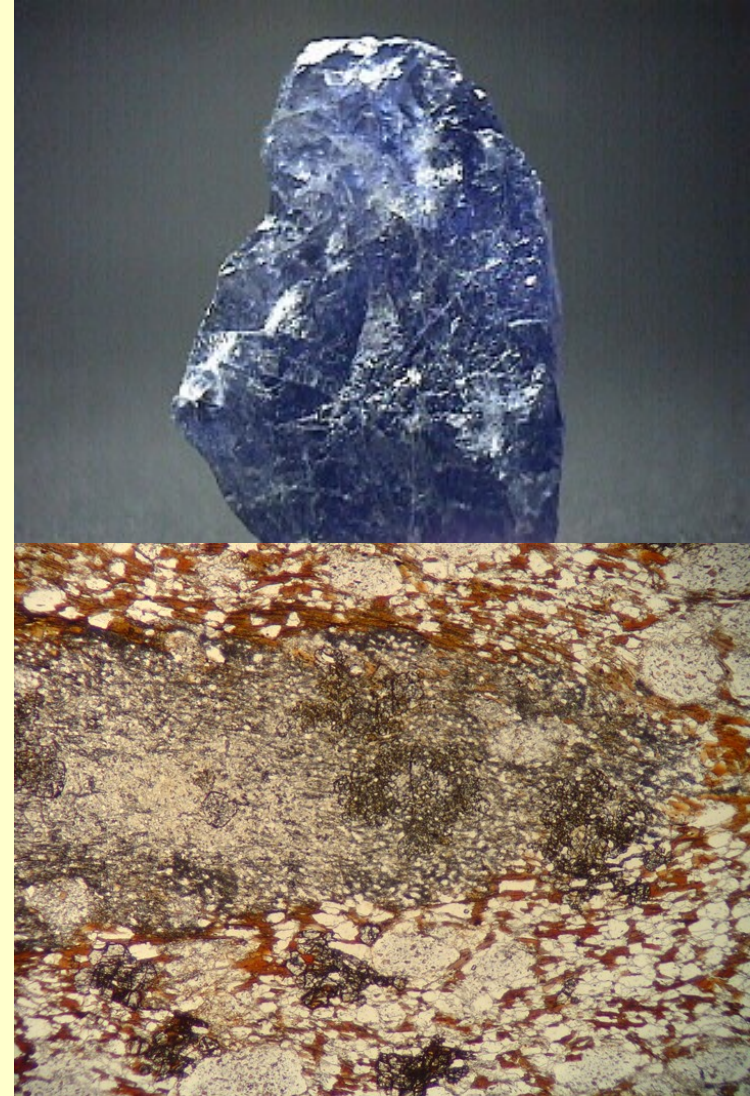
Metapelity (LP/HT)

Vznik cordieritu

KMASH: flogopit + sillimanit = Mg-cordierit + muskovit

KMASH: flogopit + muskovit = Mg-cordierit + K-živec + H_2O

KFMASH: biotit + sillimanit = granát + cordierit + H_2O

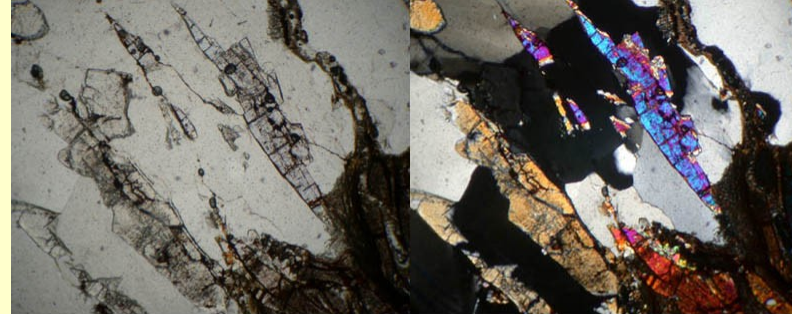
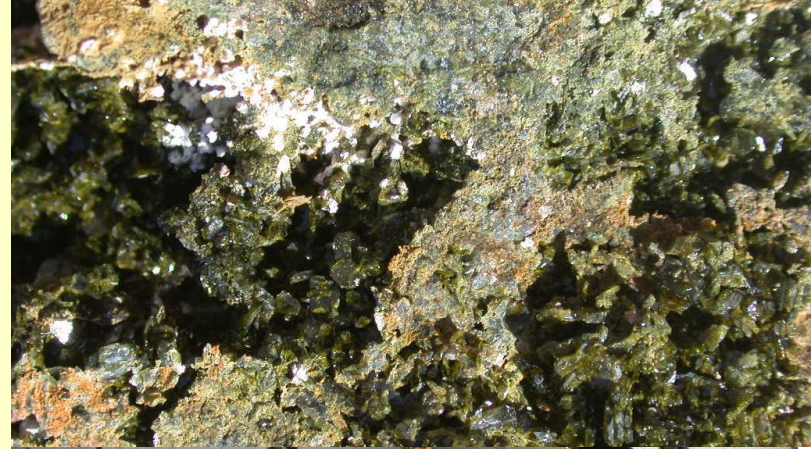


- **Skupina epidotu**
- Sorosilikáty
- monoklinické
- **epidot:** $\text{Ca}_2(\text{FeAl})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$
- **klinozoisit:** $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$
- kosočtverečný
- **zoisit:** $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$
- Výskyt: metabazity, karbonátové horniny

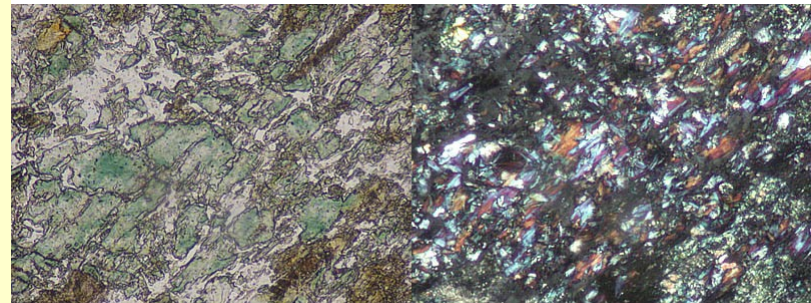
- **Lawsonit**
- Sorosilikát
- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$
- Výskyt: metabazity

- **Pumpellit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})(\text{Al, Fe})_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$
- Výskyt: metabazity

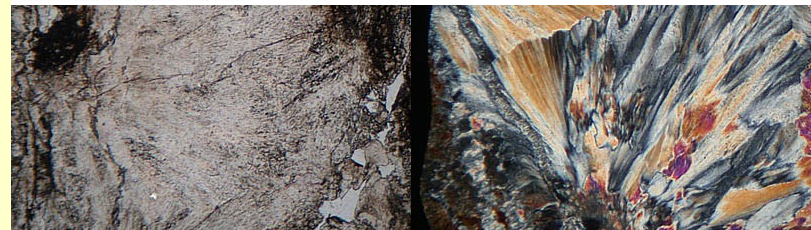
- **Prehnit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Výskyt: metabazity



Lawsonite porphyroblasts in a quartz vein; left: plane polarized light; right: crossed polars. Note the prismatic spindle shape of the crystals, and the birefringence (weaker than that of epidote).



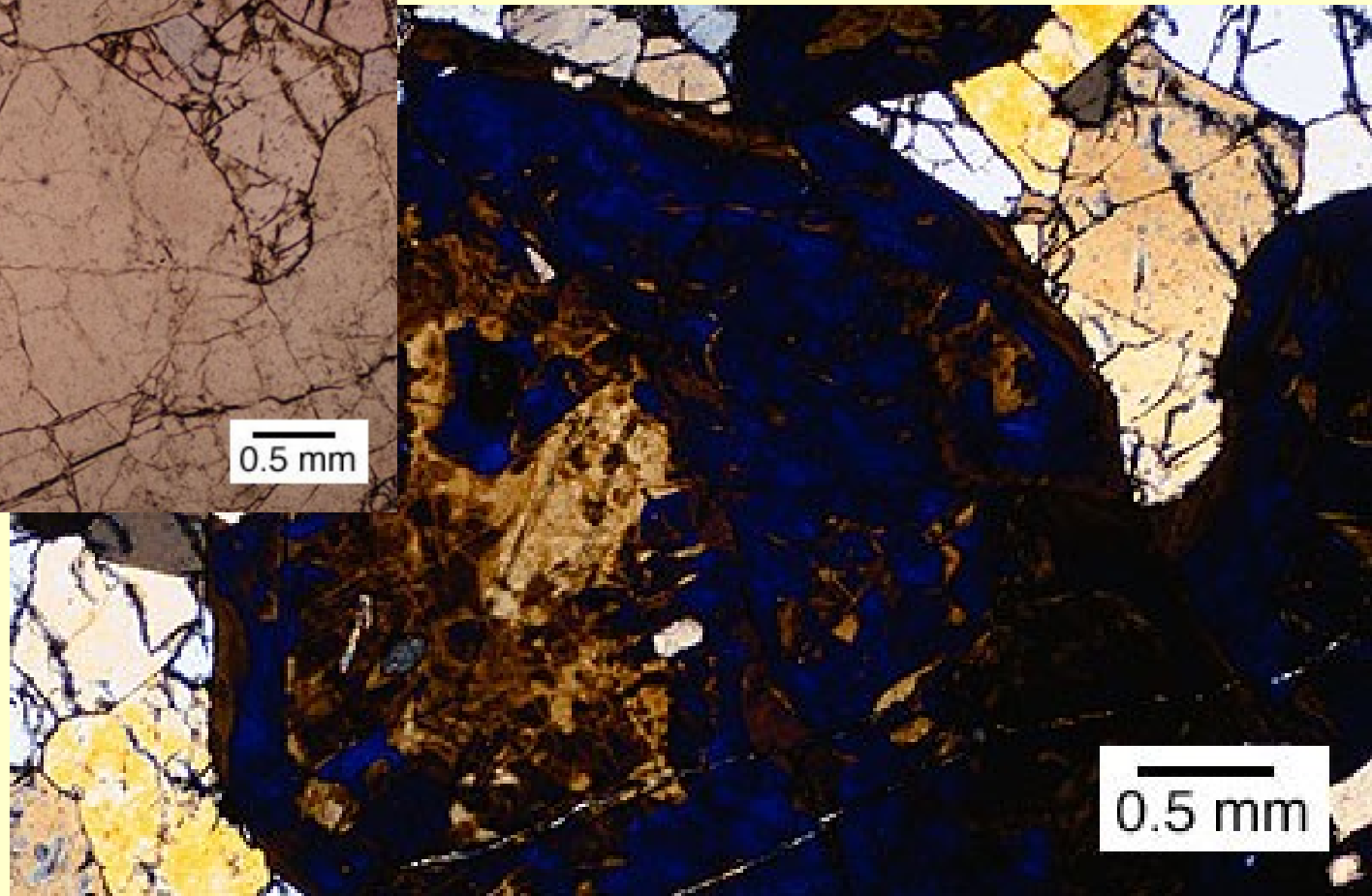
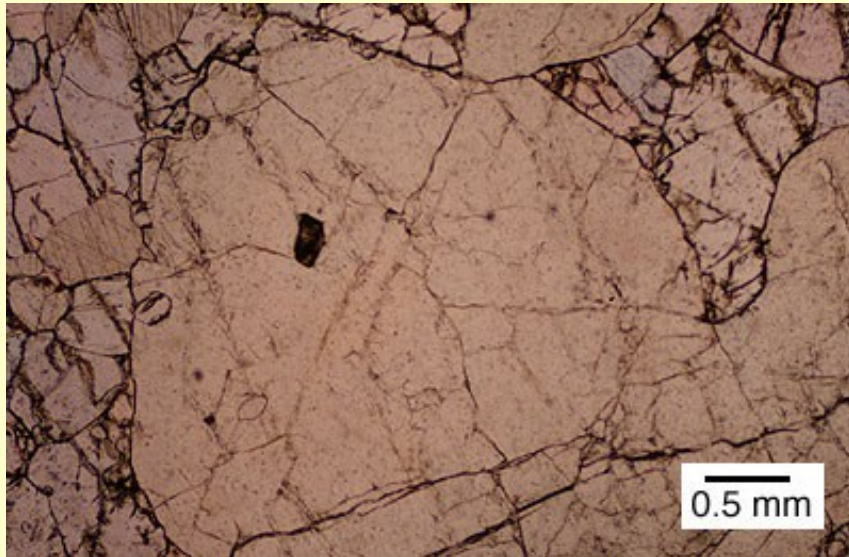
Pumpellyite crystals (green with anomalous interference colors) partially replacing a plagioclase phenocryst in a metabasalt.



Prehnite crystals in a vein. Note their moderate birefringence.

Vesuvian

- $\text{Ca}_{10}(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_4$
- Vzniká nejčastěji v erlanech na kontaktech intruzivních kyselých hornin s karbonáty, spolu s grossulárem, diopsidem a wollastonitem.



Olivín

- Hlavně v mafických a ultramafických horninách
- Fayalit v metamorfovaných železných rudách a v některých alkalických granitoidech
- Forsterit ve metamorfovaných dolomitech

Monticellit CaMgSiO_4

Ca → M2 (velký ion)

ve vysoce metamorfovaných karbonátech s příměsí silikátů.

M_2TO_4

6-fold Octahedral (O_6) Sites 4-fold Tetrahedral Site (T_4)

M_2	T	NAME	Cation	r (Å)
Mg Mg	Si	Forsterite	Mg^{2+}	0.72
Fe Fe	↓	Fayalite	Fe^{2+}	0.78
Mn Mn		Tephroite		
Ca Mg		Monticellite	Mn^{2+}	0.83
Ca Fe		Kirschsteinite		
Ca Mn		Glaucochroite	Ca^{2+}	1.00

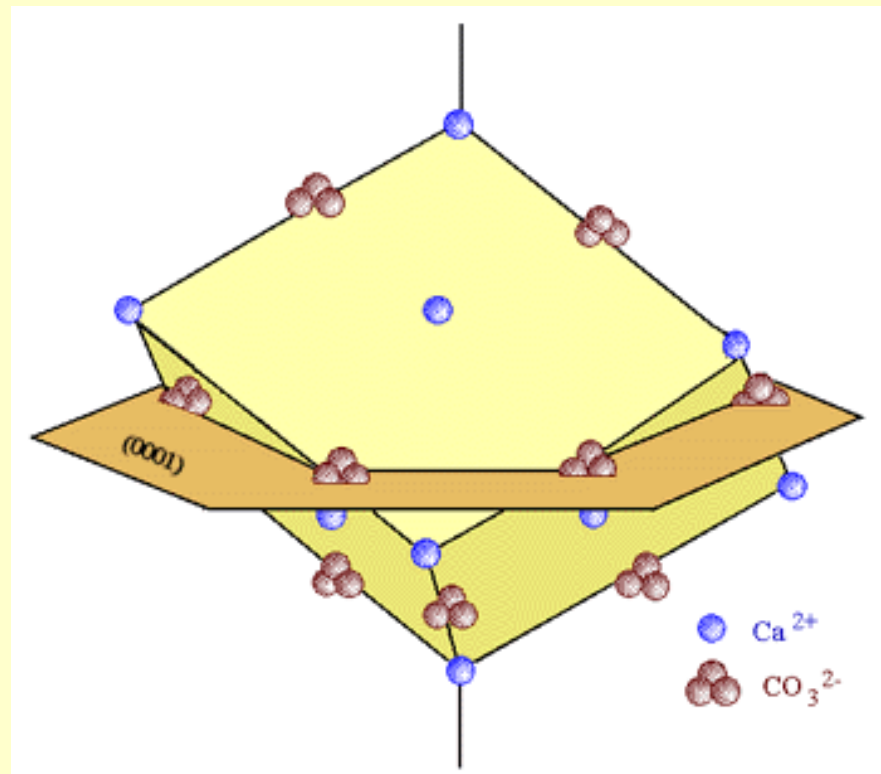
UHLIČITANY

- **KALCIT** CaCO_3 , trigonální
- Obsahuje jen malé množství příměsí jako je Mg, Fe, Mn méně často též Zn, Ba, Sr, Pb.
- Štěpnost dokonalá podle klence $(10\bar{1}1)$.
- Některé odrůdy svítí v UV světle.
- **MAGNEZIT** MgCO_3 , trigonální
- Vždy obsahuje něco příměsí Mn, Ca či Fe.
- Vytváří samostatnou horninu. Nebo může být přítomen v dolomitických mramorech.

DOLOMIT $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, trigonální

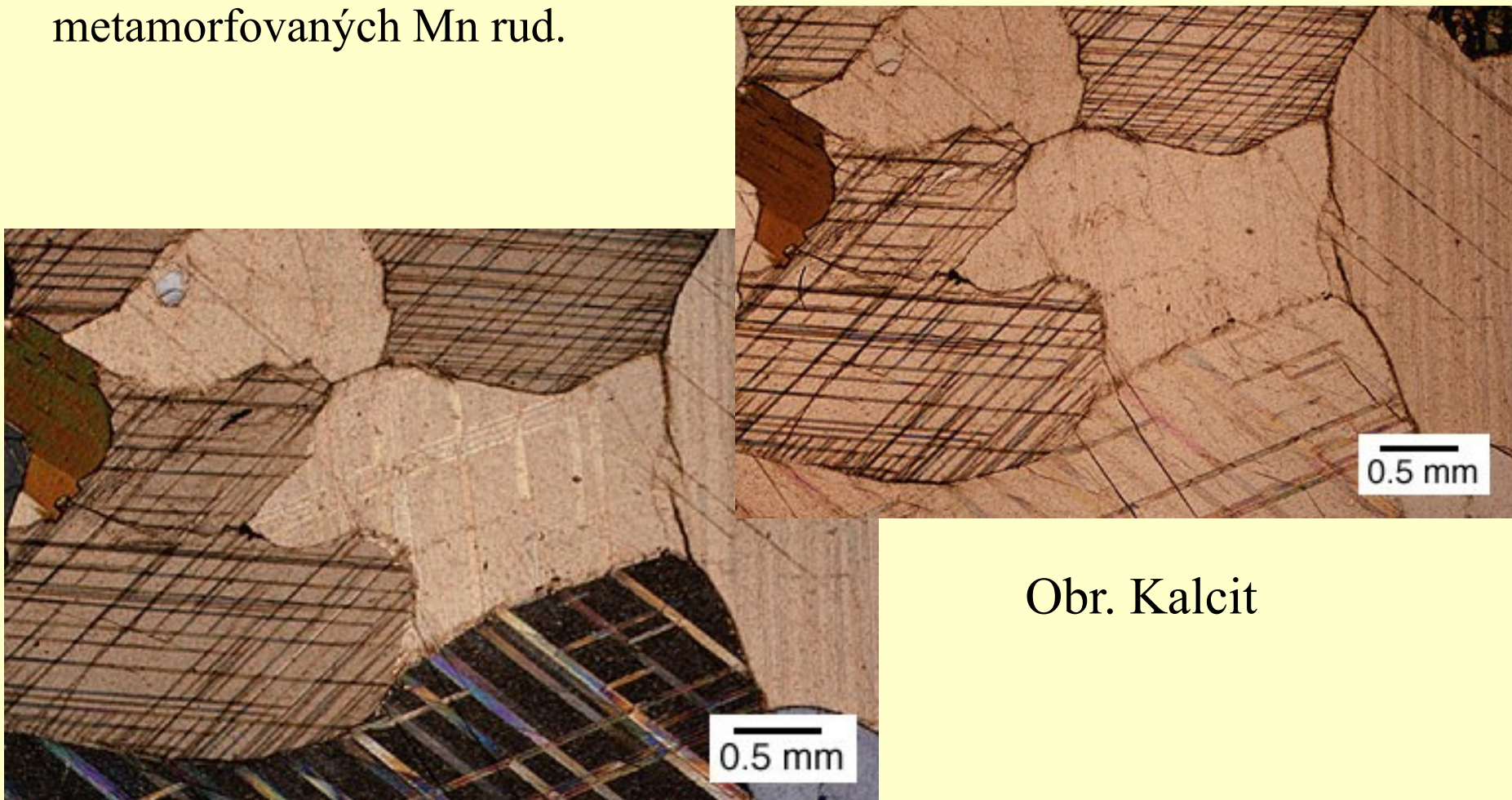
Chemicky je to podvojný uhličitán ve kterém se poměr mezi atomi Ca a Mg pohybuje kolem hodnoty 1:1.

Jako příměsí jsou časté Mn, Fe ve stopách pak Ba, Zn, Sr



Obr. Struktura kalcitu

- **SIDERIT** FeCO_3 trigonální
- Část Fe může být zastoupena Mn nebo Ca či Mg.
- **ANKERIT** $\text{Ca Fe}(\text{CO}_3)_2$ trigonální
- **RODOCHROZIT** MnCO_3 trigonální
- Vždy má určitou příměs Fe a často též Ca, Mg nebo Zn. Je součástí metamorfovaných Mn rud.



Obr. Kalcit

Akcesorické minerály

A) Oxidy

1) Skupina spinelidů

- Skupina krychlových minerálů.
- Struktura: atomy kyslíku v krychlovém uspořádání s tetraedrickými a oktaedrickými mezerami obsazovanými atomy kovů (Fe, Mg, Mn, Zn, Al, Cr).
- Obecný vzorec AB_2O_4 , kde A představuje dvojmocný a B trojmocný nebo čtyřmocný kov.
- Ve skupině spinelidů existuje mezi některými částečná nebo téměř úplná nebo mísivost.
- Právě struktura spinelidů ovlivňuje některé fyzikální vlastnosti které jsou typické pro celou tuto skupinu:
 - 1) Optická izotropie.
 - 2) Špatná nebo chybějící štěpnost.
 - 3) Chemická a tepelná stálost.
 - 4) Vysoká tvrdost.

- **Spinel $MgAl_2O_4$** : vyskytuje se hlavně v dolomitických vápencích (spolu s diopsidem a forsteritem).
- **Magnetit $FeFe_2O_4$** : Může obsahovat řadu příměsí (Mg, Ti, Mn, Cr, V). Za vyšších teplot může magnetit pojmou vyšší obsahy Ti, jehož přebytek se pak při snížení teploty odmísí jako lamely ilmenitu. Vyskytuje se ve skarnech a ultramafických horninách.
- **Chromit (Fe, Mg) Cr_2O_4** : Vyskytuje se především v ultrabazických horninách.
- **Hercinit $FeAl_2O_4$** : Vyskytuje se jako akcesorie v bazických horninách a v železem bohatých metasedimentech.
- **Ulvöspinel $TiFe_2O_4$**
- **Gahnit $ZnAl_2O_4$**
- **Franklinit $ZnFe_2O_5$**
- **Galaxit $MnAl_2O_4$**
- Využití: magnetit-ilmenitový termometr

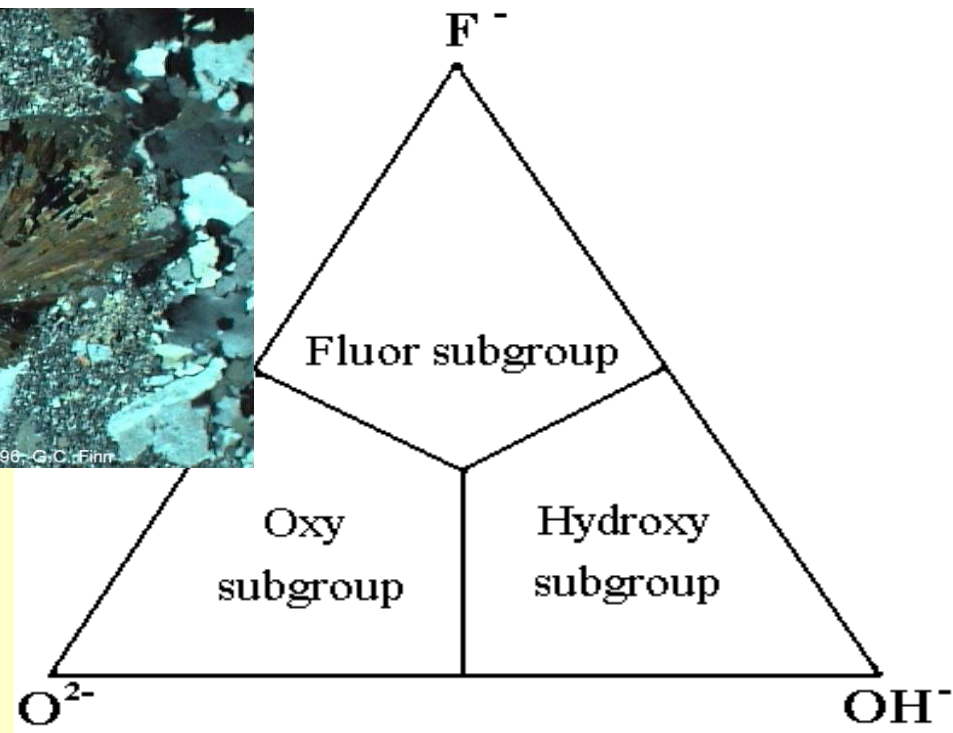
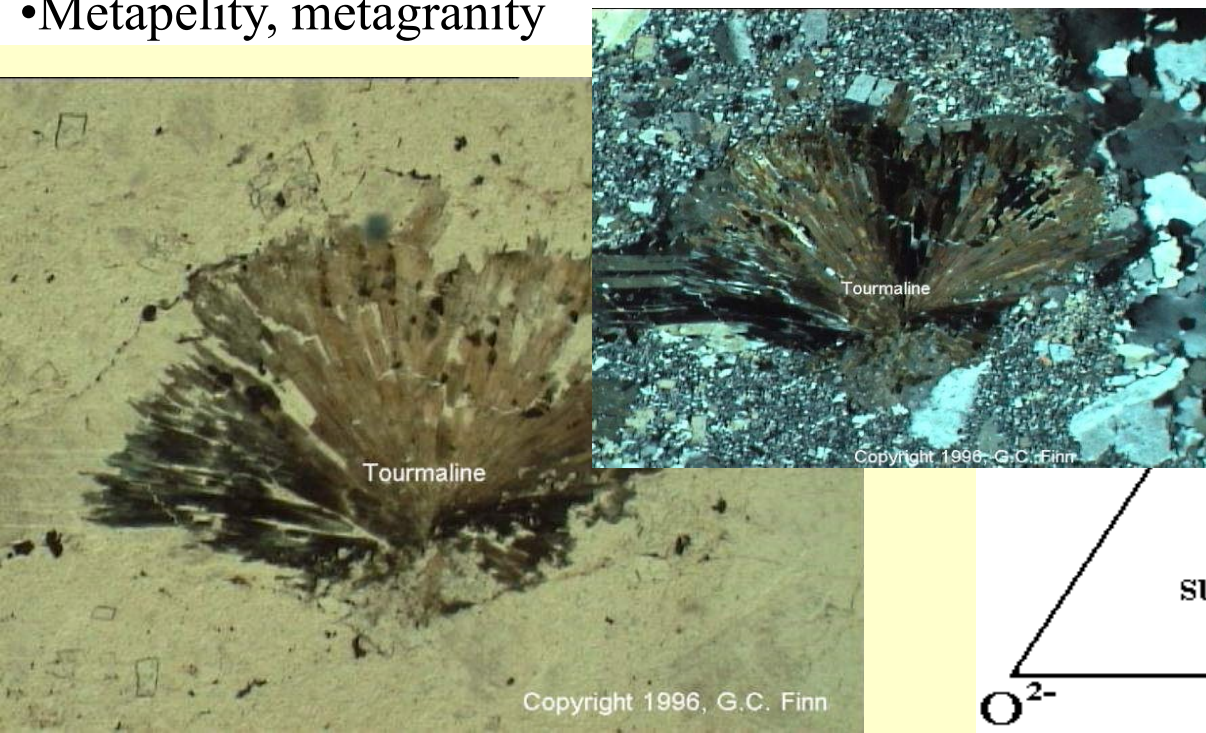
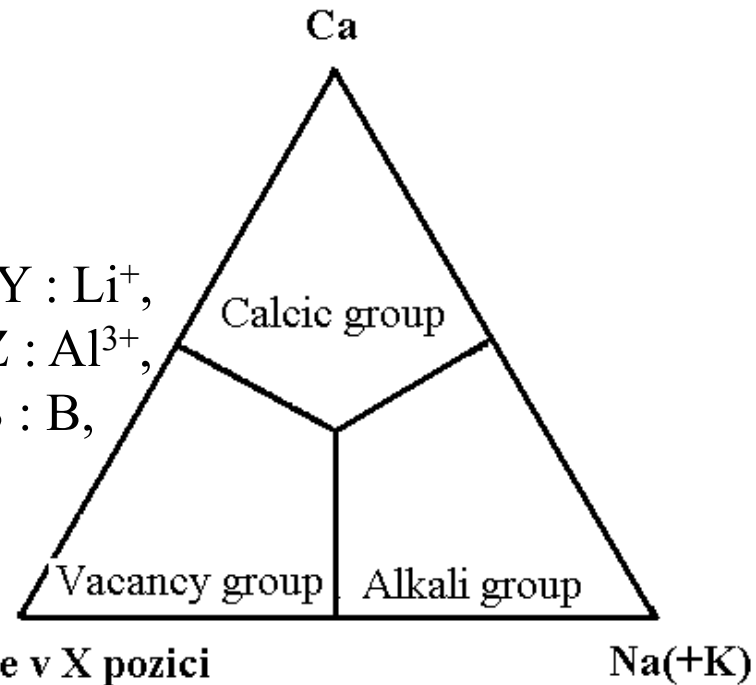
Skupina korundu

- Hexagonální minerály s podobnou strukturou
- **Korund Al_2O_3** - akcesorie v Al bohatých metamorfitech
- **Hematit Fe_2O_3** - součást metamorfovaných Fe-rud a jako akcesorie v bazických horninách
- **Ilmenit $FeTiO_3$** - akcesorie hlavně v bazických horninách a metapelitech. Fe je často částečně zastupováno Mg, Mn

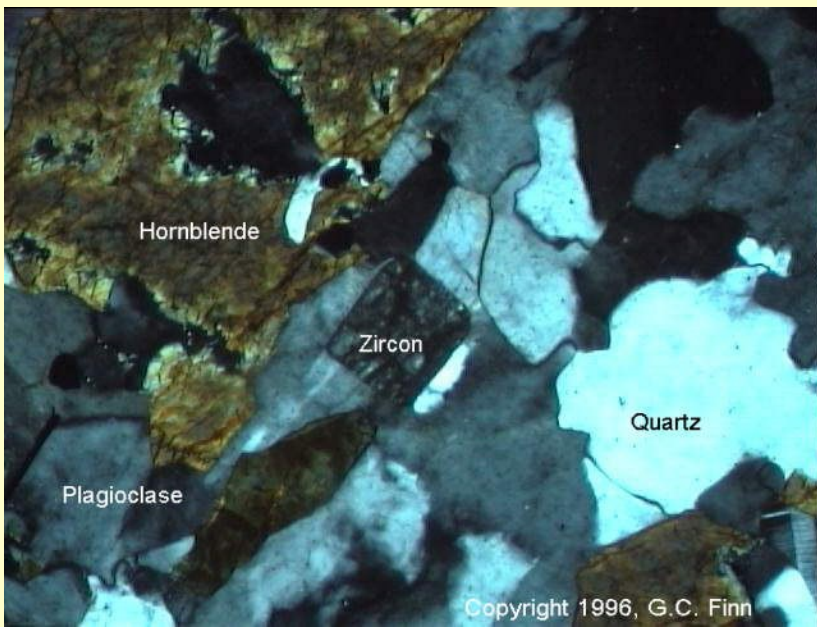
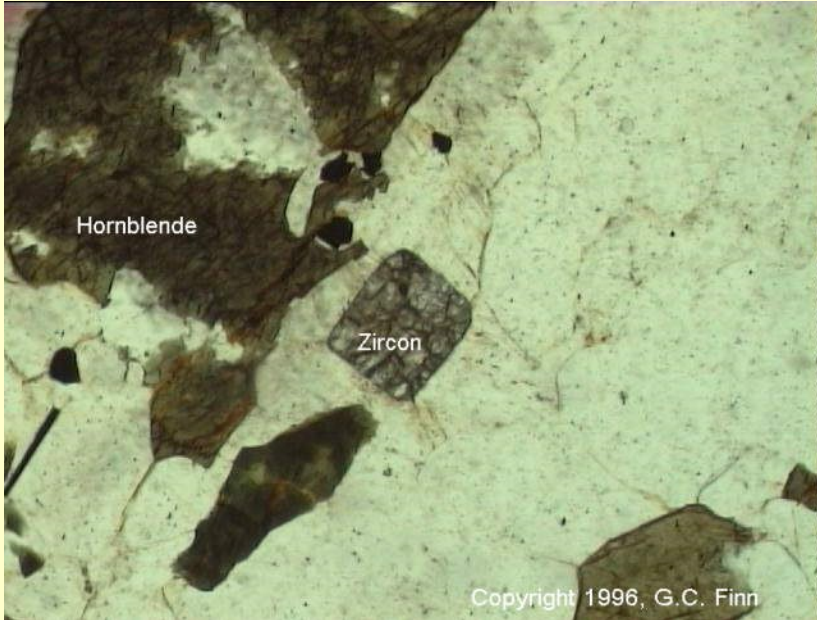
B) SILIKÁTY

Skupina turmalínu

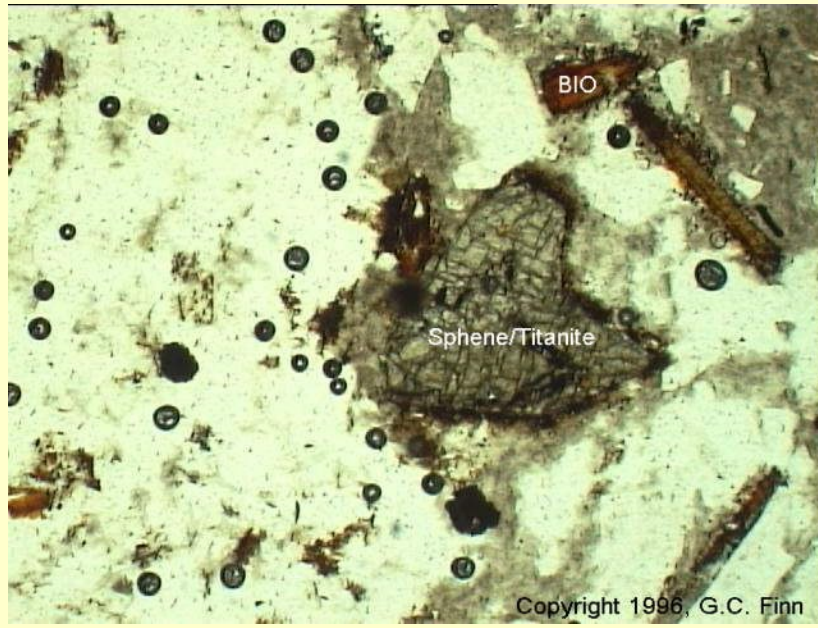
- Chemický vzorec $X Y_3 Z_6 [T_6 O_{18}] [BO_3]_3 V_3 W$
- pozice X může být obsazena: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} ; pozice Y : Li^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Ti^{4+} ; pozice Z : Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , V^{3+} , Cr^{3+} ; pozice T : Si, Al, (B); pozice B : B, (\square); pozice V : OH, O; pozice W: OH, F, O
- Soustava: trigonální
- Cyklosilikáty s šestičetným kruhem
- Metapelity, metagranity



• Zirkon $Zr(SiO_4)$

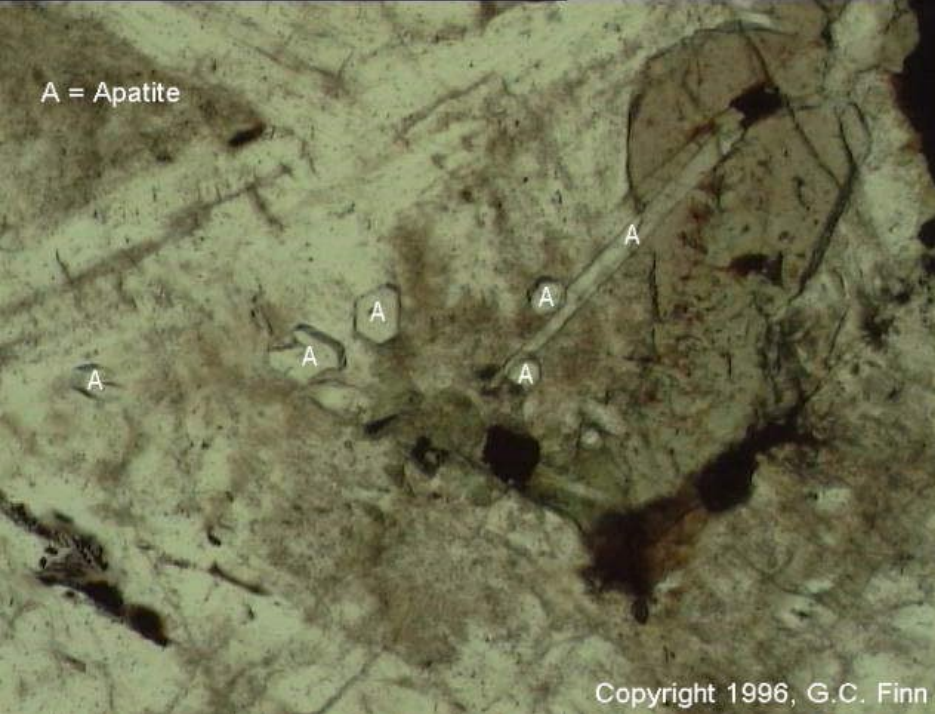


Titanit $CaTi(O/SiO_4)$

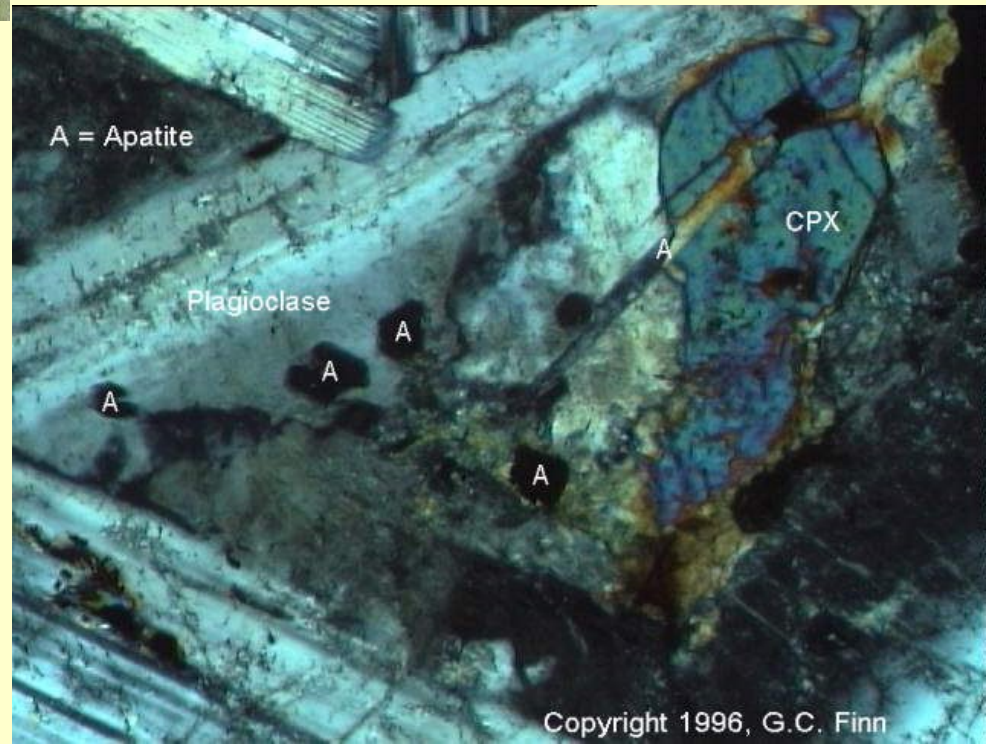


C) Fosfáty

- Apatit
- hexagonální
- $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$

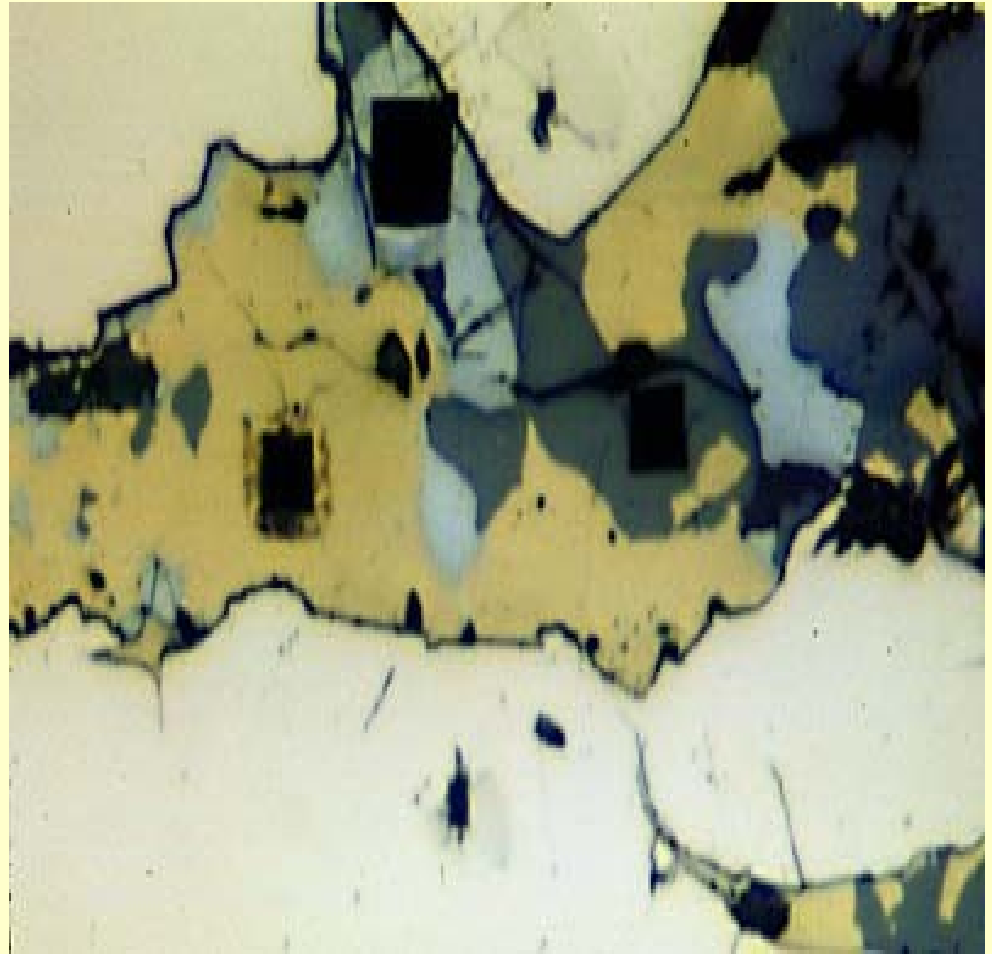


Monazit, xenotim



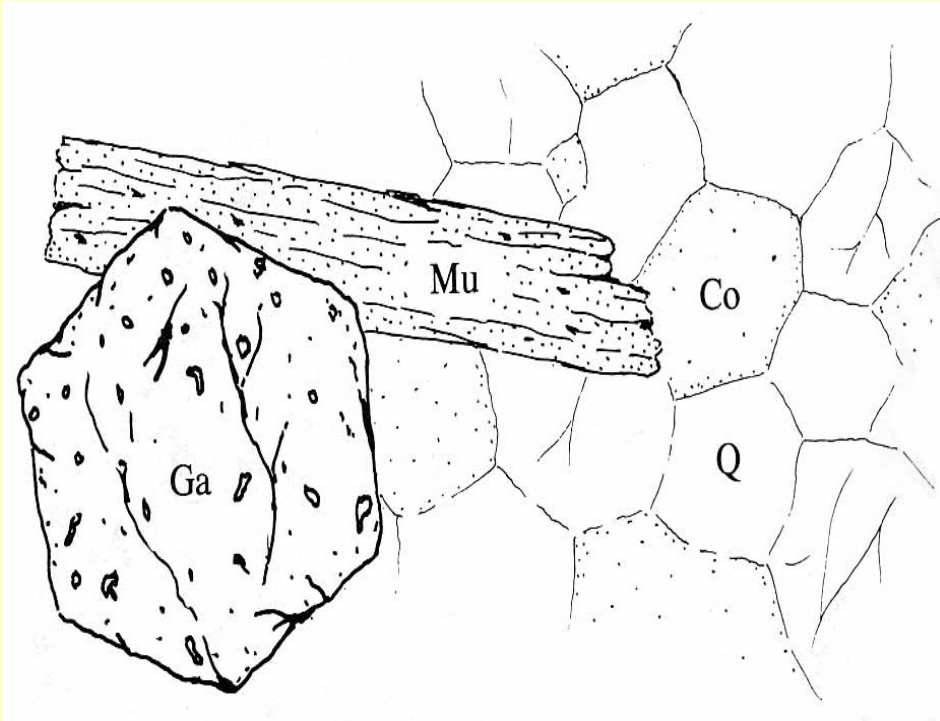
D) Sulfidy

- **Pyrrhotin** FeS
- **Pyrit** FeS_2
- **Pentlandit** $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$
- **Chalkopyrit** CuFeS_2



Pyrit , chalkopyrite, sfalerite a galenit

Krystalizační síla



- *Automorfně omezené*
 - titanit, rutil, pyrit, spinel
 - granát, sillimanit, staurolit, turmalín
 - epidot, magnetit, ilmenit
 - andalusit, pyroxen, amfibol
 - slída, chlorit, dolomit, kyanit
 - kalcit, vesuvian, skapolit
 - živec, křemen, cordierit
- *Xenomorfně omezené*

- Podle zvyšujícího metamorfního stupně rostou v hornině (indexový) minerály:
- chlorit – biotit – granát – staurolit – kyanit – sillimanit (střednětlaká met.)
- posloupnost minerálů pro nízkotlakou metamorfózu: biotit – cordierit – andalusit – sillimanit

Literatura

- Dudek, A. - Fediuk F. - Palivcová M. (1962): Petrografické tabulky
- Hejtman, B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin
- Konopásek, J. – Štípská P. – Klápková H. – Schulmann K. (1998): Metamorfní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfní petrologii