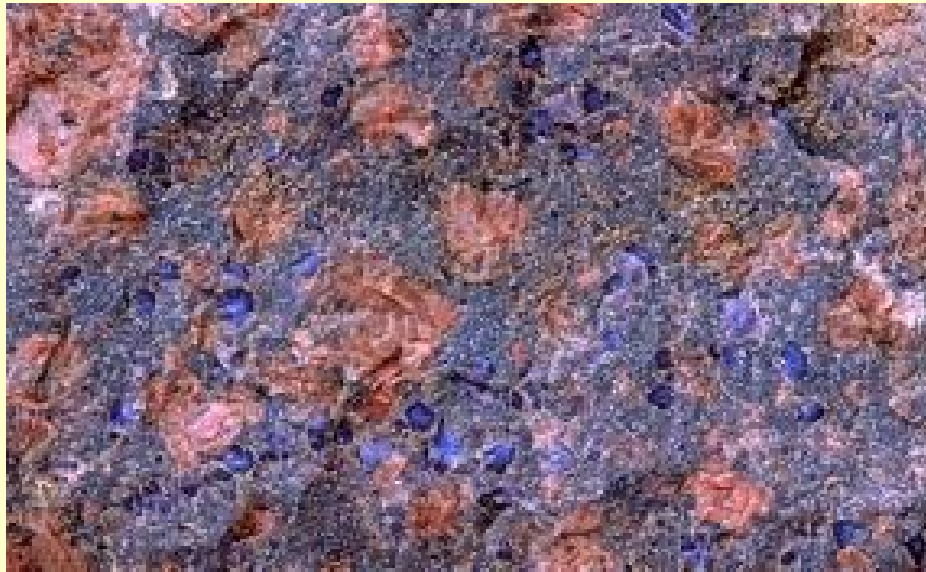


# Petrologie G3021

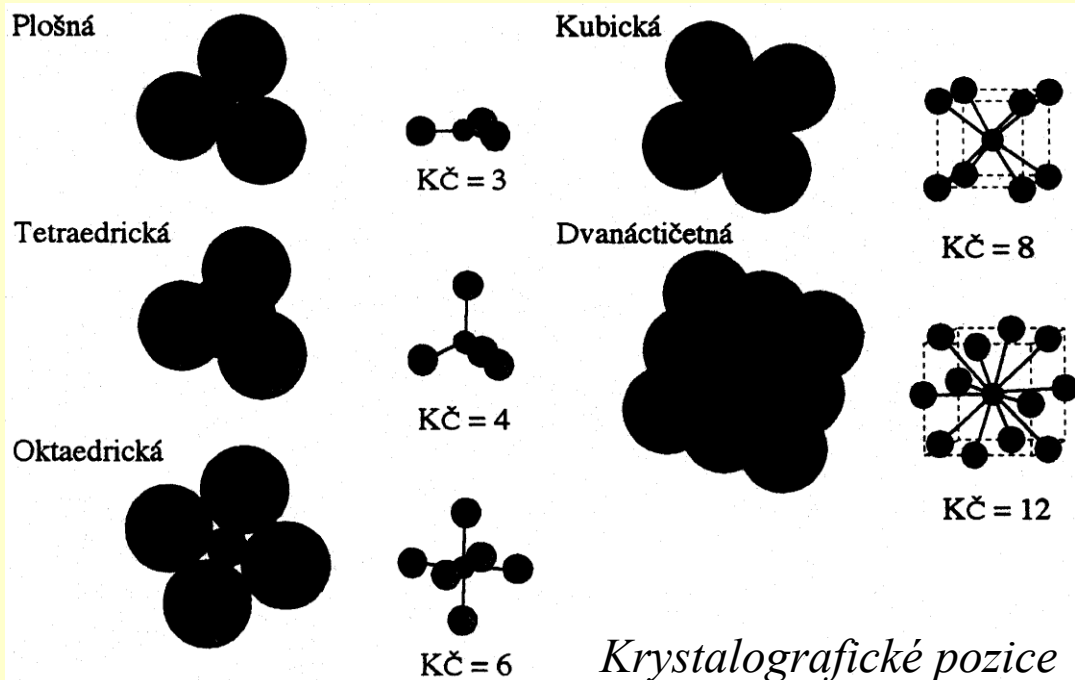
## 3. Minerály metamorfovaných hornin a termobarometrie



# 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*



*Krystalografické pozice*

$\text{Fe}^{2+}\text{Mg}_{.1}$ (olivín, pyroxeny, amfiboly, AFM minerály)	$\text{Fe}^{3+}\text{Al}_{.1}$ (oxidy, epidot, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ )
$\text{Fe}^{2+}\text{Mn}_{.1}$ (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)

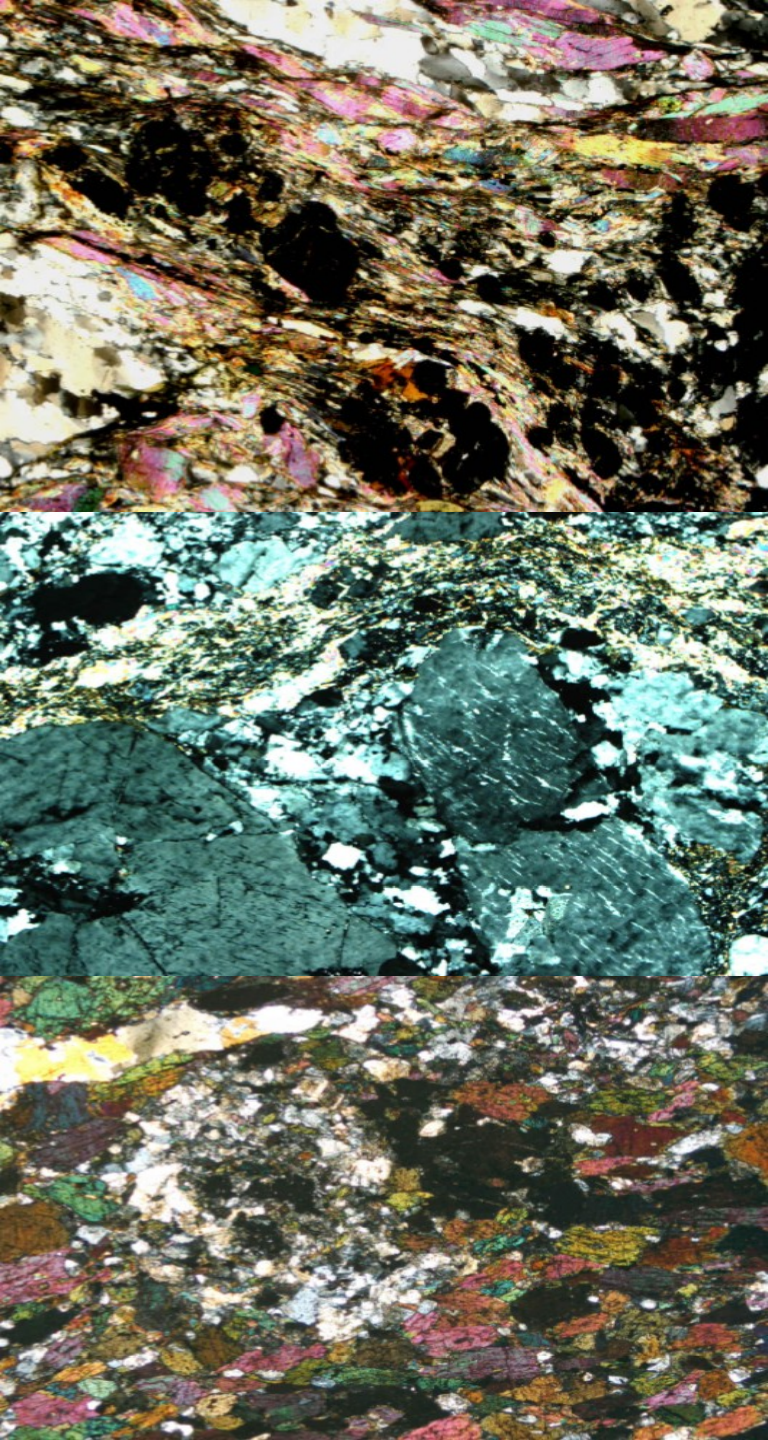
<b>min.</b>	<b>koncové členy</b>	<b>substituční vektory</b>
olivín	forsterit $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ $\longleftrightarrow$ fayalit $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	$\text{Fe}^{2+} \longleftrightarrow \text{Mg}^{2+}$
plag.	albit $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\longleftrightarrow$ anorthit $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$\text{Na}^+ \text{Si}^{4+} \longleftrightarrow \text{Ca}^{2+} \text{Al}^{3+}$
amf.	tremolit $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ $\longleftrightarrow$ tschermakit $\text{Ca}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)(\text{Al}_2\text{Si}_6)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	$^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+} \text{IV}\text{Si}^{4+} \longleftrightarrow ^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} \text{IV}\text{Al}^{3+}$ (tschermakitová substituce)
slídy	muskovit $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ $\longleftrightarrow$ phengit $\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	$^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} \text{IV}\text{Al}^{3+} \longleftrightarrow ^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+} \text{IV}\text{Si}^{4+}$

## 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	Hl	halite	Lue	lueshite
Bor	boralsilite	Drv	dravite	Ham	hambergite	Mgh	maghemite

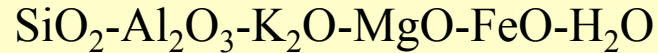
Mkt	magnesiokatophorite	→	Opx	orthopyroxene*		Rdn	rhodonite	→	Tlc	talc
Mrb	magnesioriebeckite		Osm	osumilite	→	Rt	rutile		Tap	tapiolite
Mgs	magnesite		Pg	paragonite		Sa	sanidine		Tep	tephroite
Mgt	magnetite		Prg	pargasite		Spr	sapphirine		Thm	thomsonite
Mcl	manganocolumbite		Pct	pectolite		Sar	sarcopside	→	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  $\text{SiO}_2$
- 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)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$
- 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)
-



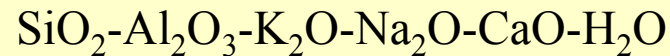
## Minerály metapelitů a ortorul

**Metapelity** (fylit, svor, rula)



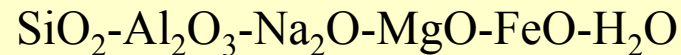
**Minerály:** křemen, plagioklas, muskovit, (draselný živec), biotit,  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , chloritoid, chlorit, staurolit, cordierit, granát.

**Křemen-živcové horniny** (ortoruly)



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

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



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

# Minerály hornin bohatých na Ca a Mg

**Vápenatosilikátové horniny**      SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-H<sub>2</sub>O

**Metakarbonáty**      MgO-CaO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

**Křemité dolomity**      MgO-CaO-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

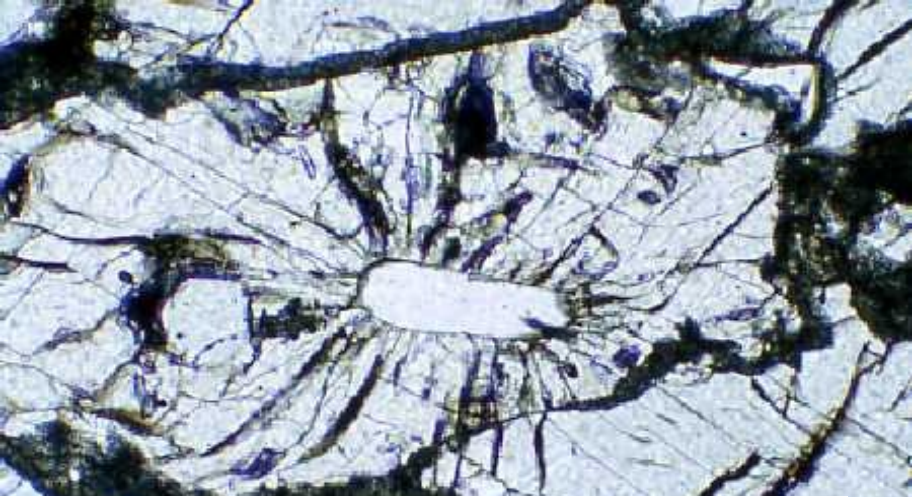
**Ultramafity**      SiO<sub>2</sub>-MgO-CaO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

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

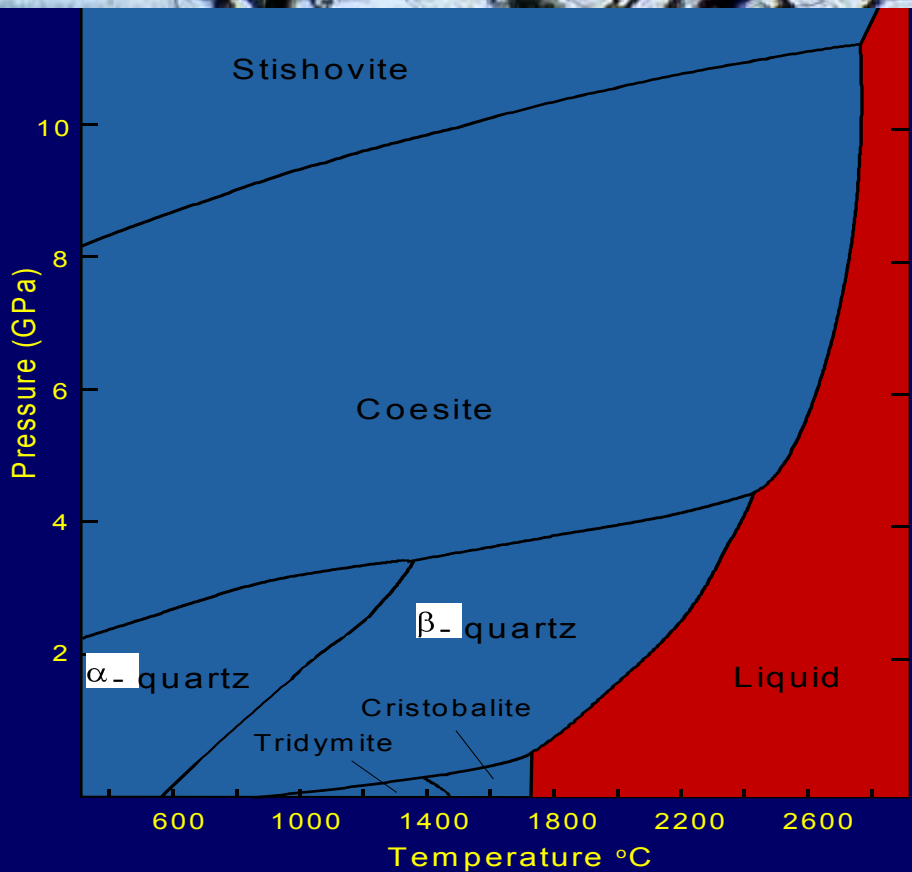
**ultramafity** – serpentinit, mastková břidlice, chloritická břidlice

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



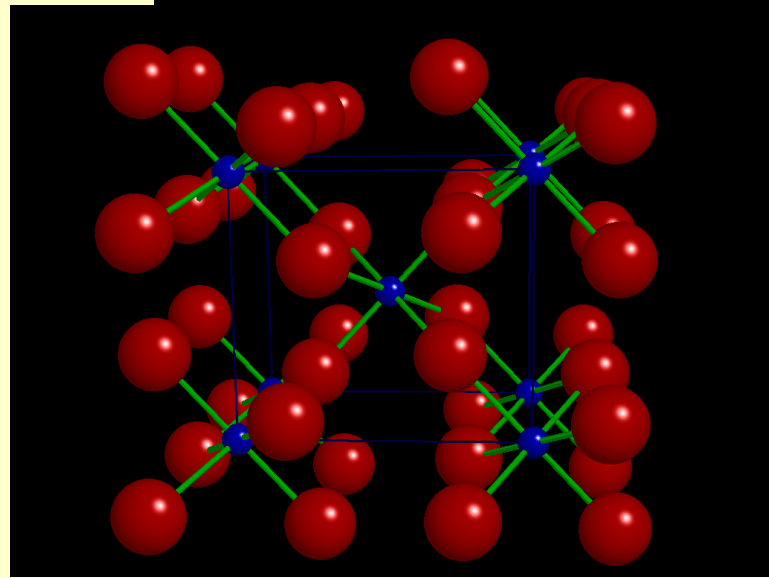
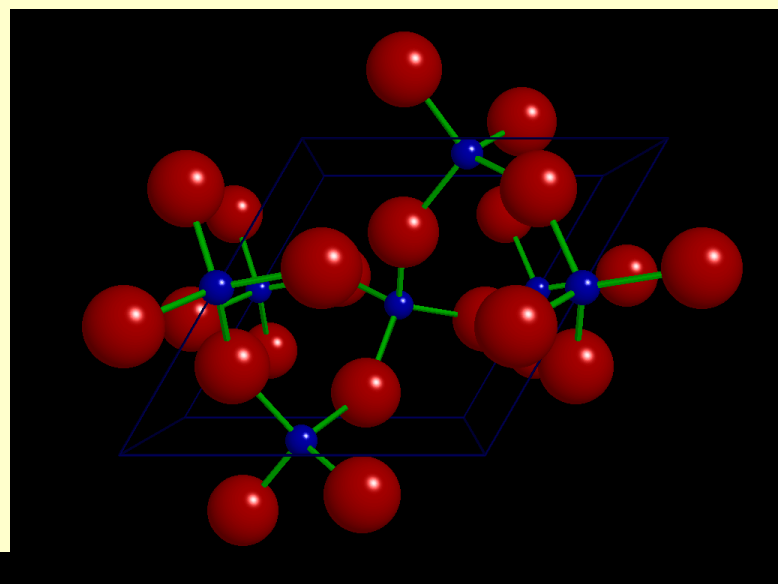


Uzavřenina coesitu v granátu - eklogit



# Křemen ( $\text{SiO}_2$ )

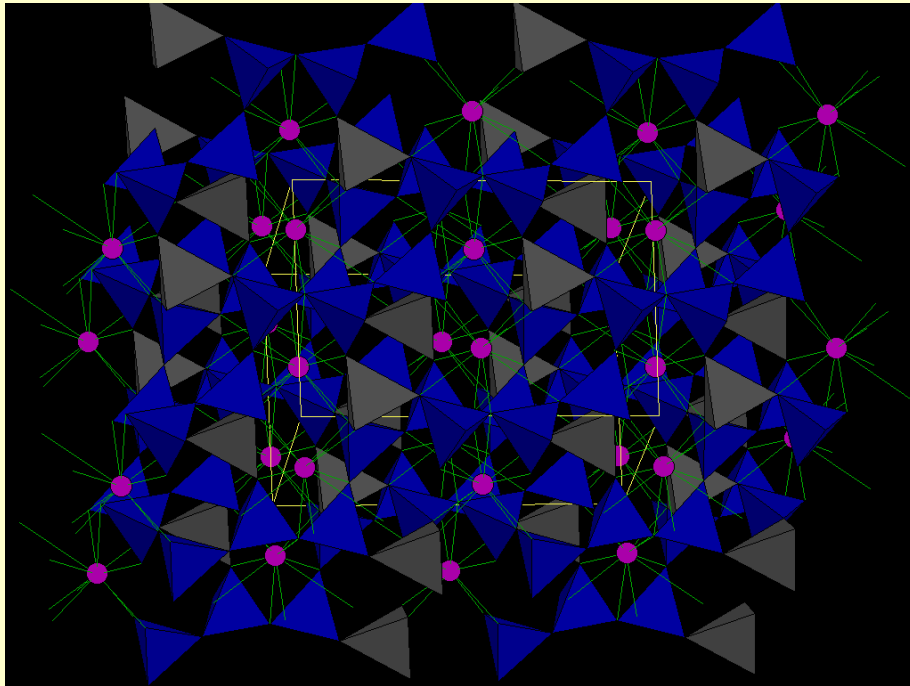
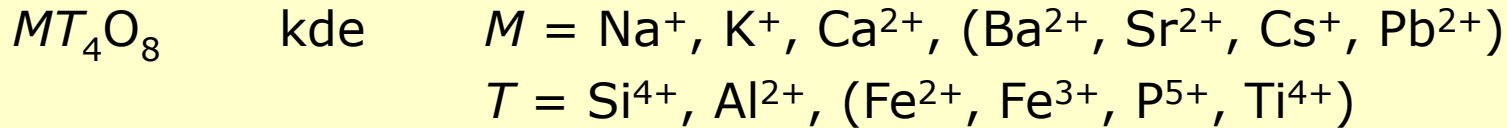
Nižší křemen  $\text{Si}^{\text{IV}}$



Stishovit  $\text{Si}^{\text{VI}}$

# Živce

- horninotvorné minerály tvořící podstatnou část zemské kůry
- jsou to bezvodé tektoalumosilikáty s obecným vzorcem:

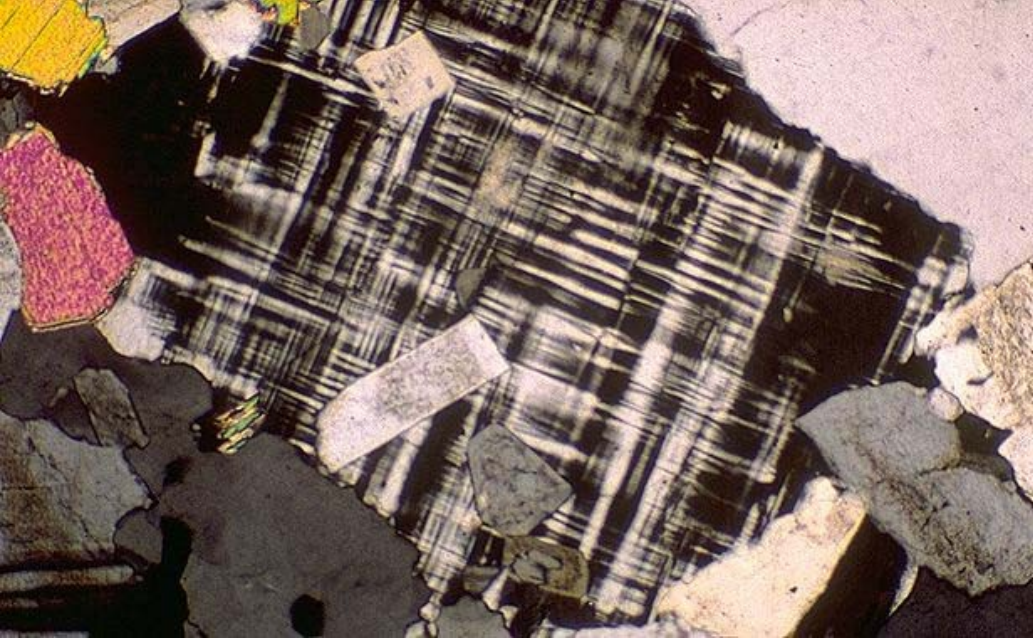


Albit:  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

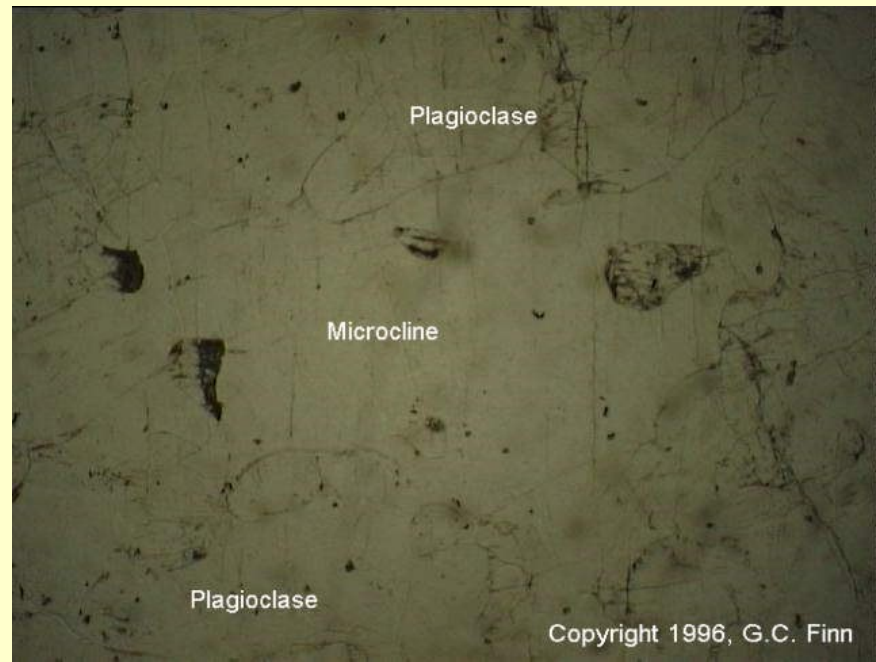
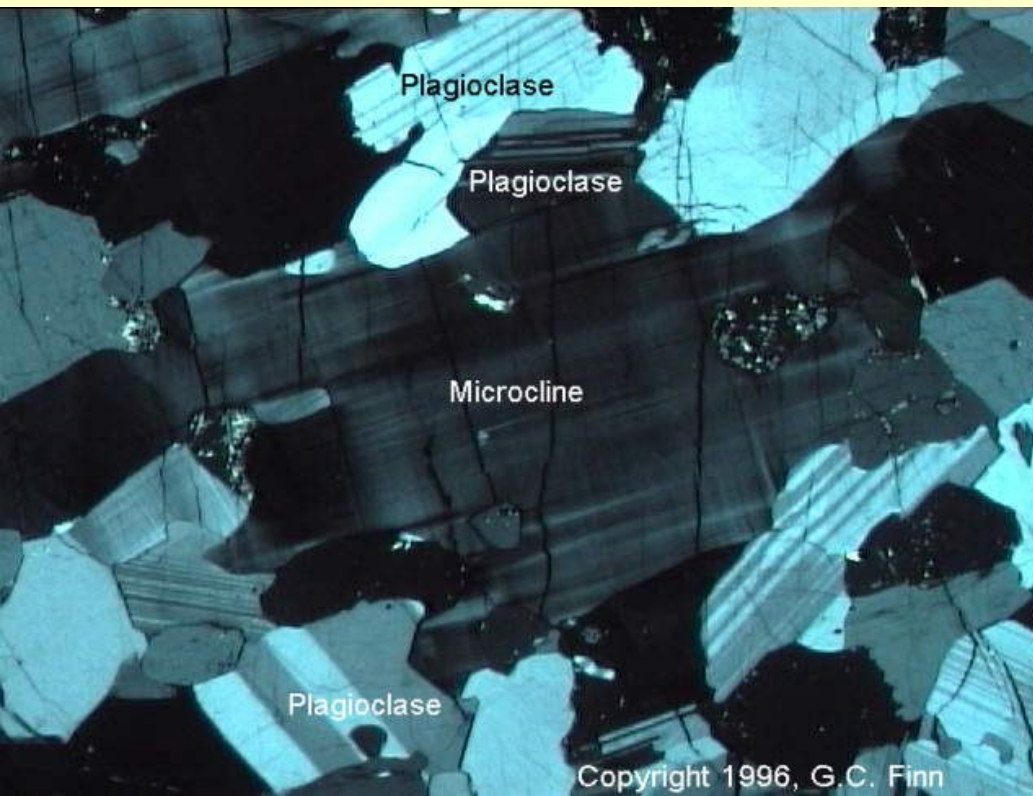
Jestliže  $\text{Al}^{3+}$  zastupuje jedno  $\text{Si}^{4+}$   
umožňuje struktura obsazení  $\text{Na}^+$  nebo  $\text{K}^+$

Pokud jsou ve struktuře nahrazovány dva  
 $\text{Si}^{4+}$  za  $\text{Al}^{3+}$  obsazuje pozici  $\text{Ca}^{2+}$

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



- **Albit** -  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
- **Anortit** -  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
- **Sanidin**  $(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$
- **Draselný živec** -  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$   
(*ortoklas, mikroclin a albit do 5% An*)
- Kromě Na, Ca a K mohu živce obsahovat Ba, Sr, Rb.



### alkalické živce

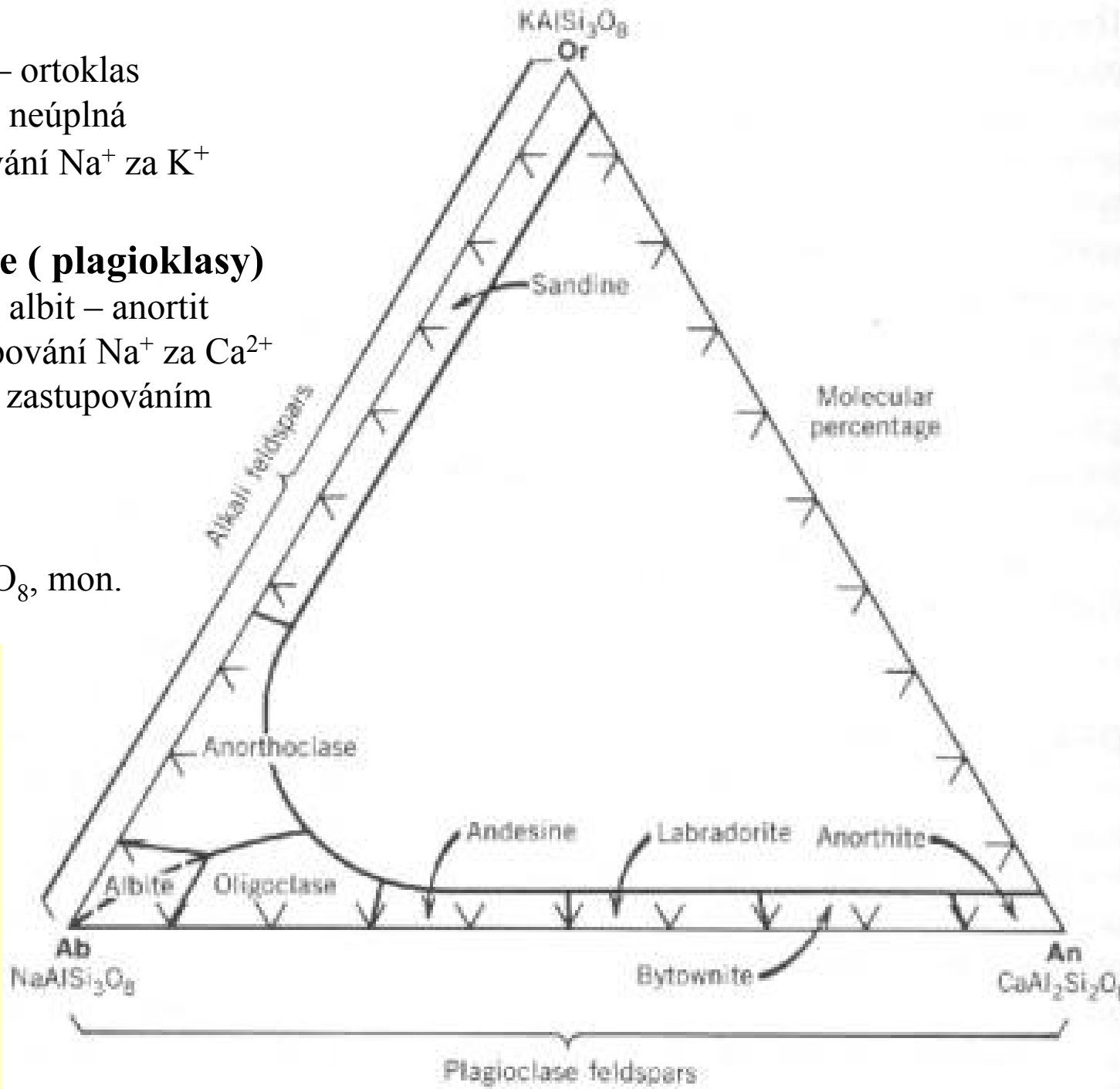
- izomorfní řada albit – ortoklas
- za povrchové teploty neúplná
- izovalentní zastupování  $\text{Na}^+$  za  $\text{K}^+$

### sodnovápenaté živce ( plagioklasy)

- úplná izomorfní řada albit – anortit
  - heterovalentní zastupování  $\text{Na}^+$  za  $\text{Ca}^{2+}$
- valence se kompenzují zastupováním  $\text{Si}^{4+}$  za  $\text{Al}^{3+}$

### barnaté živce

např. celsian  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , mon.

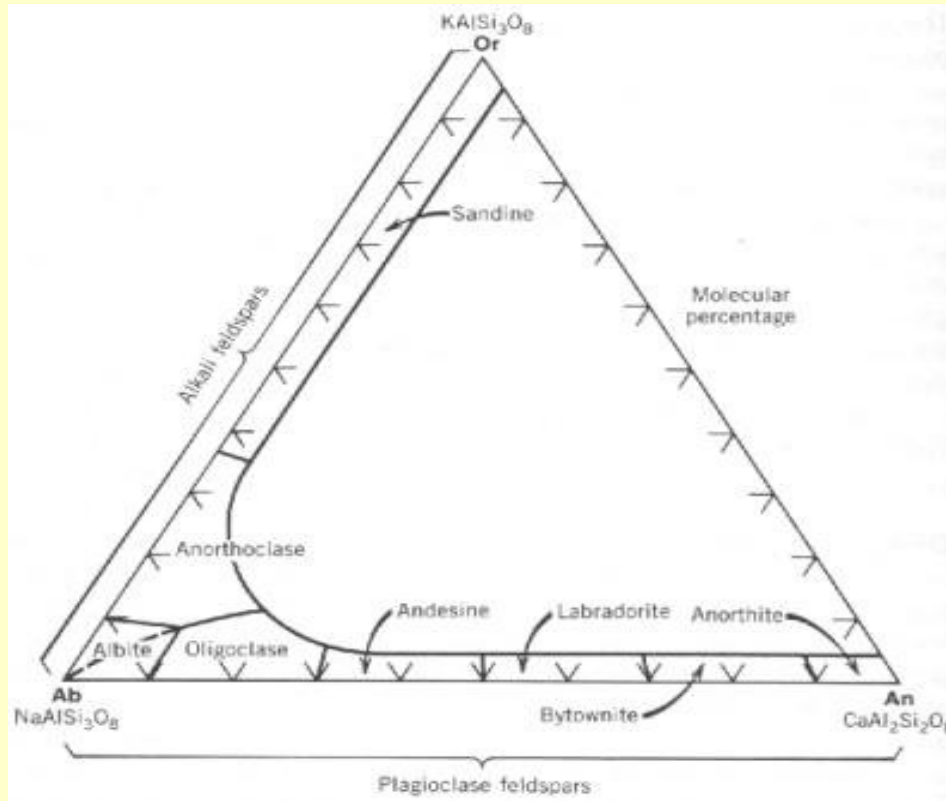


## Alkalické živce

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

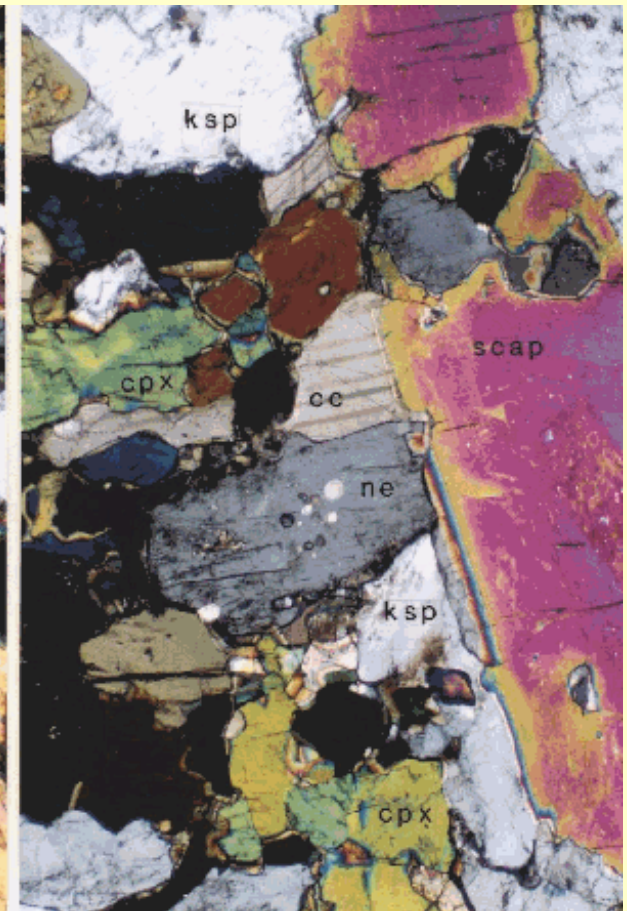
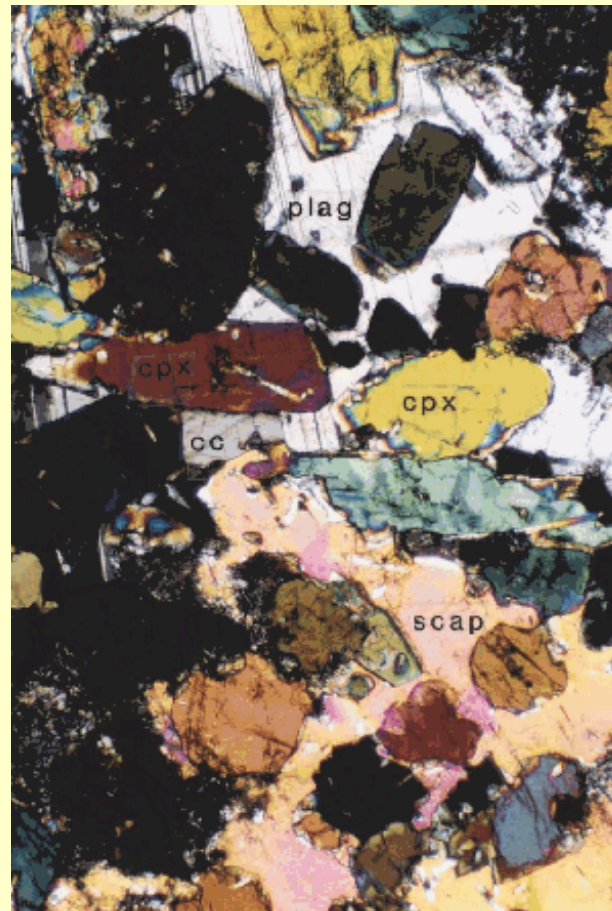
### **Přeměny:**

- 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  $\text{CaSO}_4$ )
- tetragonální
- tektosilikáty

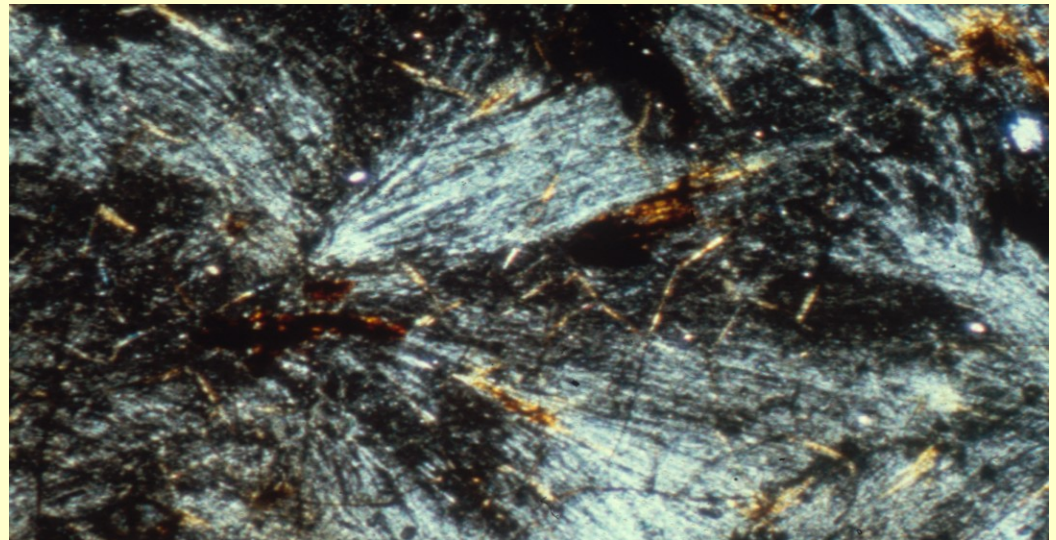
- Skapolit ve vyvřelé hornině ovlivněné asimilací: minerální složení augit (cpx), plagioklas (plag), skapolit (scap), kalcite (cc) nefeline (ne) draselný živec (ksp)



# Skupina zeolitů

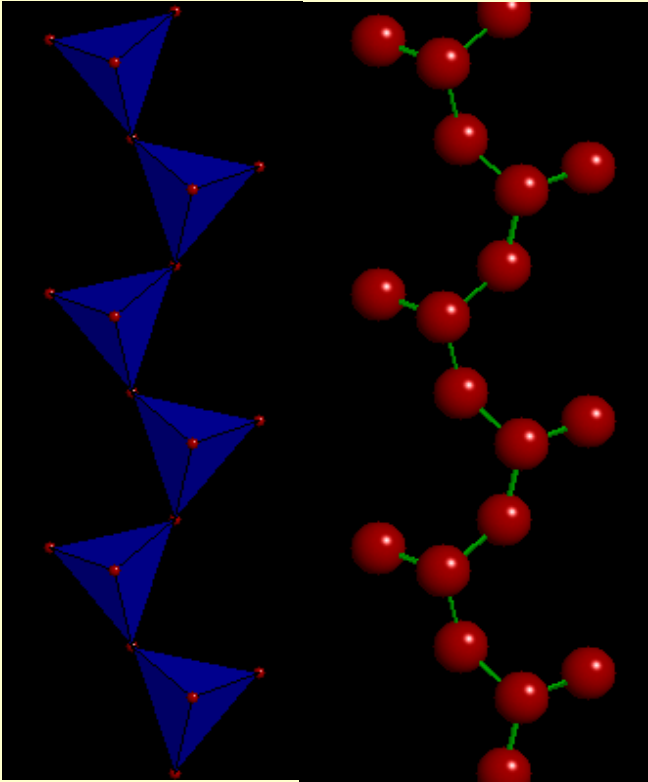
- skupina hydratovaných tektoalumosilikátů
- velké (obvykle 0,3–0,8 nm) dutiny a kanály ve struktuře
- v dutinách jsou nepříliš pevně vázány molekuly H<sub>2</sub>O (tzv. “zeolitová voda”), kationty alkalických kovů (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>) a alkalických zemin (Ca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

- **Analcim** - krychlový
- **NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> · 6H<sub>2</sub>O**
- **Natrolit** - kosočtverečný
- **Na<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub> · 2H<sub>2</sub>O**
- **Chabazit** - trigonální
- **CaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub> · 3H<sub>2</sub>O**



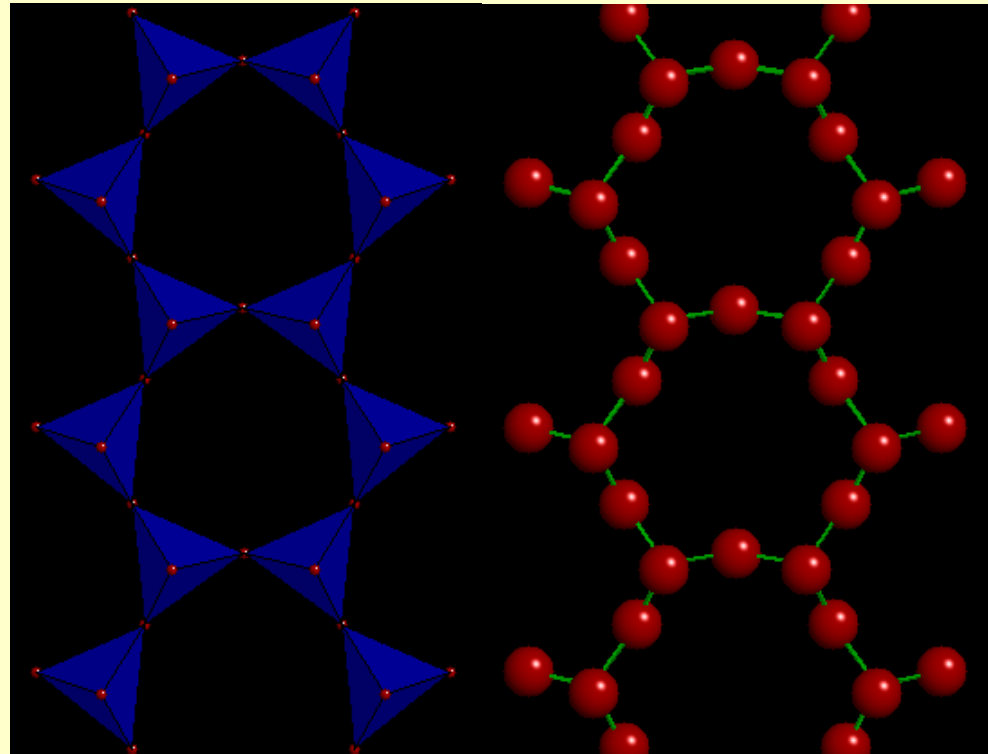


# Inosilikáty



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

pyroxeny



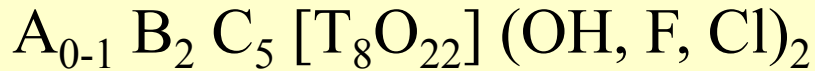
**Inosilikáty**

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

amfiboly

# Chemické složení amfibolů

Obecný vzorec:



A = Na K

B = Ca Na Mg Fe<sup>2+</sup> (Mn Li)

C = Mg Fe<sup>2+</sup> Mn Al Fe<sup>3+</sup> Ti

T = Si Al

- strukturu amfibolů tvoří dvojité řetězce tetraedrů [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup>, uložené vzájemně rovnoběžně ve směru vertikály
- ve směru protažení se opakuje skupina čtyř tetraedrů [Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>]<sup>6-</sup> (dvojčlankový řetězec)  
část Si<sup>4+</sup> v tetraedrech může být nahrazena Al<sup>3+</sup>  
mezi řetězci jsou uloženy kationty W, X, Y

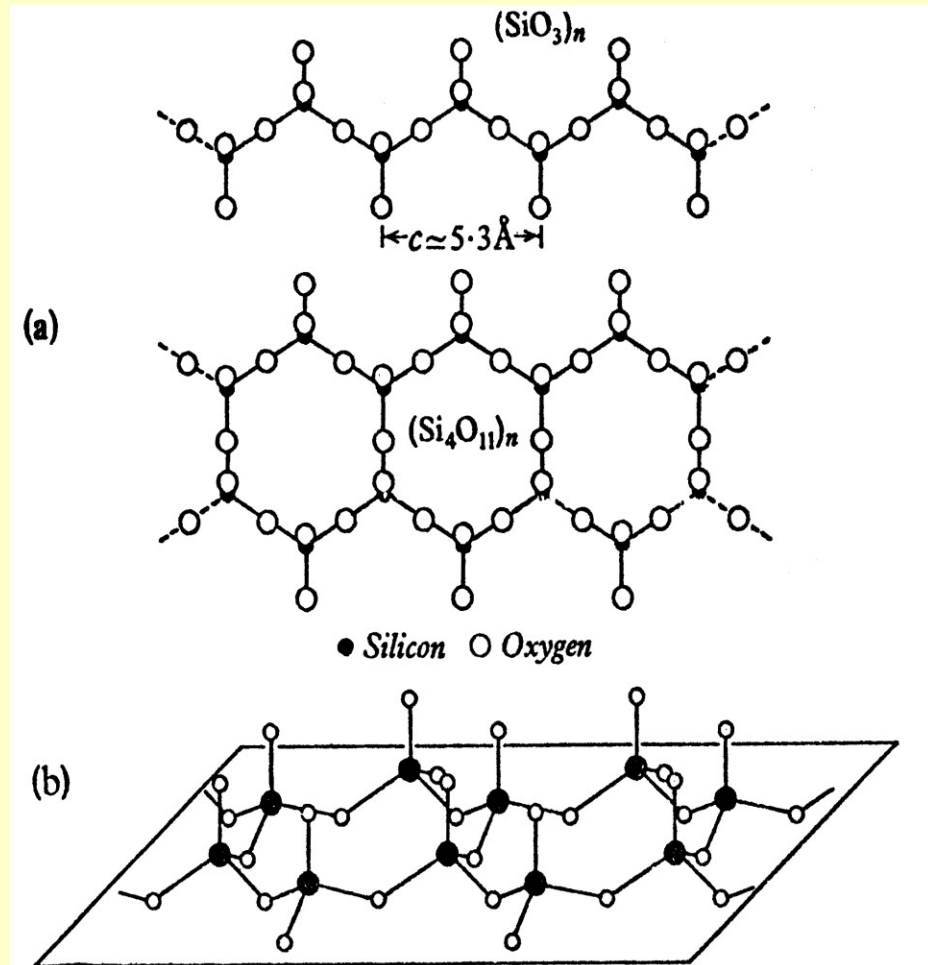
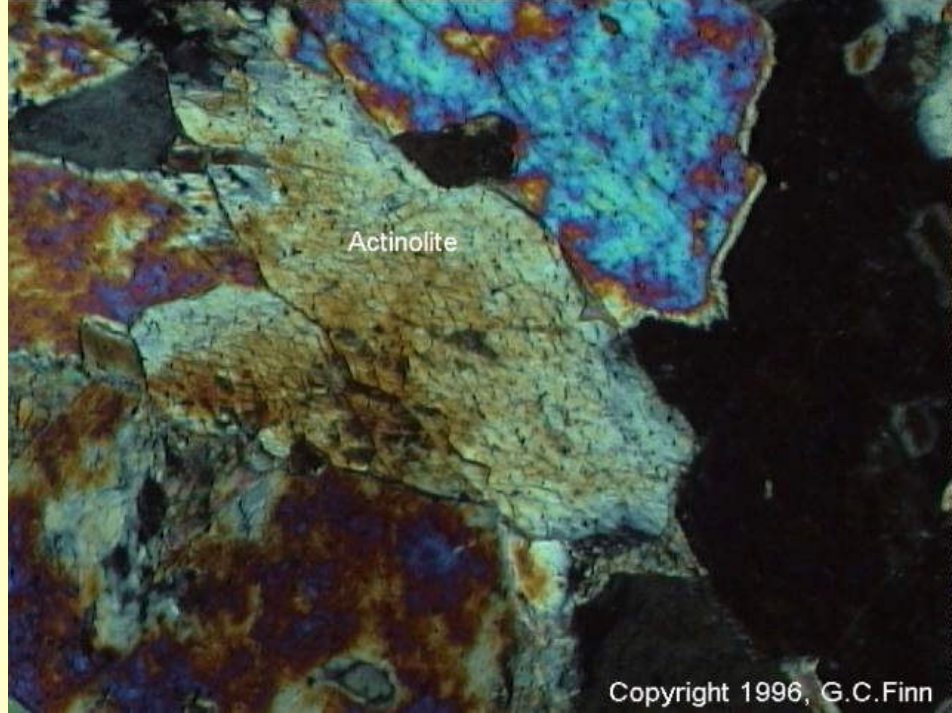
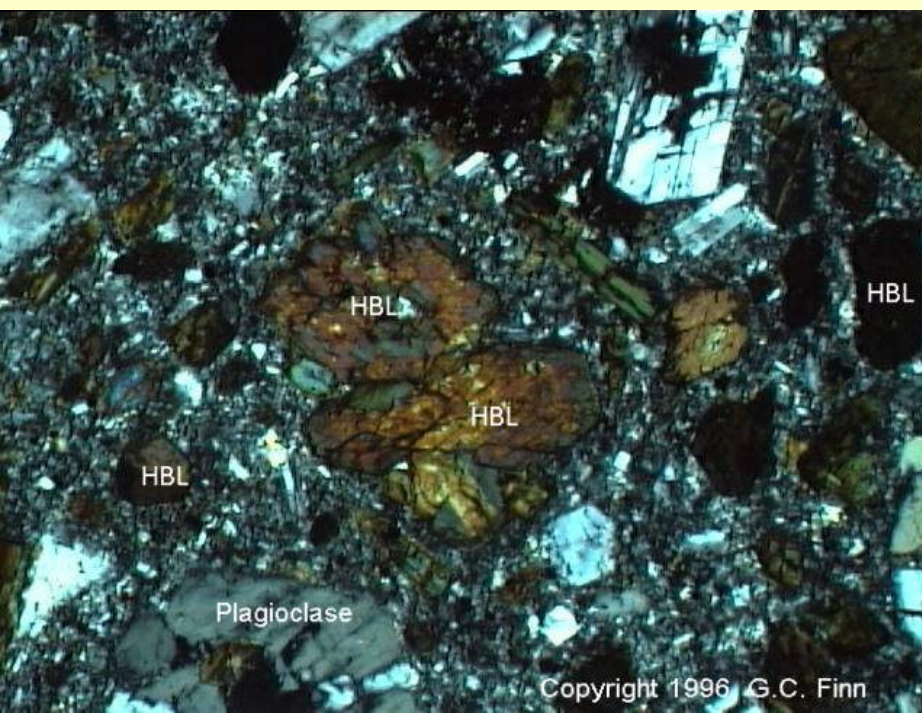
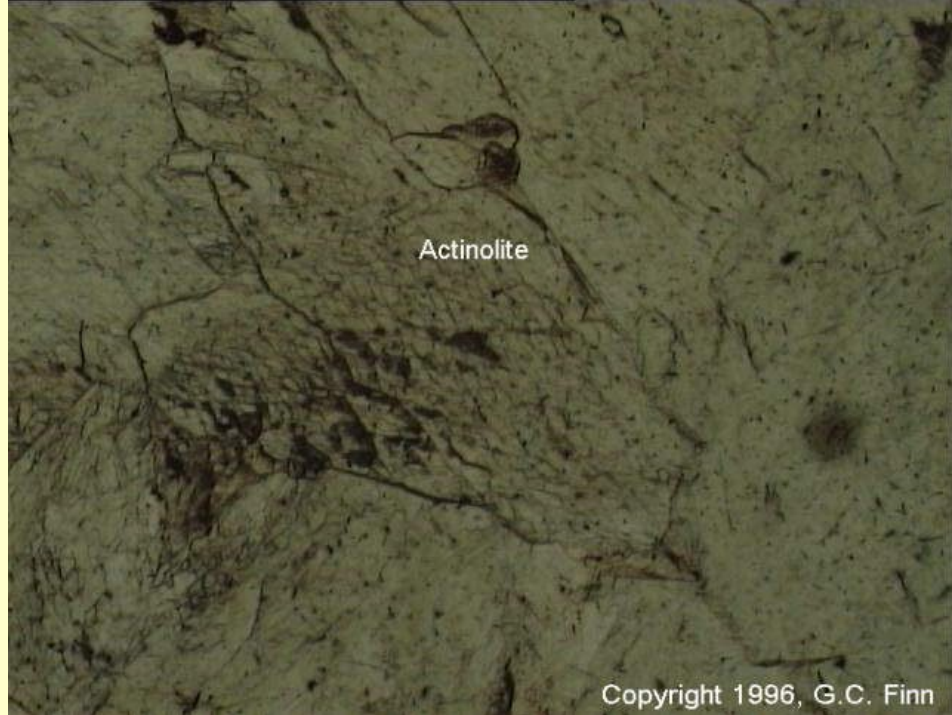
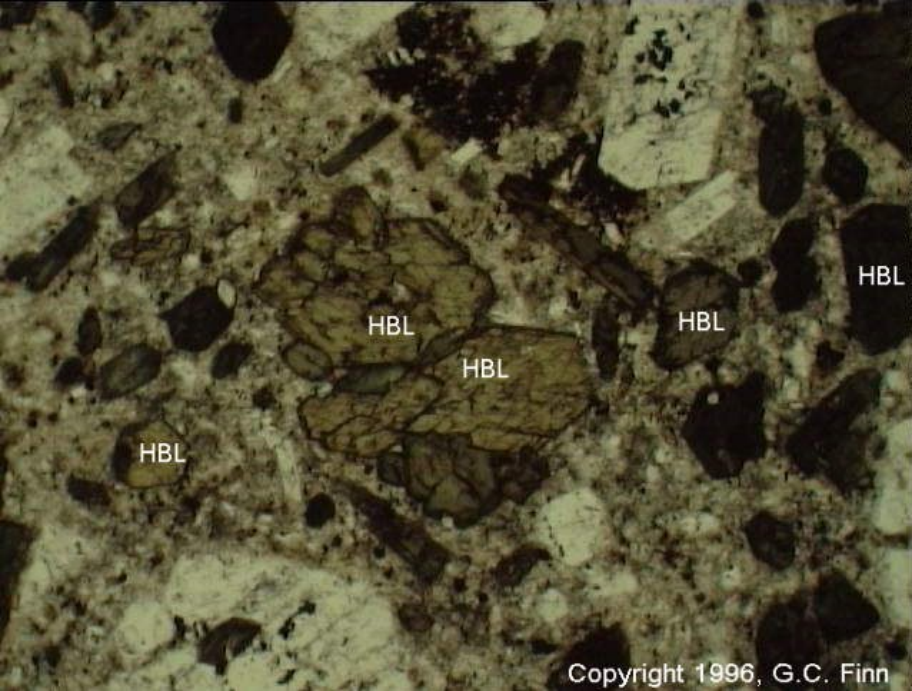


FIG. 53. (a) Comparison of amphibole band (Si<sub>4</sub>O<sub>11</sub>)<sub>n</sub> and pyroxene chain (SiO<sub>3</sub>)<sub>n</sub>.  
(b) Perspective view of the double chain, or band, which occurs in the structures of all amphiboles (after Jong, 1959).



# Klasifikace amfibolů

- dnes se používá klasifikace (Leake et al., 1997; *Amer. Mineral.* v**82**, 1019-1037).

- klasifikace je založena na několika parametrech:

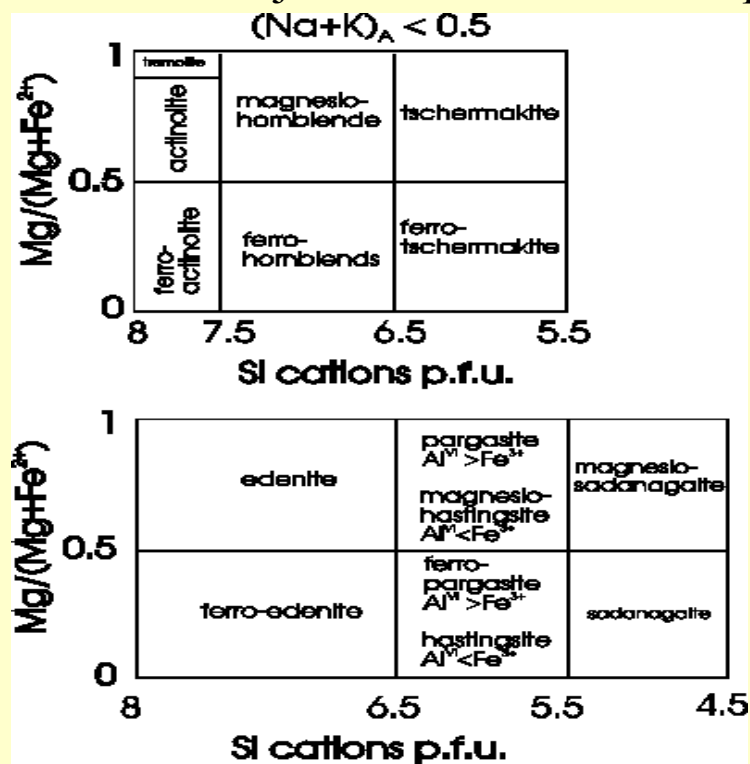
- obsazení B pozice = poměr  $Mg/(Mg+Fe^{2+})$

- množství Si kationtů při přepočtu na 23 kyslíků

- obsah oktaedrického hliníku ( $Al^{VI}$  = aluminum in the C-site)

- trojmocného železa ( $Fe^{3+}$  in the C-site).

- Základní rozdělení amfibolů je založeno na obsazení pozice B:



➤ amfiboly mají velký počet pozic a velký rozsah velikostí kationtů, které tyto pozice obsazují proto jsou chemicky velmi variabilní

**Table 3.** Main types of heterovalent substitutions in amphiboles on the bases of the idealized tremolite formula  $\square\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Substitution mechanism	End member	
$[\text{A}]\square + [4]\text{Si} = [\text{A}]\text{Na} + [4]\text{Al}$	Edenite	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$
$2[4]\text{Si} + 2[6]\text{Mg} = 2[4]\text{Al} + 2[6]\text{Al}$	Al-Tschermakite	$\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$2[4]\text{Si} + 2[6]\text{Mg} = 2[4]\text{Al} + 2[6]\text{Fe}^{3+}$	Fe-Tschermakite	$\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_3\text{Fe}_2^{3+})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$2[4]\text{Si} + [6]\text{Mg} = 2[4]\text{Al} + [6]\text{Ti}$	Ti-Tschermakite	$\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Ti})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$[\text{A}]\square + [\text{M}4]\text{Ca} = [\text{A}]\text{Na} + [\text{M}4]\text{Na}$	Richterite	$\text{Na}(\text{CaNa})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$2[\text{M}4]\text{Ca} + 2[6]\text{Mg} = 2[\text{M}4]\text{Na} + 2[6]\text{Fe}^{3+}$	Riebeckite	$\square\text{Na}_2(\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$2[\text{M}4]\text{Ca} + 2[6]\text{Mg} = 2[\text{M}4]\text{Na} + 2[6]\text{Al}$	Glaucophane	$\square\text{Na}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$[\text{A}]\square + [6]\text{Mg} + 2[4]\text{Si} = [\text{A}]\text{Na} + 2[4]\text{Al} + [6]\text{Al}$	Hastingsite	$\text{NaCa}_2(\text{Fe}_4^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$[\text{A}]\square + [6]\text{Mg} + 2[4]\text{Si} = [\text{A}]\text{Na} + 2[4]\text{Al} + [6]\text{Fe}^{3+}$	Pargasite	$\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- 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

# Využití amfibolu v petrologii

- Substituce v amfibolitech umožňují využít tento minerál pro určení tlaku, teploty a fugacity kyslíku.
  - Chemické složení amfibolu je také výrazně závislé na složení celé horniny
- a) Mg# ( $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ ) závisí výrazně na složení systému a daleko méně na teplotě.
  - b) Tschermakitová substituce  $[\text{X}^{2+}]_{\text{C}} + [\text{Si}]_{\text{T}} = [\text{Al}]_{\text{C}} + [\text{Al}]_{\text{T}}$  ( $^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+} \text{ } ^{\text{IV}}\text{Si}^{4+} \longleftrightarrow ^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} \text{ } ^{\text{IV}}\text{Al}^{3+}$ ) stoupá s nárůstem tlaku (amfiboly se s nárůstem tlaku stávají bohatší Al naopak).
  - c) Edenitová substituce  $[\text{VAC}]_{\text{A}} + [\text{Si}]_{\text{T}} = [\text{Na}]_{\text{A}} + [\text{Al}]_{\text{T}}$  stoupá s nárůstem teploty (obsah sodíku a hliníku v amfibolu roste s nárůstem teploty)
  - d) Substituce trojmocného železa za hliník v C pozici roste s fugacitou kyslíku
  - e) Obsah Ti je ovlivněn stupněm metamorfózy (funguje pouze pokud je v hornině dostatek Ti pro saturaci amfibolu). Projevuje se v barvě amfibolů světle zelený až olivově zelený přechází do hnědé s nárůstem stupně metamorfózy a Ti.
  - f) Při nízkém stupni metamorfózy (tremolit-aktinolit) je nulový a stoupá s nárůstem metamorfózy k obsahům typickým u horblendu (kolem 0,5 atomů Na+K, 2,5 atomů Al).
  - g) Vysoký obsah oktaedrického Al, nebo Na v M4 pozici indikují vysoké tlaky.

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



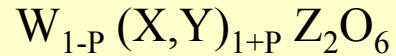
$$T = \frac{78.44 + Y_{Ab-An} - 33.6X_{Na}^{[M4]} - (66.8 - 2.92P)X_{Al}^{[M2]} + 78.5X_{Al}^{[T1]} + 9.4X_{Na}^{[A]}}{0.0721 - R \ln \left( \frac{27 X_{Na}^{[M4]} X_{Si}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}}{64 X_{Ca}^{[M4]} X_{Al}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}} \right)}$$

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

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

# Chemismus Pyroxenů

Obecný vzorec pyroxenů:



- W = **Ca** Na
- X = **Mg** **Fe<sup>2+</sup>** Mn Ni Li
- Y = Al **Fe<sup>3+</sup>** Cr Ti
- Z = **Si** Al

- pyroxeny mají monoklinickou (klinopyroxeny, cpx.) a rombickou (ortopyroxeny, opx.) symetrii
- jsou to bezvodé minerály, které za přítomnosti vody a při působení vysokých teplot a přechází 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 <sub>2</sub>	O <sub>6</sub>	
Mg	Mg	Si	Enstatite	
Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	↓	Ferrosilite	
Ca	Mg		Diopside	
Ca	Fe <sup>3+</sup>		Hedenbergite	
Ca	Mn		Johannsenite	
Na	Al		Jadette	
Na	Fe <sup>3+</sup>		Aegerine	
Ca	Al		Al,Si	Ca-Tschermaks
Mg	Al		Al,Si	Mg-Tschermaks

Orthorhombic

Monoclinic



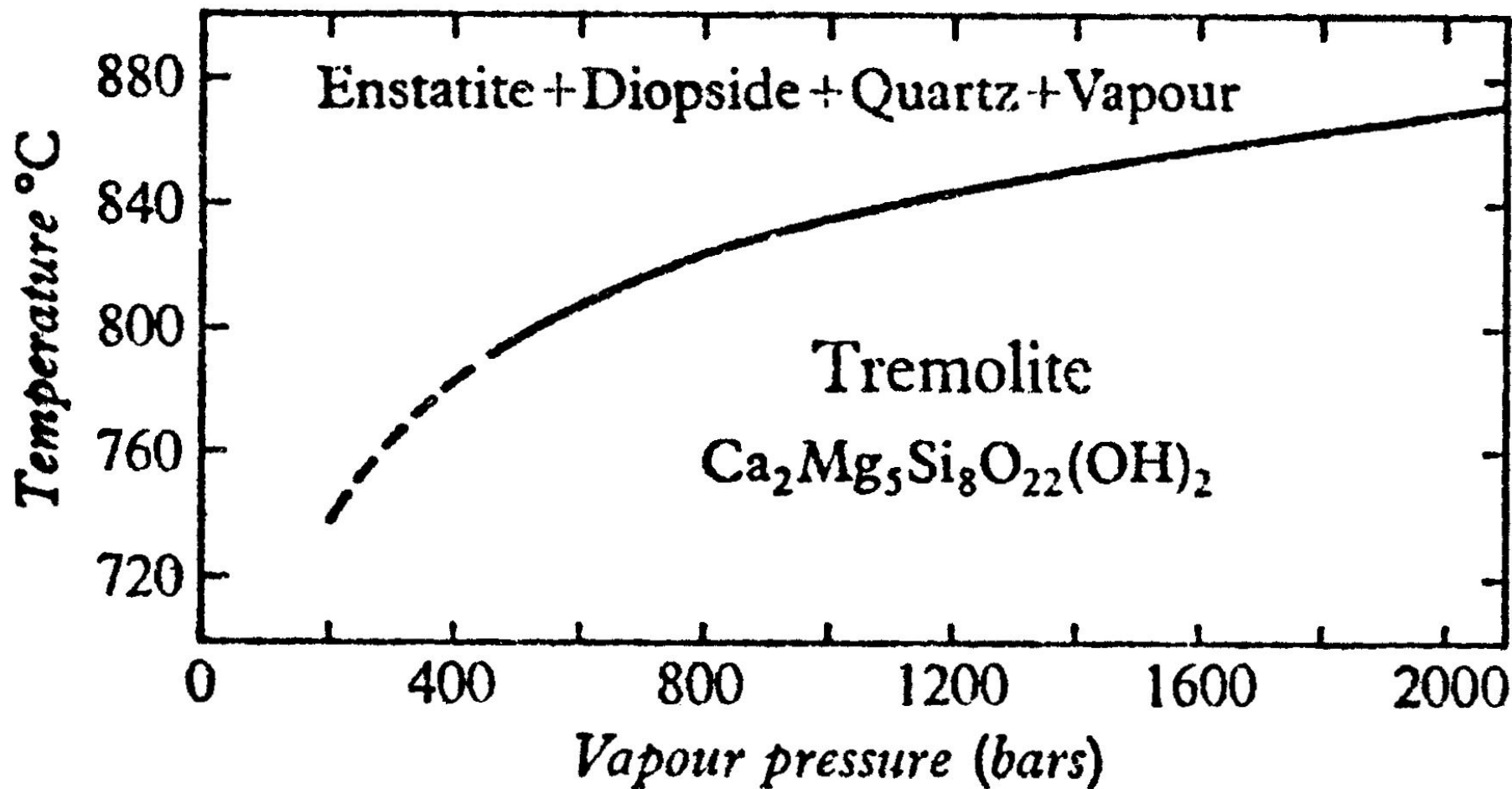
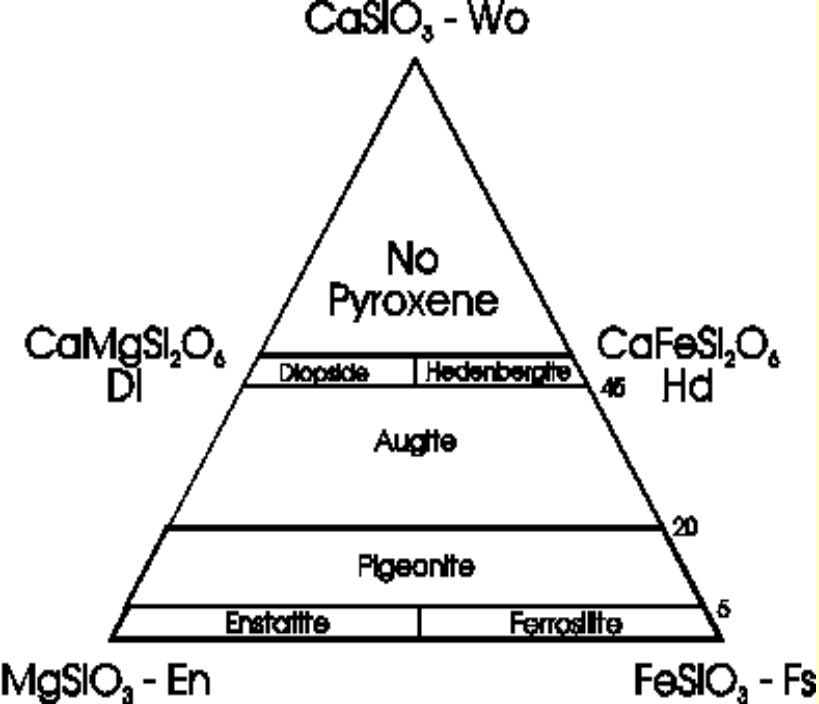


FIG. 65. The univariant equilibrium curve for the reaction tremolite  $\rightleftharpoons$  enstatite + diopside + quartz + vapour (after Boyd, 1954).



### a) Mg–Fe pyroxeny

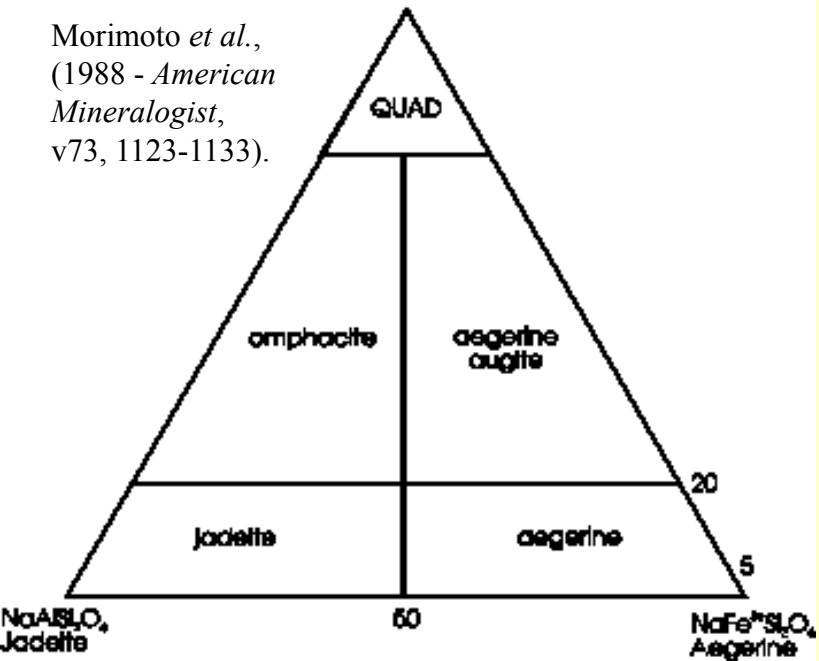
- ✓ při obsahu složky  $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$  do 5 % jsou rombické a nad touto hranicí monoklinické (pigeonit)
- ✓ úplná izomorfní řada mezi enstatitem  $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$  a ferrosiletem  $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$

### b) Ca-pyroxeny

- ✓ jsou monoklinické
- ✓ úplná izomorfní řada mezi diopsidem  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$  a hedenbergitem  $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$
- ✓ augit je přechodný člen se zvýšeným podílem  $\text{Fe}^{3+}$  a Al na úkor  $\text{Fe}^{2+}$  a Mg)

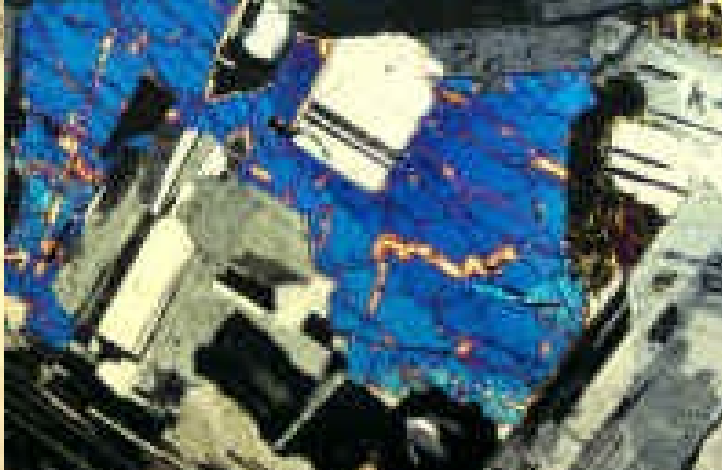
Wo+En+Fs

Morimoto *et al.*,  
(1988 - *American Mineralogist*,  
v73, 1123-1133).

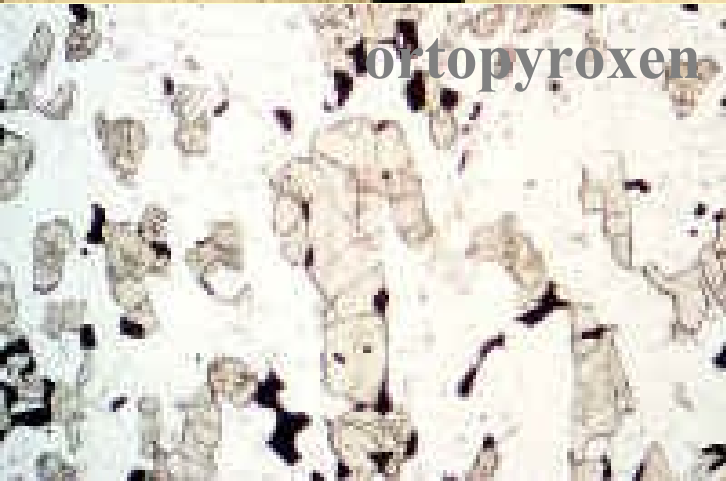


### c) alkalické pyroxeny (Ca–Na, Na a Li)

- ✓ jsou monoklinické
- ✓ složení můžeme vyjádřit v trojúhelníku  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  –  $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$  –  $(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
- ✓ dále sem patří Li-pyroxen spodumen



Jednoklonné  
pyroxeny  
Diopsid  
Salit  
Augit  
Pigeonit



Kosočtverečné  
pyroxeny:  
Enstatit  
Bronzit  
Hypersten



Alkalické  
proxeny:  
Egerin -  
 $\text{NaFeSi}_2\text{O}_6$   
Spodumen -  
 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$

# Příklad využití pyroxenu v metamorfní petrologii

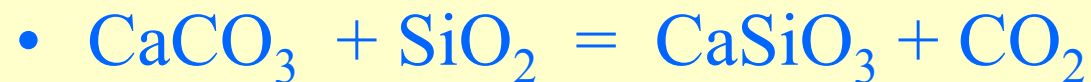
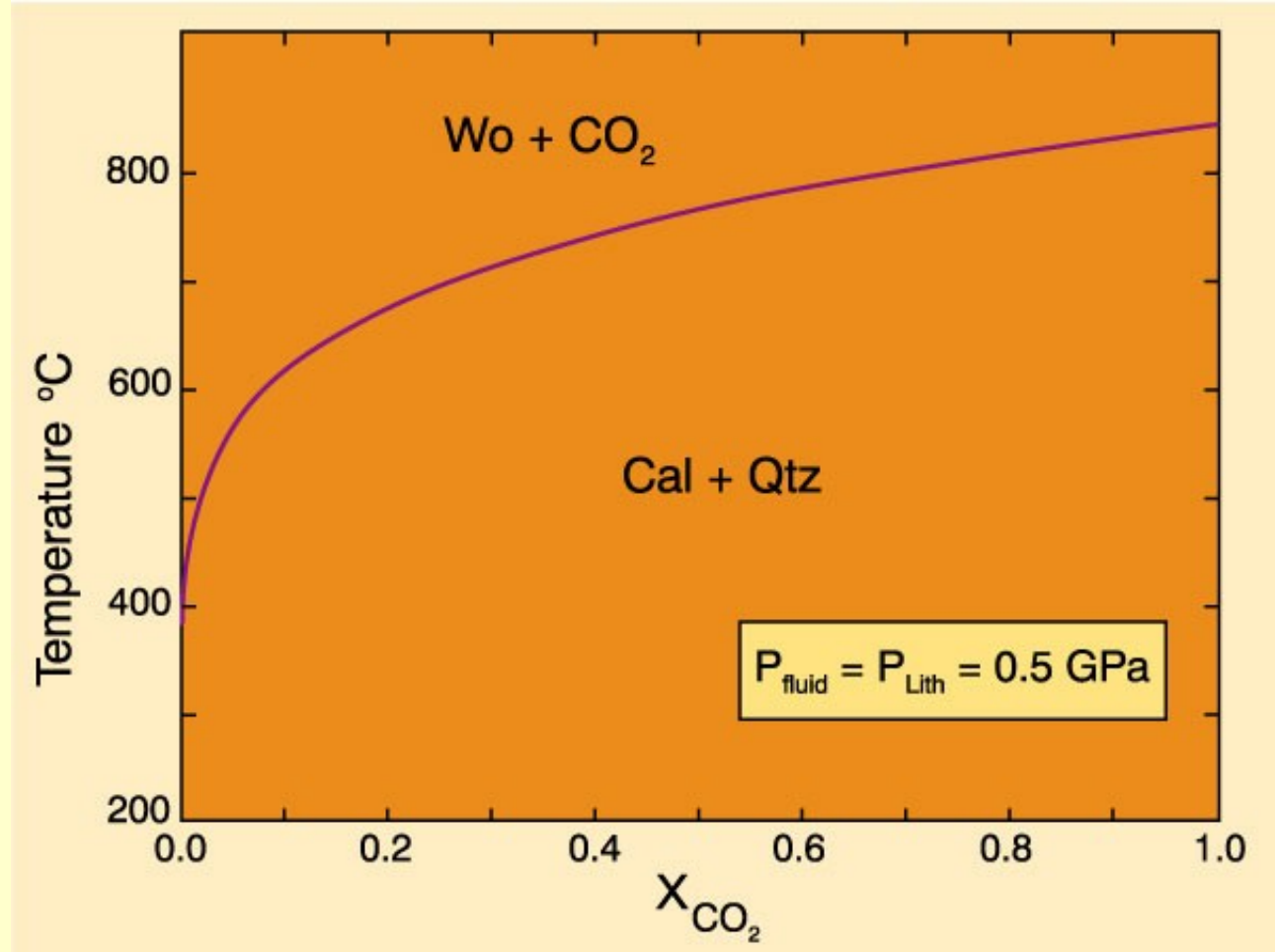
## Garnát-Cpx-fengitový barometr

- Holland and Powell (1990, J Metamorphic Geol. 8, 89-124)
- založeno na reakci **pyrope + 2grossular = 6diopside + 3Al<sub>2</sub>Mg<sub>-1</sub>Si<sub>-1</sub>**
- 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

$$\ln K = 6 \ln a_{\text{di}} - \ln a_{\text{prp}} - 2 \ln a_{\text{grs}} + 3 \ln \left( \frac{X_{\text{Al,M1}} \cdot (4 - \text{Si})}{X_{\text{Mg,M1}} \cdot (\text{Si} - 2)} \right)$$

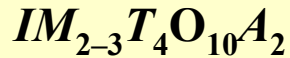
# Wollastonit

- $\text{CaSiO}_3$
- blízce příbuzný pyroxenům (Pyroxenoid)
- mramory, erlany, skarny



## Skupina slíd

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



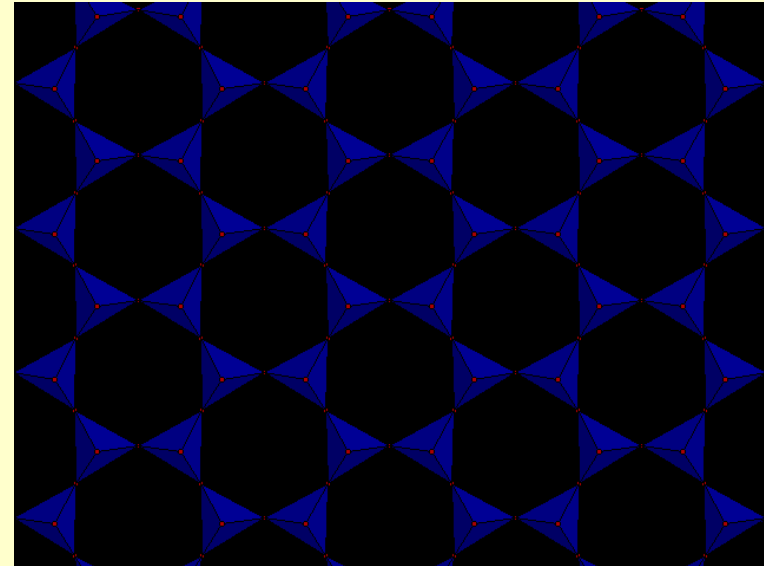
- kde:

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

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

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

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



- $SiO_4$  tetrahedry jsou spojeny do vrstev  $[Si_2O_5]$  a kyslík v jednom z vrcholů je volný pro spojení s dalším kationtem

## Koncové členy muskovitu a biotitu

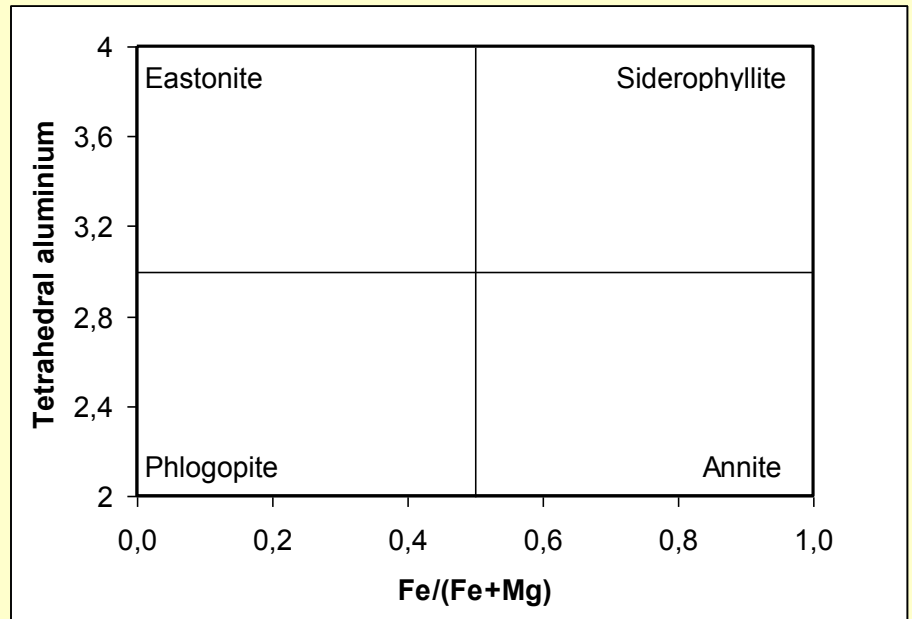
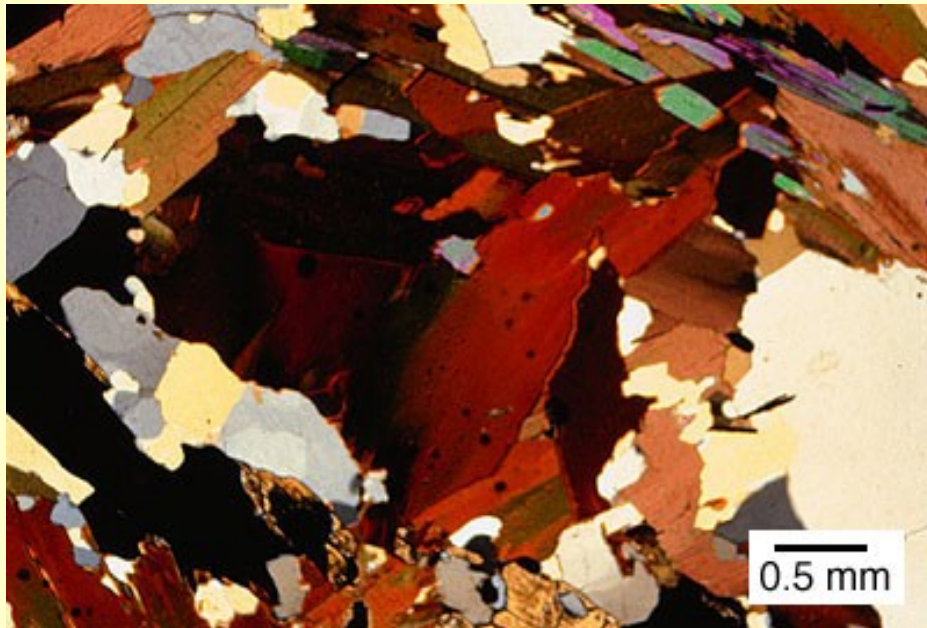
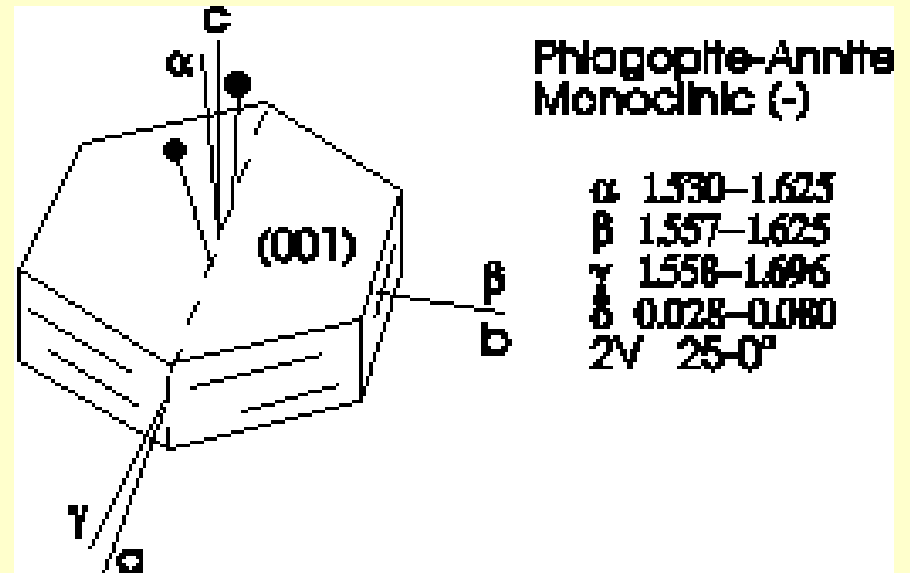
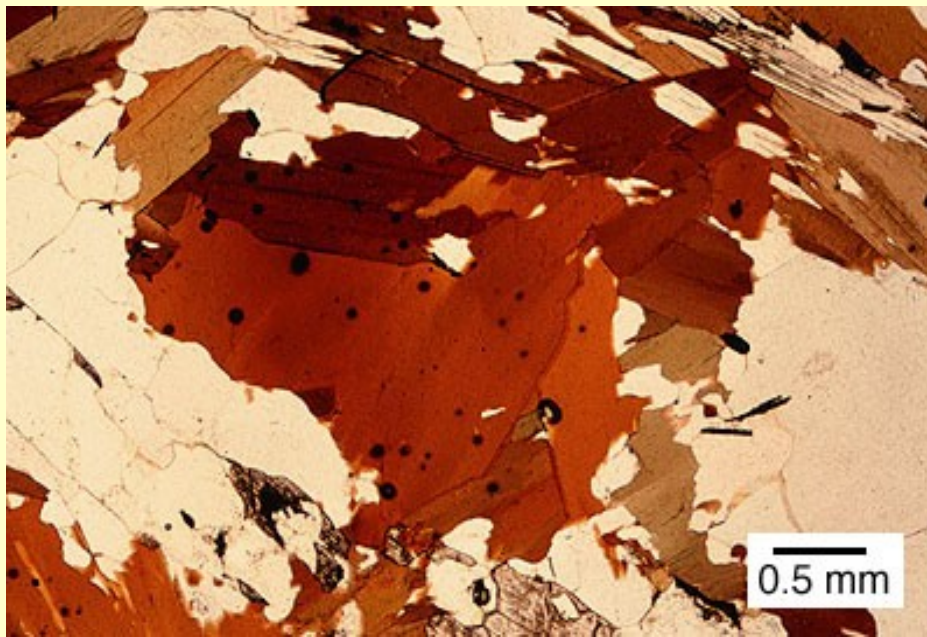
### Biotit

- $KMg_3[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$  : 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

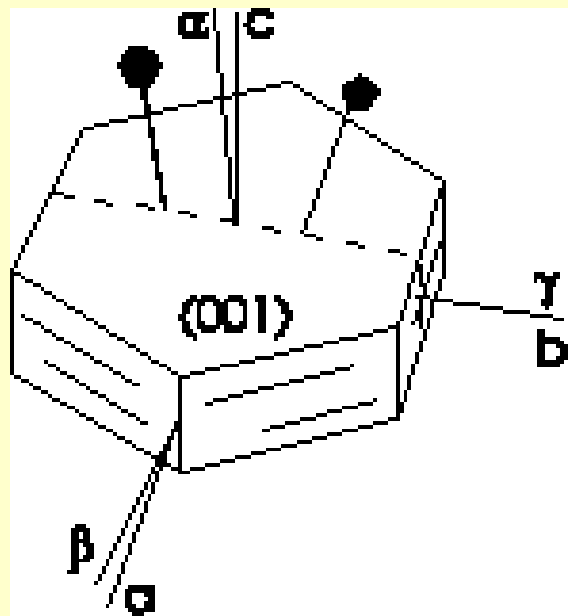
### Muskovit

- $KAl_2[AlSi_3]O_{10}(OH)_2$  : 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

# Biotit

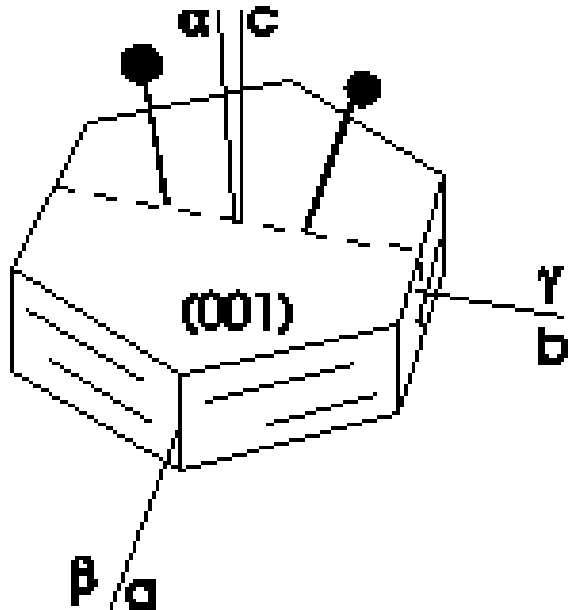


# Muskovit a paragonit



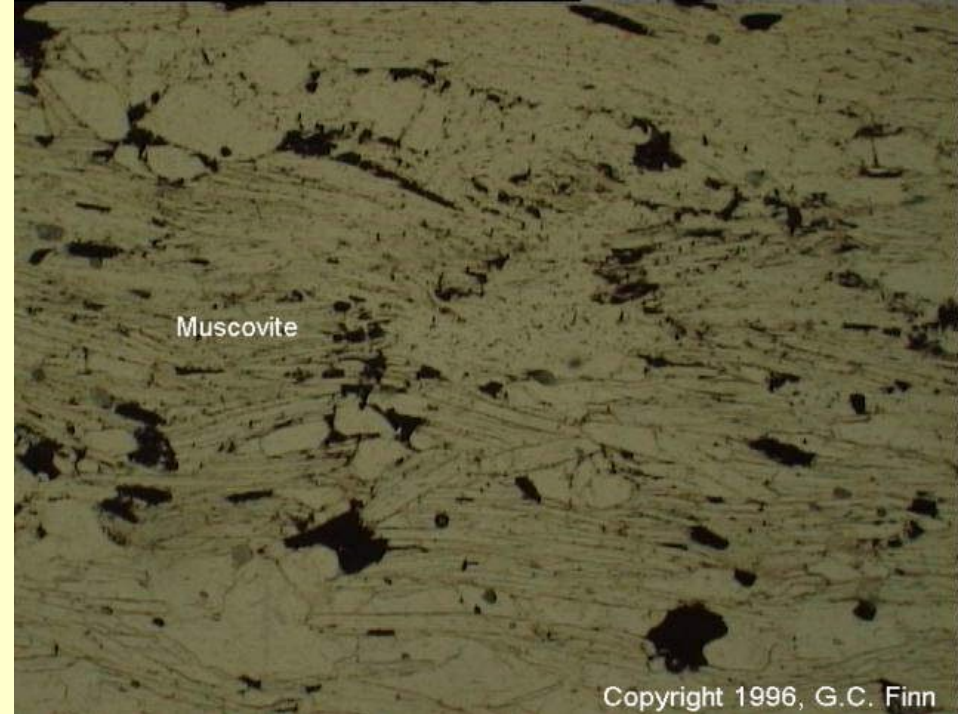
**Muscovite**  
Monoclinic (-)

$\alpha$  1.552-1.576  
 $\beta$  1.582-1.615  
 $\gamma$  1.587-1.618  
 $\delta$  0.036-0.049  
 $2V$  28-47°

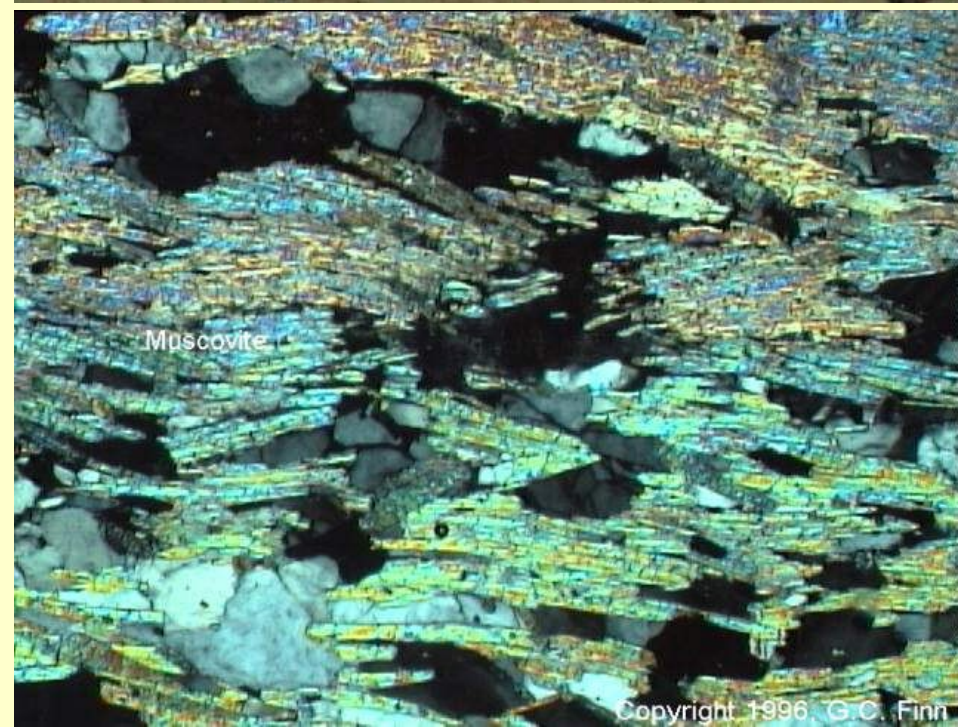


**Paragonite**  
Monoclinic (-)

$\alpha$  1.564-1.580  
 $\beta$  1.594-1.109  
 $\gamma$  1.600-1.609  
 $\delta$  0.028-0.038  
 $2V$  0-40°



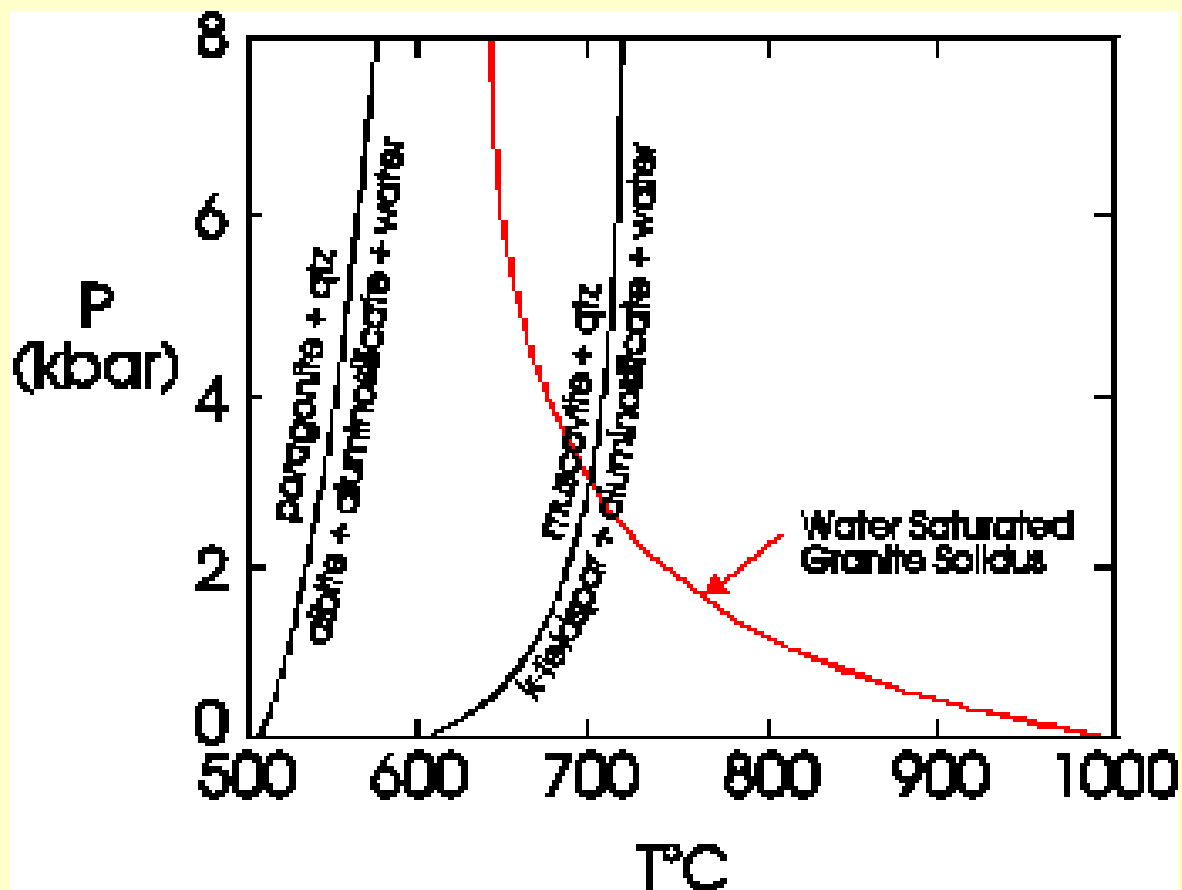
Copyright 1996, G.C. Finn



Copyright 1996, G.C. Finn



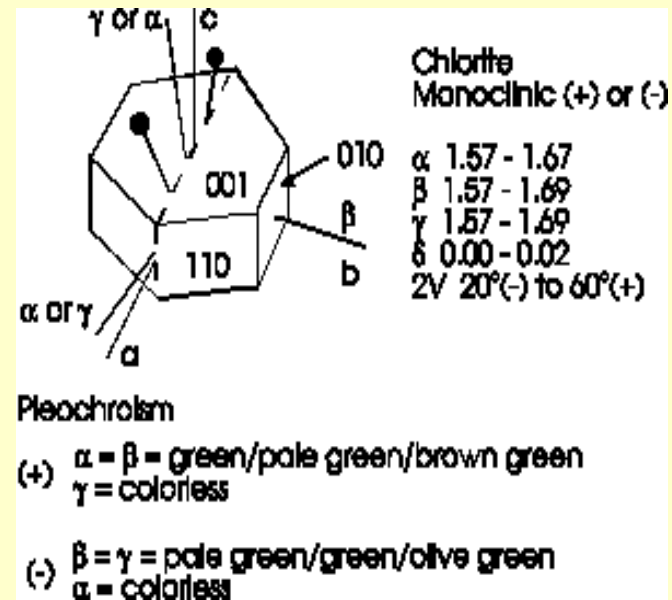
- muskovit a biotit se objevují v metamorfovaných pelitech, psamitech a kyselých magmatických horninách od facie zelených břidlic po facii amfibolitovou (muskovit) a granulitovou (biotit)
- paragonit se někdy vyskytují v nížce a středně metamorfovaných metapelitech nebo metabazitech a stejně jako muskovit 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.



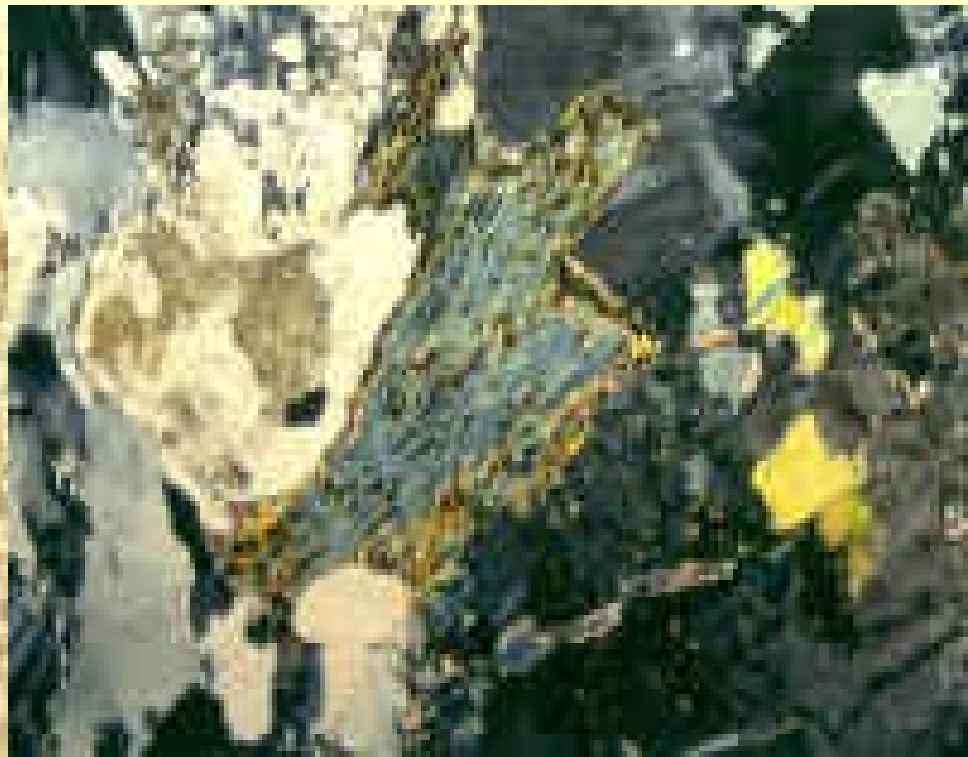
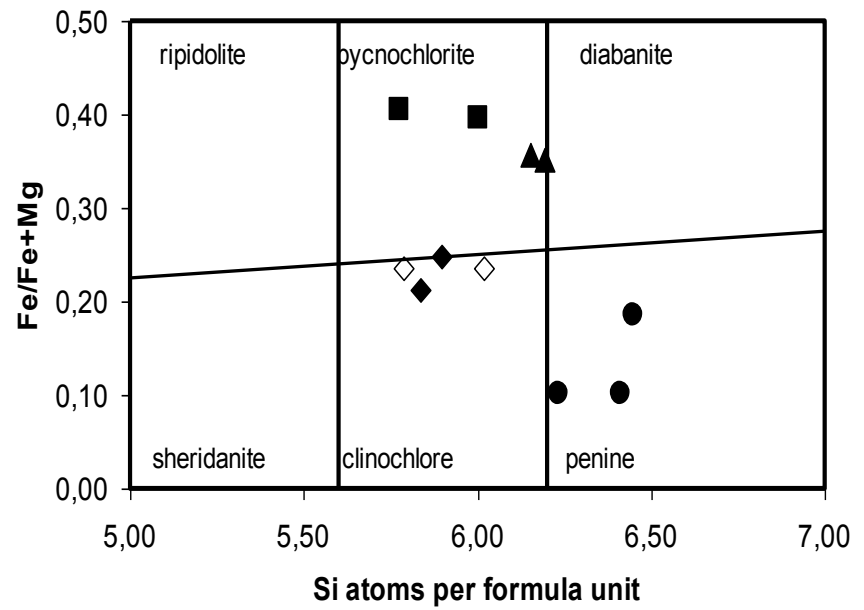
- flogopit je typický pro regionálně i kontaktně metamorfované vápence
- jemnozrný muskovit vzniká hydrotermálně přeměnou silikátů, nejčastěji živců
- pro metamorfní petrologii je důležitá tschermakitová substituce ( $\text{MgSiAl}_2$ ) v muskovitech která indikuje růst tlaku (fengit)

## 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
- $\text{Mg}^{2+}$  je často částečně nahrazeno  $\text{Fe}^{2+}$  případně jiným dvojmocným kationtem,
- $\text{Al}^{3+}$  může nahradit  $\text{Fe}^{3+}$  případně jiný trojmocný kationt.
- struktura chloritů je založena na trojvrstevních komplexech, s nimiž se pravidelně střídají oktaedrové vrstvy tvořené dvojmocnými kationty a hydroxylovými skupinami (tzv. brucitové vrstvy)
- chlority patří k významným horninotvorným minerálům 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

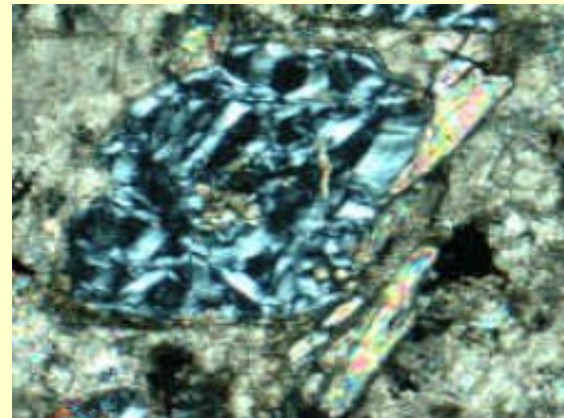


- nejdůležitější jsou:
- **klinochlor**
- $(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- mon.
- **chamosit**
- $(\text{Fe}^{2+},\text{Mg,Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{O})_8$
- mon.



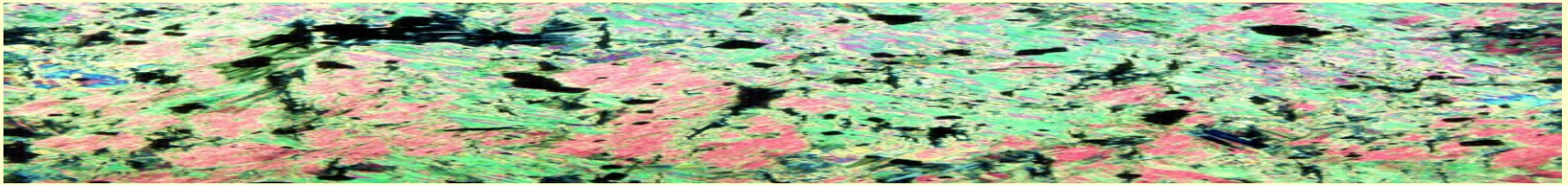
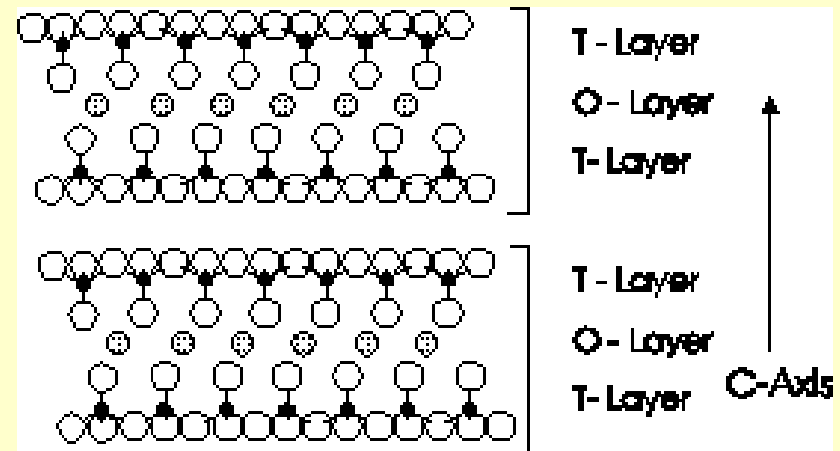
# Minerály serpentinové skupiny

- $\text{Mg}_3 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_4$
- **Lizardit:** nejčastější je trigonální polytyp (může být také hexagonální), dokonale štěpný podle  $\{001\}$ , Tvoří celistvé, jemnozrnné agregáty, méně často je hrubozrnný nebo vytváří drobné šupinky.
- **Antigorit:** monoklinický. dokonale štěpný podle  $\{001\}$ , tvoří nejčastěji celistvé a jemnozrnné agregáty, méně často destičkovité a šupinkovité.
- **Chryzotil:** nejčastěji monoklinický, charakteristické jsou paralelně vláknité agregáty tzv. *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 – pyrofylytu

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



### Vznik

**Mastek** vzniká hydrotermálním přínosem  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiO}_2$  bohatých roztoků na karbonátové horniny při kontaktní i regionální metamorfóze (dolomitové vápence, dolomity, magnezity).

**Pyrofylyt** vzniká jako produkt alterace živců hliníkem bohatých hornin v kyselém prostředí při teplotě nad  $300\text{ }^\circ\text{C}$

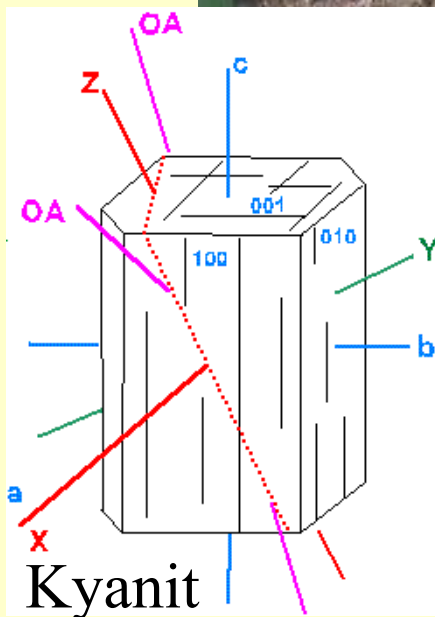
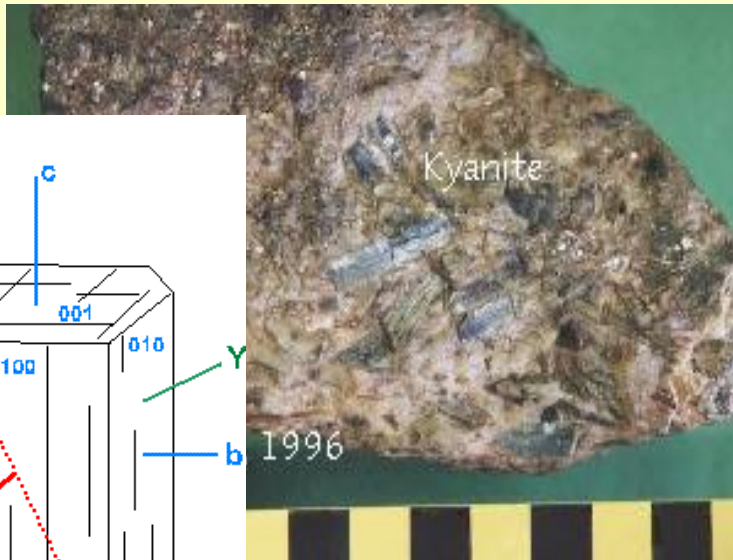
- při nižších teplotách vzniká ve stejném prostředí kaolinit, v alkalickém prostředí muskovit nebo montmorillonit
- bývá přítomen v nížce metamorfovaných metapelitech

# MINERÁLY SKUPINY $\text{Al}_2\text{SiO}_5$

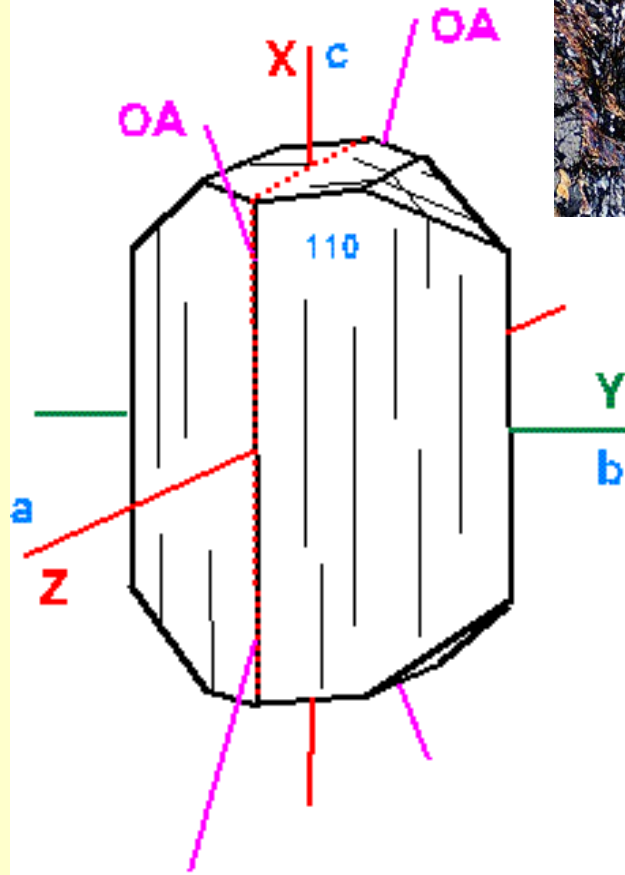
- Do skupiny  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  patří tři minerály které se vyskytují v Al bohatých hornin:

## Kyanit:

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

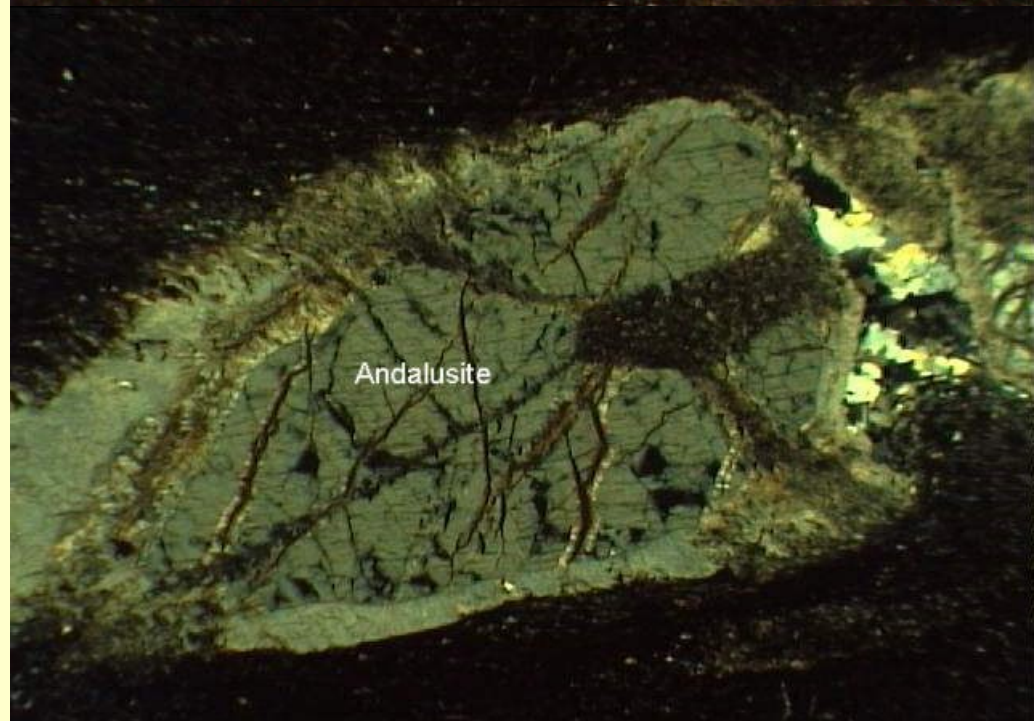


# Andalusit



Chlorite +  
Muscovite

Andalusite

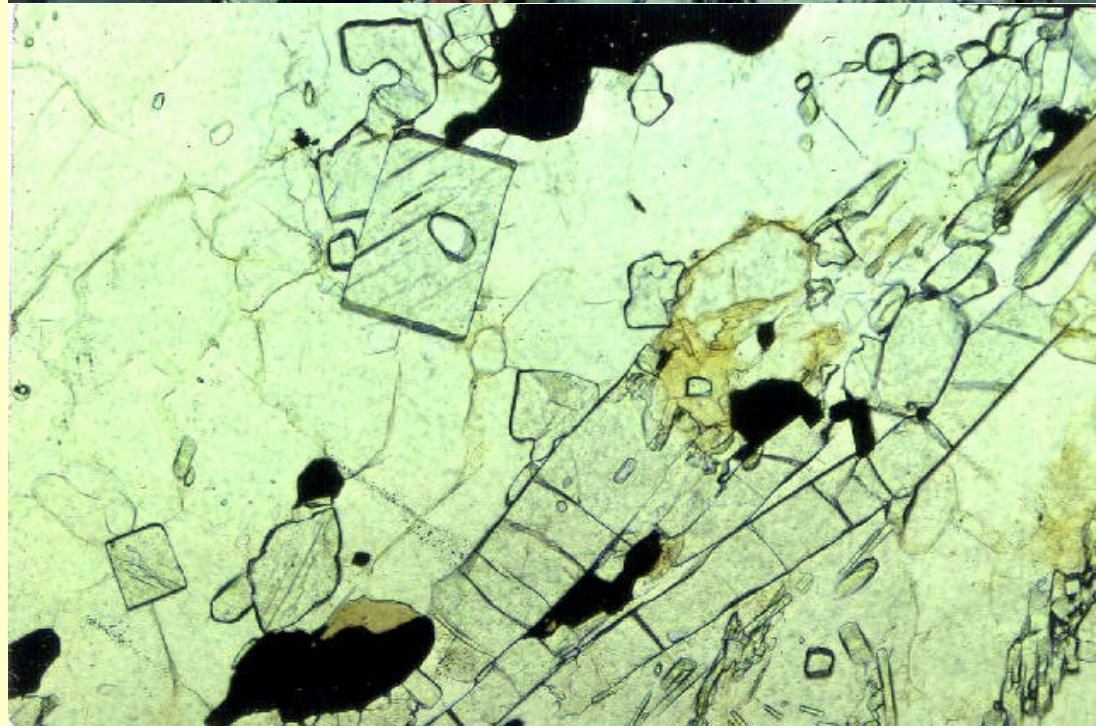
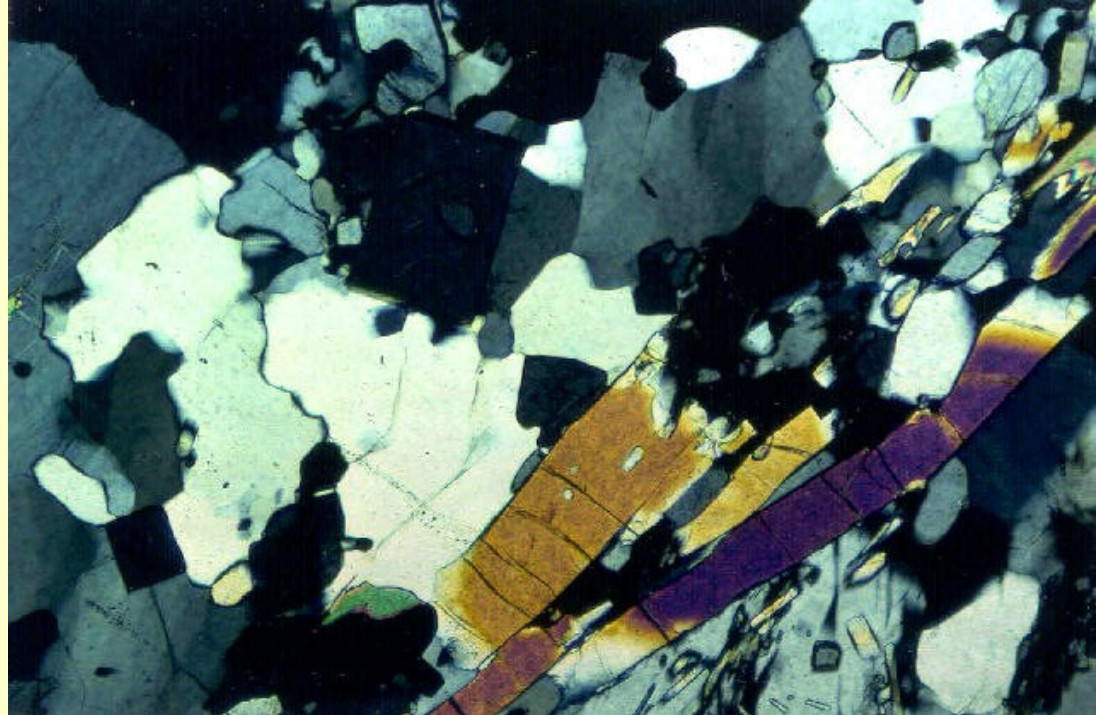
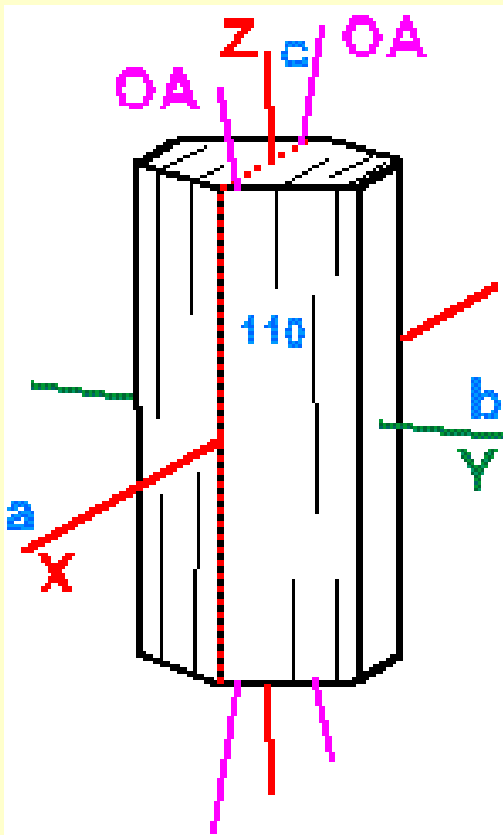


Andalusite

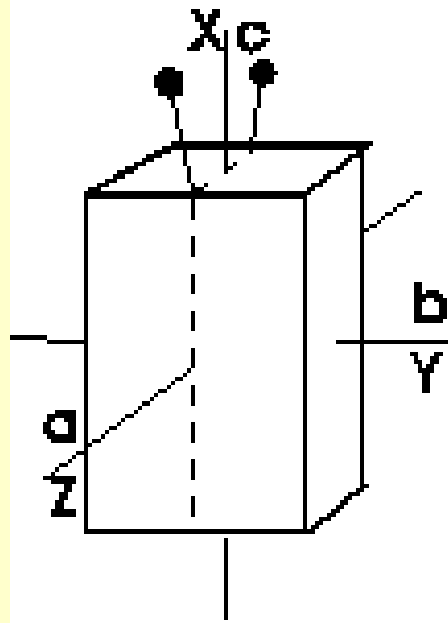
- kosočtverečný
- někdy příměsi Fe, Mg, Mn a alkalických prvků
- vyskytuje se v kontaktních aureolách

# Sillimanit

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

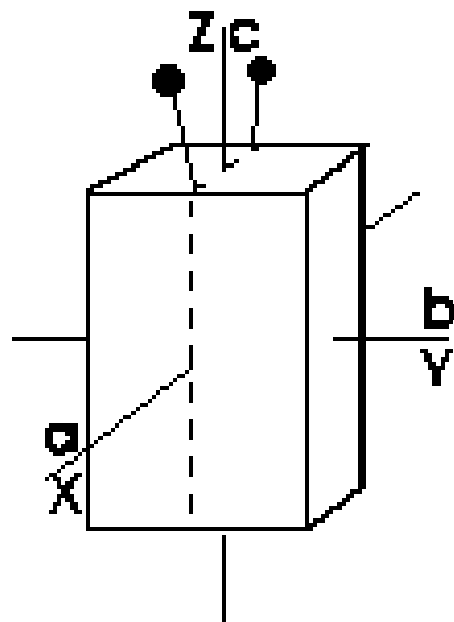






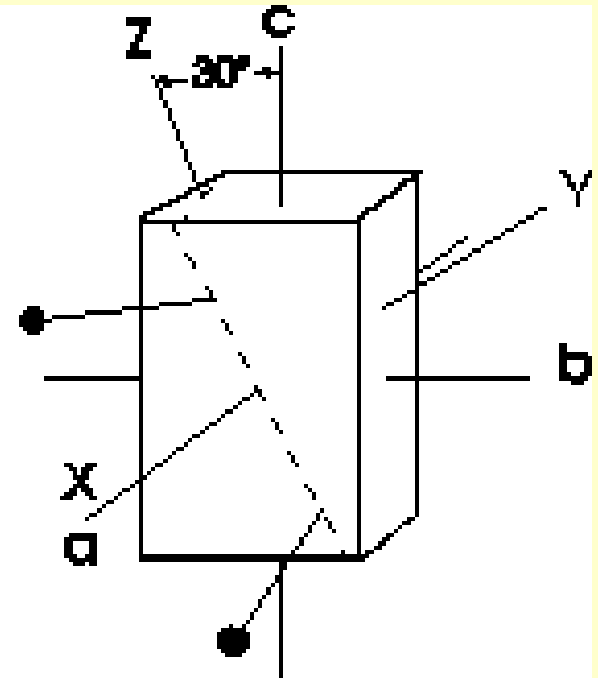
**Andalusite**

$\alpha = 1.629-1.640$   
 $\beta = 1.633-1.644$   
 $\gamma = 1.638-1.650$   
 $\delta = 0.009-0.013$   
 $\rho = 3130-3160$   
 $S_{\text{rel}} = 93.22$



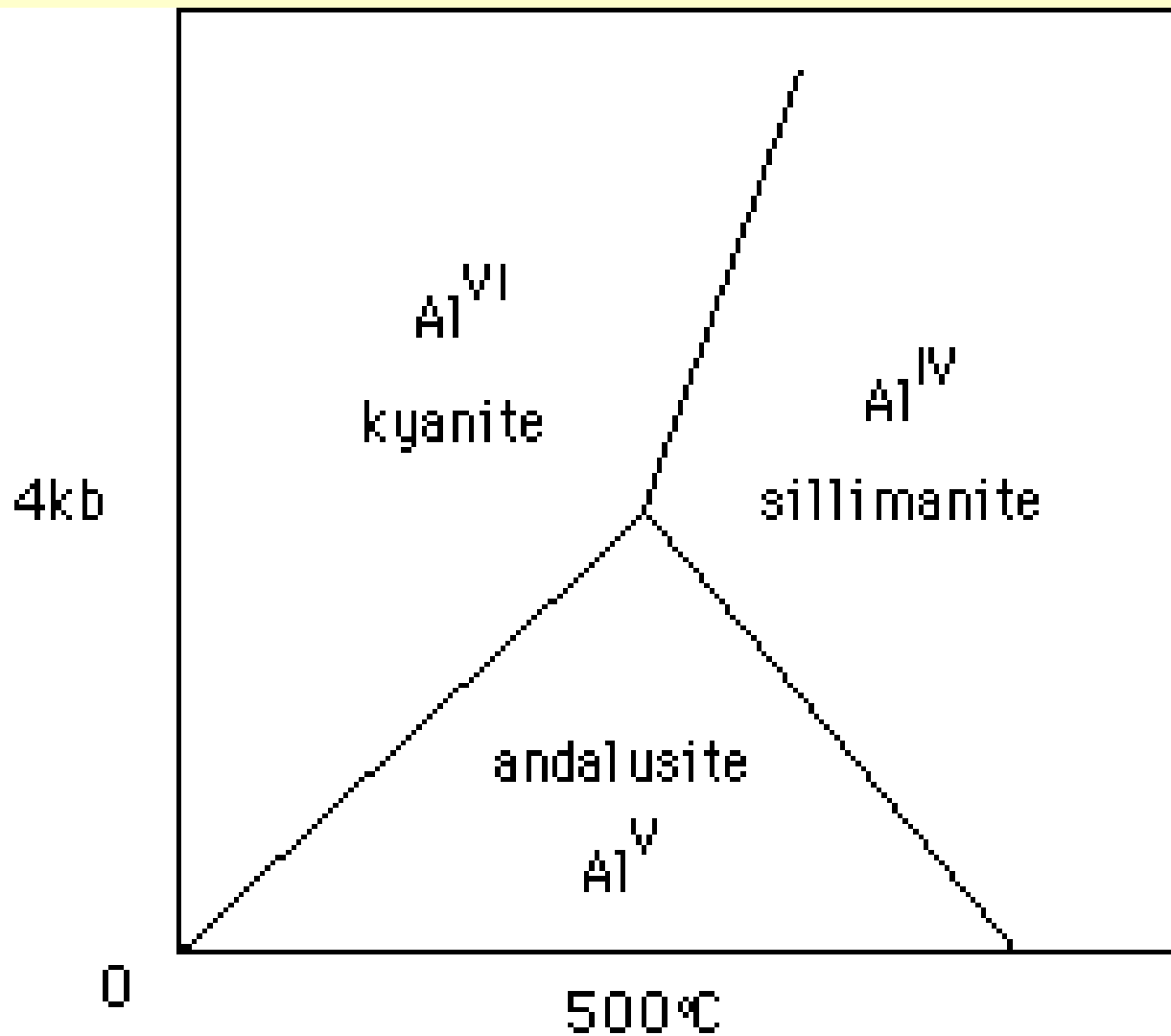
**Silimanite**

$\alpha = 1.653-1.611$   
 $\beta = 1.657-1.662$   
 $\gamma = 1.672-1.683$   
 $\delta = 0.018-0.022$   
 $\rho = 3230-3270$   
 $S_{\text{rel}} = 96.11$



**Kyanite**

$\alpha = 1.710-1.718$   
 $\beta = 1.719-1.726$   
 $\gamma = 1.724-1.734$   
 $\delta = 0.012-0.016$   
 $\rho = 3530-3670$   
 $S_{\text{rel}} = 83.76$



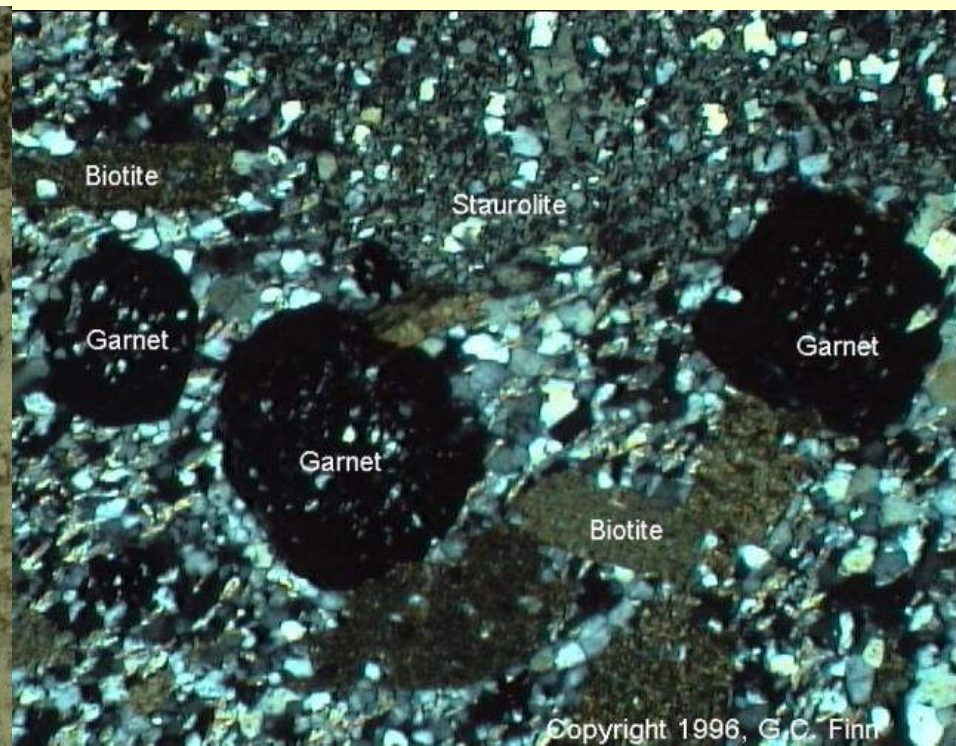
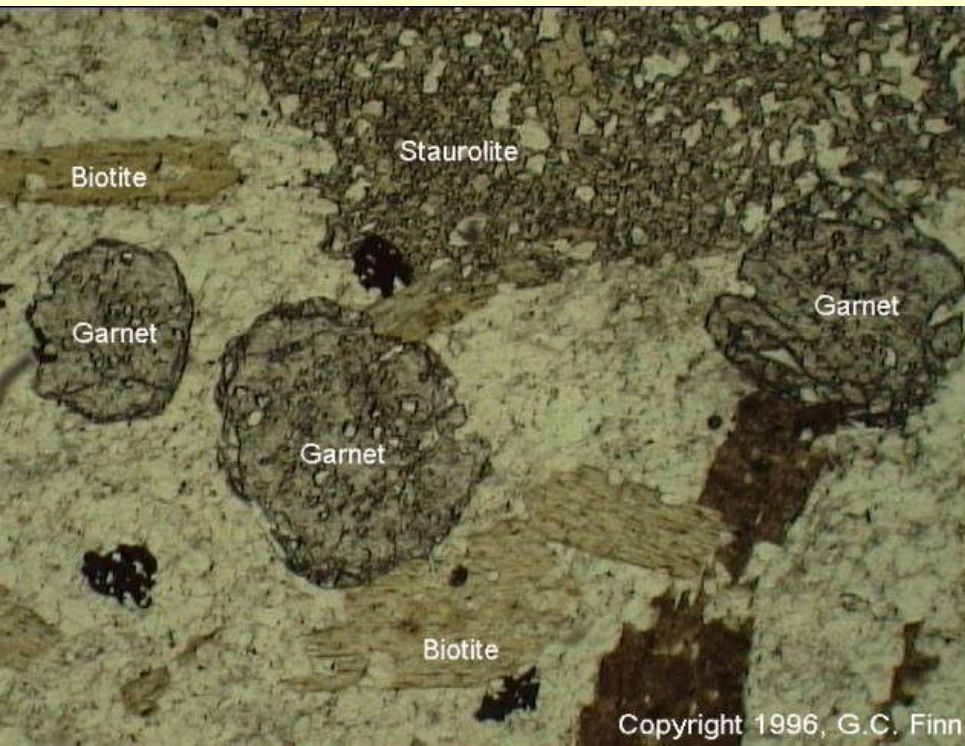
– Význam pro petrologii

Indikují PT podmínky vzniku horniny. Ukazují že v hornině je dostatek Al aby zde mohli vznikat i jiné hliníkem bohaté indexové minerály.

*Obr. Trojný bod minerálů  $Al_2SiO_5$  se podle většiny autorů pohybuje kolem 4 kb a 500  $^{\circ}C$ . Polovina atomů Al se vyskytuje v oktaedrické koordinaci s kyslíkem zatímco druhá polovina má koordinaci v jednotlivých modifikacích rozdílnou. U andalusitu je to pětičetná, u kyanitu je oktaedrická a u sillimanitu je to tetraedrická koordinace*

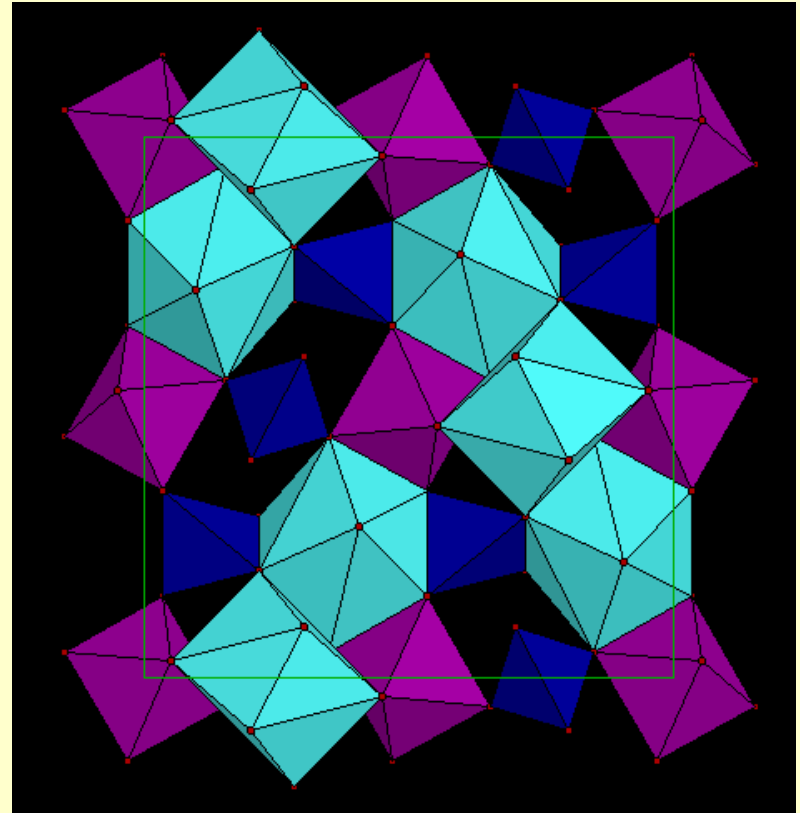
# GRANÁTY

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



# GRANÁTY

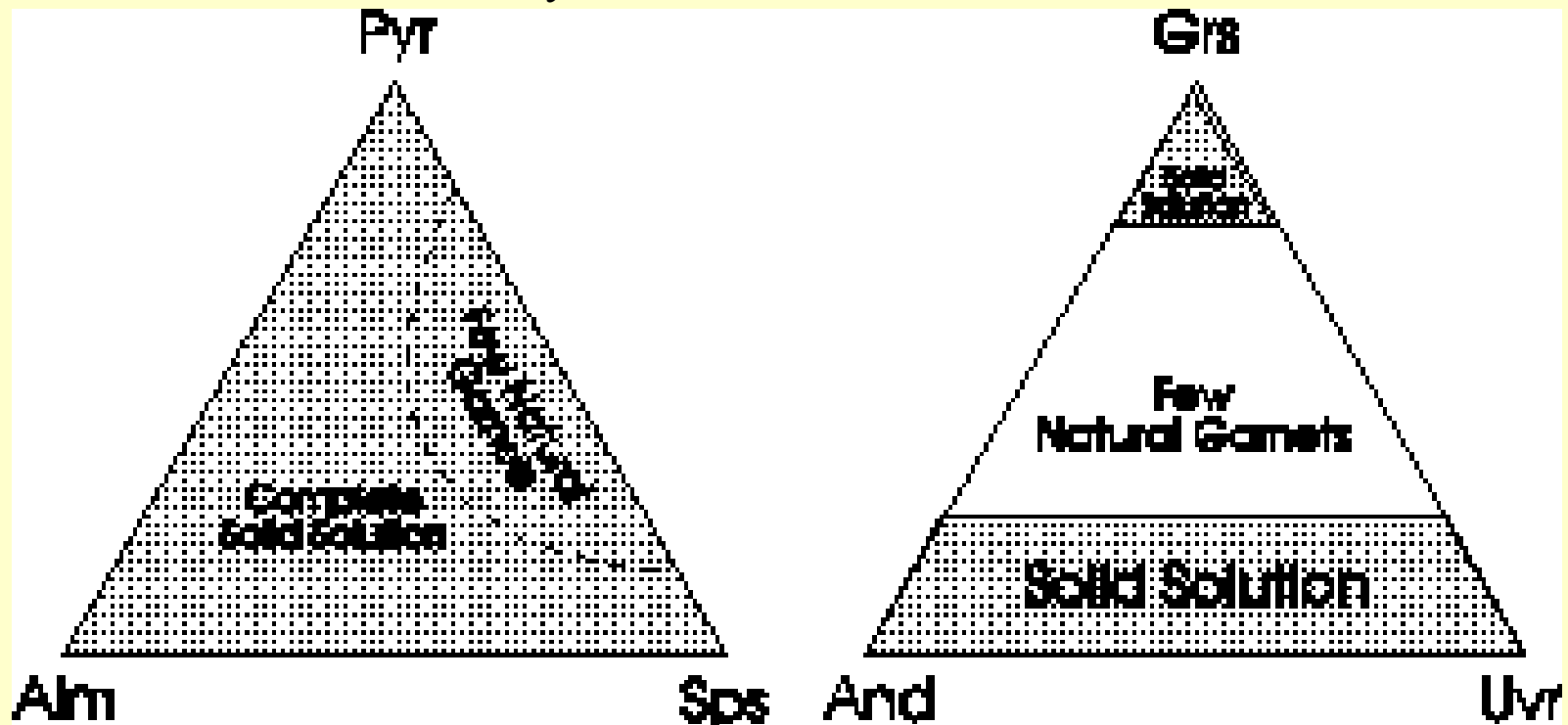
- Minerály této skupiny mají obecný vzorec  $A_3^{2+}B_2^{3+}[SiO_4]_3$ .
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, Fe<sup>2+</sup>, Mn, Ca
- Pozici B trojmocné kationty jako Al, Fe<sup>3+</sup>, Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.
- 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  $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$



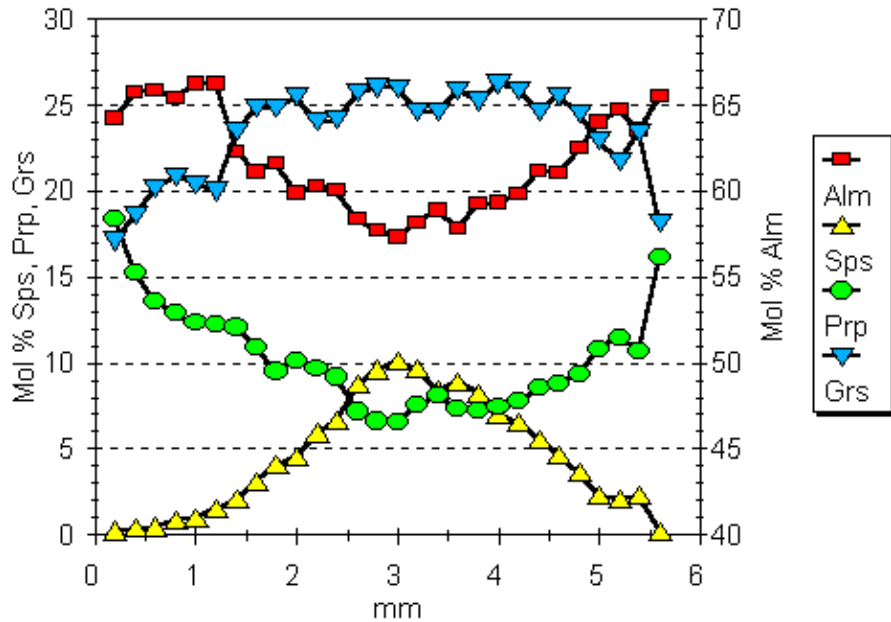
modré = Si, fialové = A, zelené = B

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

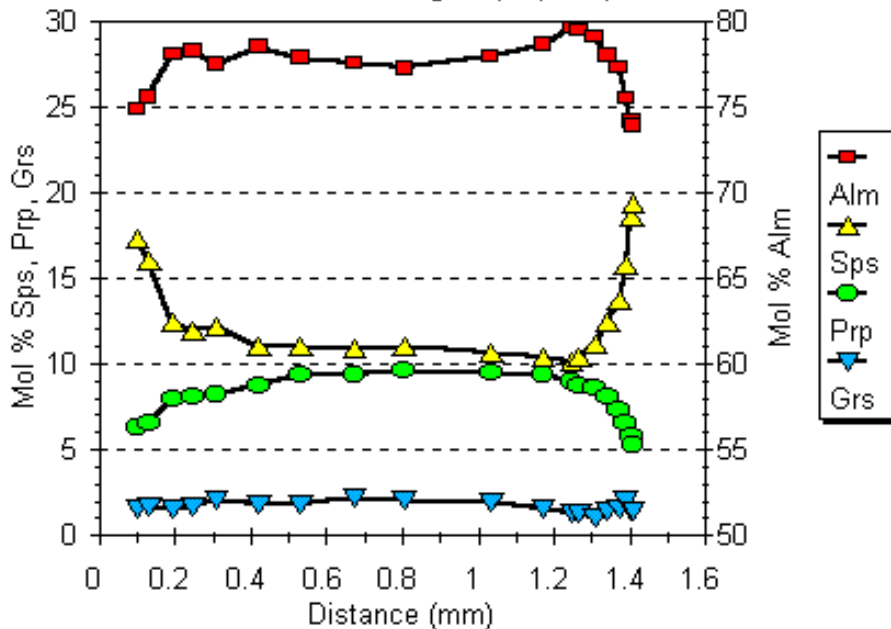
- Neomezená izomorfie existuje ve skupině pyrop-almandin-spessartin a ve skupině grosulár-andradit-uvarovit, mezi oběma skupinami je mísivost pouze omezená.
- **Pyrop** → kimberlity, peridotity případně serpentinity.
- **Almandin** → rul a svorů.
- **Spessartin** → granity a pegmatity nebo v metamorfitech bohatých na Mn.
- **Grosulár** → kontaktně a regionálně metamorfované vápenato-silikátové horniny.
- **Andradit** → železem bohaté kontaktně i regionálně metamorfované skarny.
- **Uvarovit** → hadce, dolomity a metamorfované Cu rudách.
- **Hibschit**  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$  → je to nerozšířenějším minerálem ze skupina hydrogranátů je znám z kontaktně metamorfovaných slínů.



**Suru Valley traverse**  
L429 Donara nappe



**Umasi La Traverse**  
ZD52 Malung Tokpo (MWD)



# Využití granátu v petrologii

## A) Zonálnost granátu

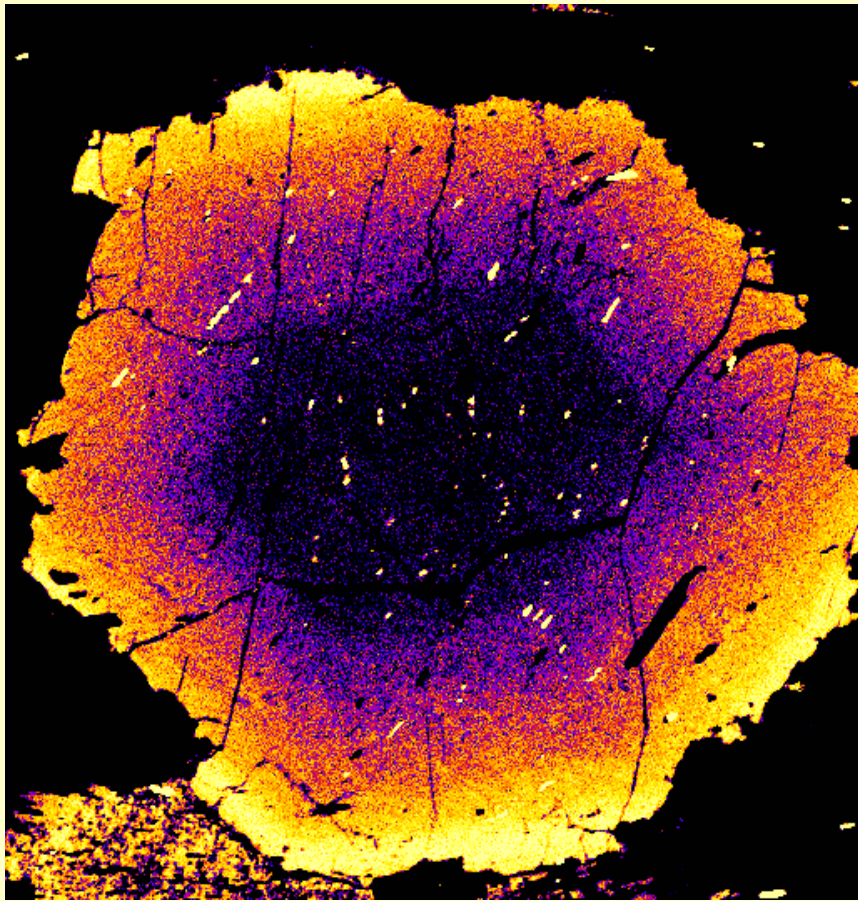
Dobrá mísivost jednotlivých granátových komponent umožňuje vznik zonálních zrn. Zonálnost může poskytnout informace o procesech jimiž hornina při růstu granátu ale i po skončení jeho růstu prošla.

Zonálnost dělíme na:

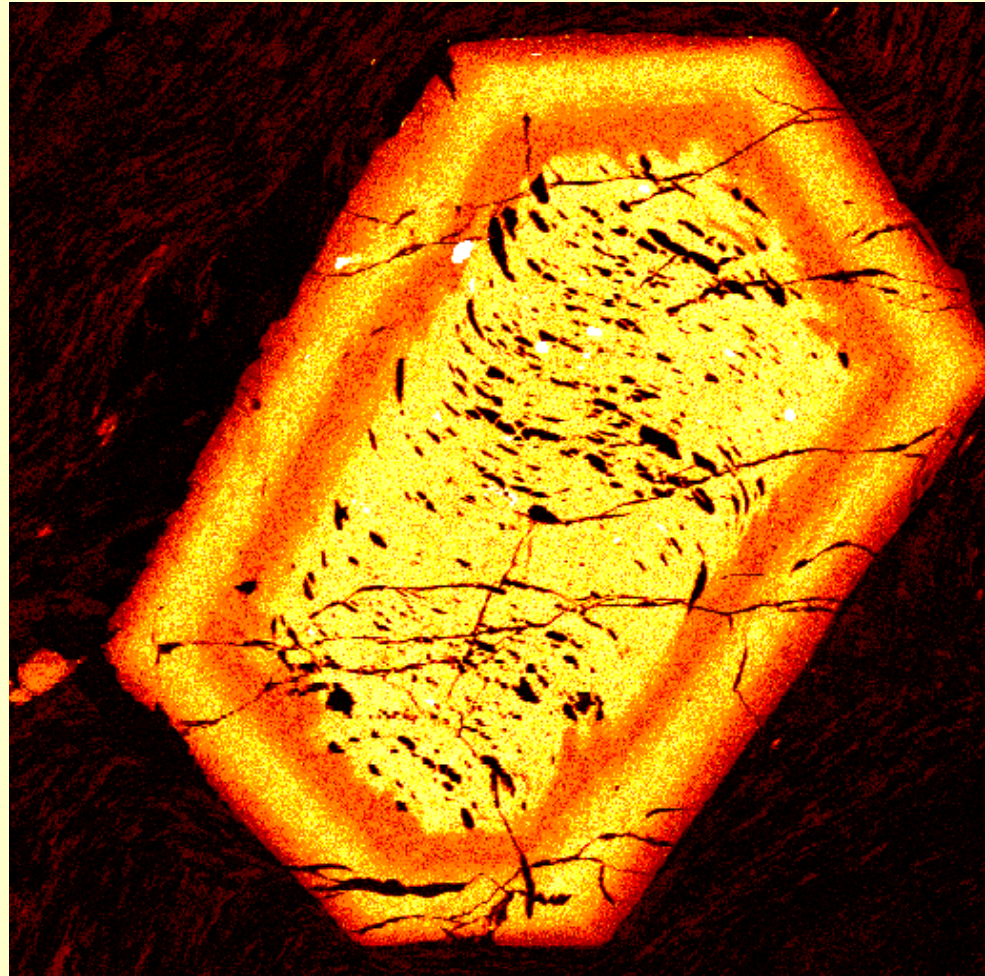
**1) Růstovou zonálnost** - Vzniká při růstu granátového zrna a odráží změny P-T podmínek nebo změny v chemizmu v blízkém okolí granátu

**2) Difúzní zonálnost** - Vzniká v granátu až po jeho vzniku díky difúzi. Procesy difúze se výrazněji projevují na malých zrnech a na zrnech z více metamorfovaných hornin (difúze roste exponenciálně s rychlostí s níž klesá teplota a proto se difúzní zonálnost výrazněji projevuje u hornin vyššího stupně metamorfózy než u hornin, které prošly jen metamorfózou nižšího stupně.

Zonálnost přírodních granátu je většinou výsledkem kombinace růstové a difúzní zonálnosti.



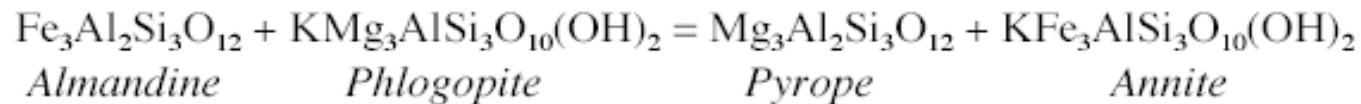
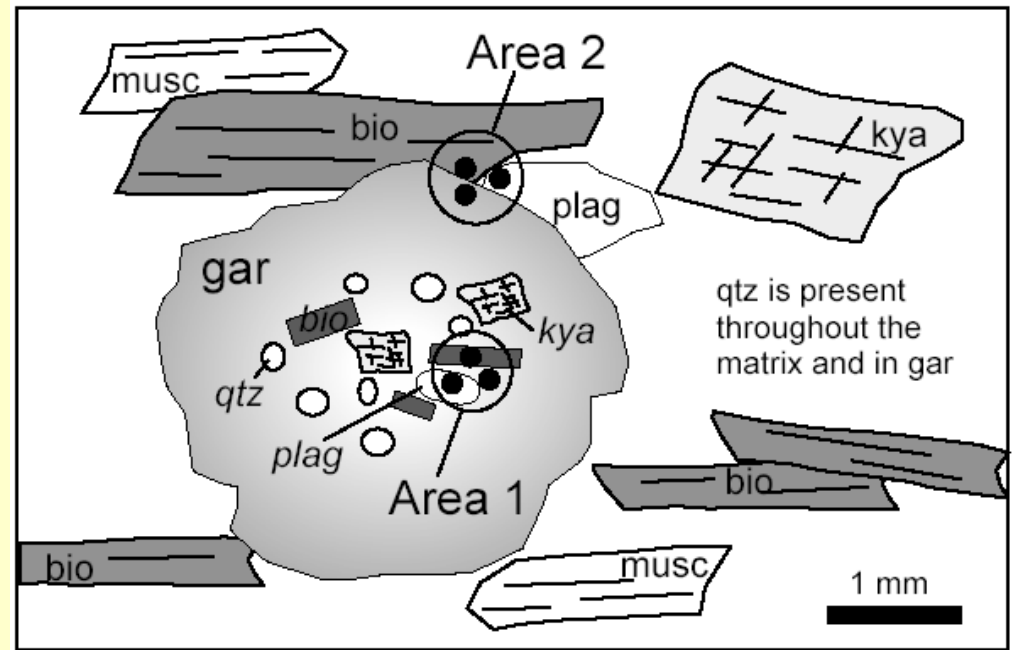
- 1) Mapa Ca-složky v automorfním prográdně rostoucím granátu.



- 2) Střední část zrna je tvořena Ca-bohatým jádrem s četnými inkluzemi které mají S-stavbu. Na toto jádro narůstá mladší granát.

## B) Geothermometry a geobarometry

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



This distribution is described by the following equation:

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

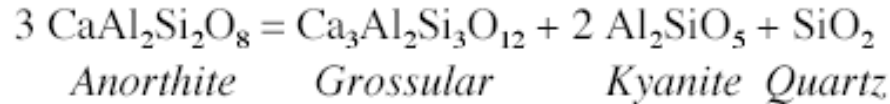
where

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

Use cation values, not oxides!!



# GASP barometr



This distribution is described by the following equation:

$$\ln K_{Ca}^{Gt-Pl} = \left( \frac{55,865}{R} \right) \frac{1}{T} - \frac{153.59}{R} + P \left( \frac{6.608}{R} \right) \frac{1}{T}$$

where

$$K_{Ca}^{Gt-Pl} = \frac{(a_{grs}^{Gt})}{(a_{An}^{Pl})^3}$$

$$a_{grs}^{Gt} = (\gamma_{grs}^{Gt} X_{grs}^{Gt})^3 = \left[ 1.03 \left( \frac{Ca}{Ca + Fe + Mg + Mn} \right)_{Gt} \right]^3$$

Use cation values!!

$$a_{An}^{Pl} = 1.35 (X_{Ca}^{Pl}) = 1.35 \left( \frac{Ca}{Ca + Na + K} \right)_{Pl}$$

$R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (gas constant)

$P$  is in bars, not kilobars!!

$T$  is in Kelvins, not °C!! Make sure you convert. Please present your results in °C.

*Please show all of your work so that I can follow each step.*

(Note: the activity terms are simplified forms that are approximately correct for the conditions of this problem; in reality, the  $\gamma$  values are themselves functions of composition and temperature).

# STAUROLIT

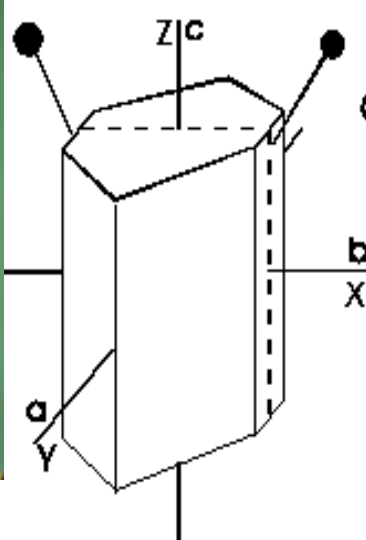
- monoklinický
- typický metamorfní minerál (hlavně metapelity)
- $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- $\text{Fe}^{2+}$  je v tetraedrické koordinaci a může být nahrazováno  $\text{Mg}^{2+}$  a  $\text{Zn}^{2+}$ .
- většina staurolitů má je bohatá Fe:  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,86 - 0,55$
- $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,09$  to  $0,28$
- Často se vyskytuje v malém množství Zn (až 0,7 apfu)
- devět kationtů  $\text{Al}^{3+}$  v oktaedrické pozici může být částečně nahrazeno  $\text{Fe}^{3+}$  nebo Ti,  $\text{Al}^{3+}$  může být až z 20% substituován  $\text{Fe}^{3+}$  nebo  $\text{Ti}^{4+}$  ( až 0.32 apfu Ti)
- substituce Ti v oktaedrické pozici bývá doprovázena substitucí  $\text{Al}^{3+}$  za  $\text{Si}^{4+}$  v tetraedrické pozici **AlSi = TiAl**

## Reakce produkující staurolit:

- chloritoid + quartz = staurolite + garnet
- chloritoid + chlorite + muscovite = staurolite + biotite + quartz + water
- dehydratační reakce 400-500 C

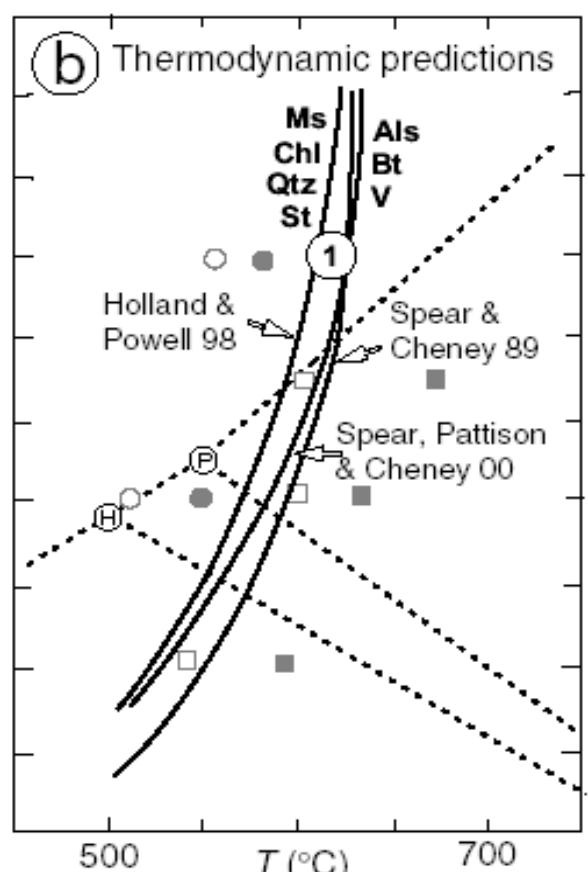
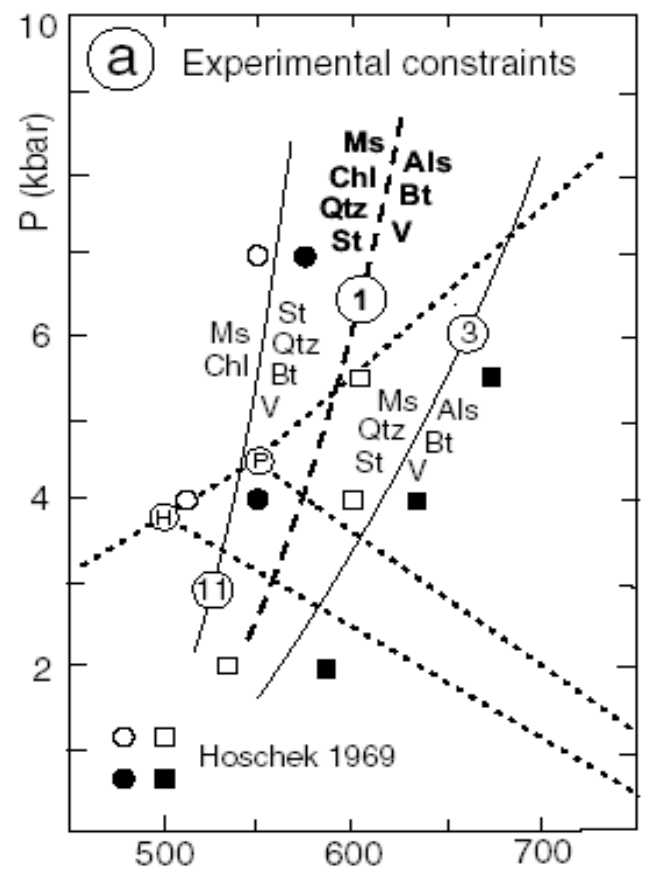
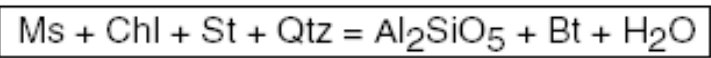
## Reakce konzumující staurolit:

- staurolite + muscovite + quartz = almandine + aluminosilicate + biotite + water
- okolo 700 C Mg staurolit je stabilní do vyšších teplot než Fe staurolit



**Staurolite**  
 Monoclinic  
 (pseudo-orthorhombic)  
 $\alpha$  1.736-1.747  
 $\beta$  1.740-1.754  
 $\gamma$  1.745-1.762  
 $\delta$  0.009-0.015  
 $2V$  80-90°

$\alpha$  = colorless  
 $\beta$  = pale yellow  
 $\gamma$  = golden yellow



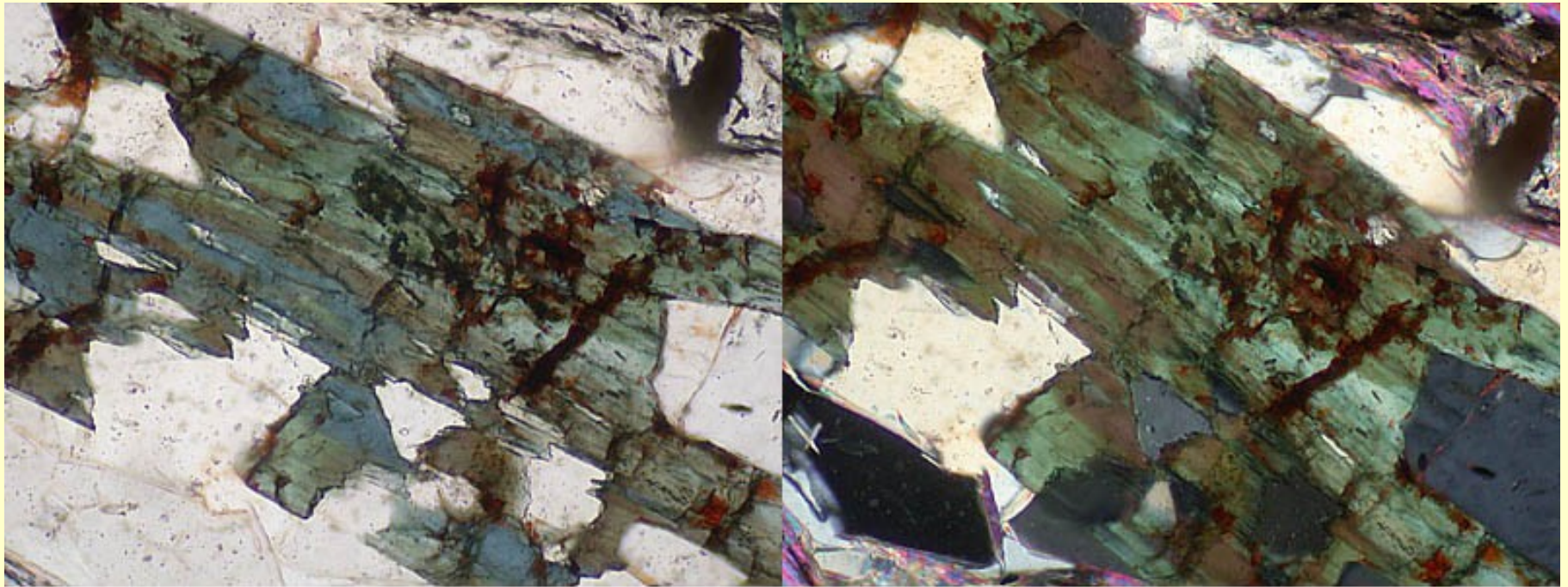
**FIGURE 3.** Experimental constraints (a) and thermodynamic constraints (b) on reaction 1, with the  $Al_2SiO_5$  phase boundaries for reference. The reaction positions in (a) are sketched in by eye. The Spear, Pattison, and Cheney (2000, unpublished) data base is discussed in Pattison et al. (2002). H = triple point and And = Sil curve of Holdaway (1971). P = triple point and And = Sil curves of Pattison (1992).

# Chloritoid

- $(\text{Fe,Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
- metapelity

**Vznik chloritoidu** ( $\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ ): Fe-chlorit + pyrofy lit = Fe-chloritoid + křemen +  $\text{H}_2\text{O}$

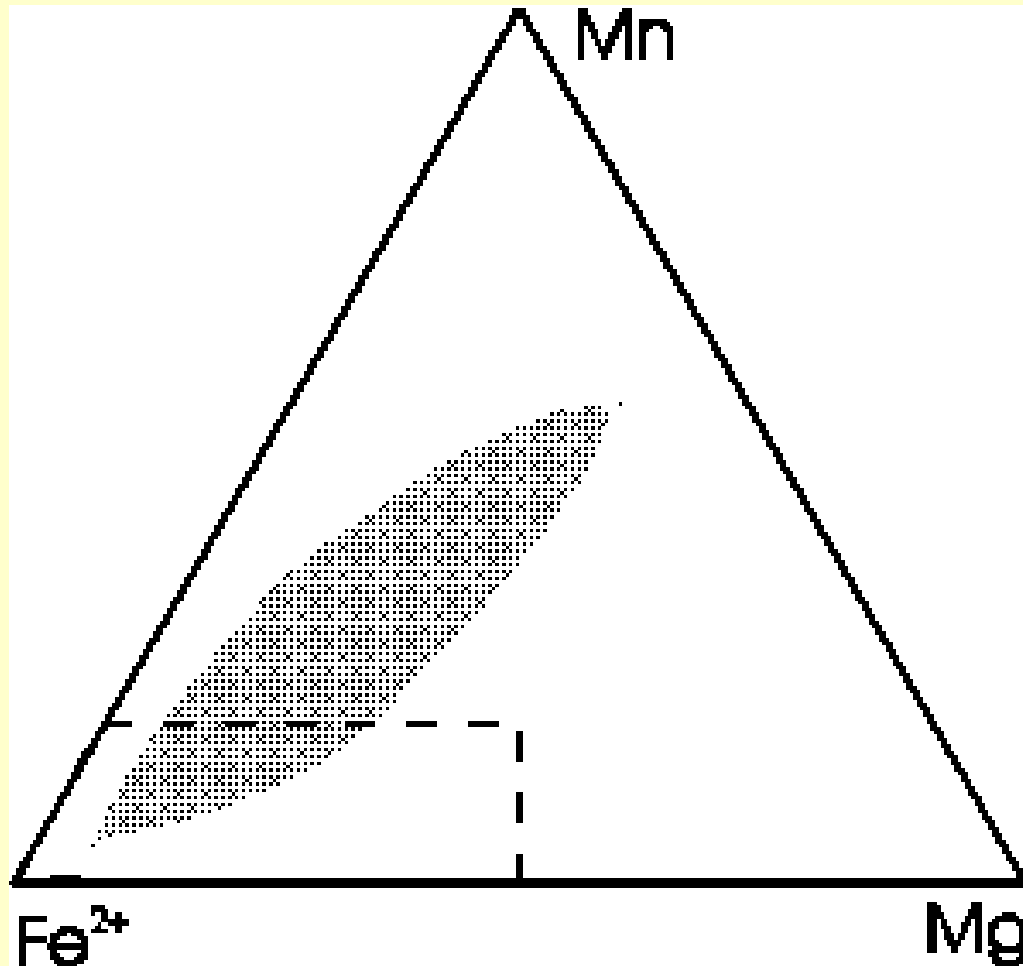
**Reakce konzumující chloritoid** ( $\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ ): chloritoid + biotit = granát + chlorit,  
Fe-chloritoid = Fe-staurolit + almandin +  $\text{H}_2\text{O}$  a chloritoid = granát + chlorit + staurolit +  $\text{H}_2\text{O}$



Chloritoid porphyroblast coexisting with quartz and white mica. Note its anomalous interference colours.

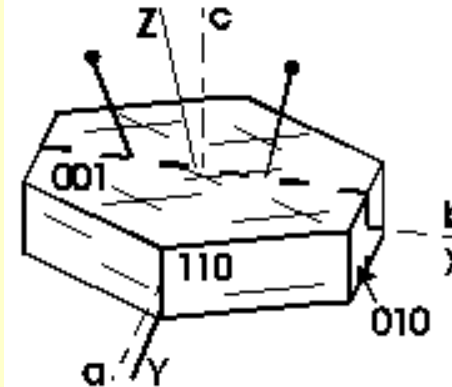
chloritoid bohatý železem a někdy také Mn je běžný v nížce metamorfovaných metapelitech (fylity) a to v asociaci chlorit, fengit a světlá slída bohatá na paragonitovou komponentou

ve svorech se chloritoid vyskytuje v asociaci St+Grt+Ms+Bt+Qtz



**Chloritoid**  $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn})_x (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_y \text{Al}_z \text{Si}_2 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$

Monoclinic or Triclinic (+) or (-)



$\alpha$  1.705-1.730  
 $\beta$  1.708-1.734  
 $\gamma$  1.712-1.740

$\delta$  0.005-0.022  
 $2V_\gamma$  37-124°

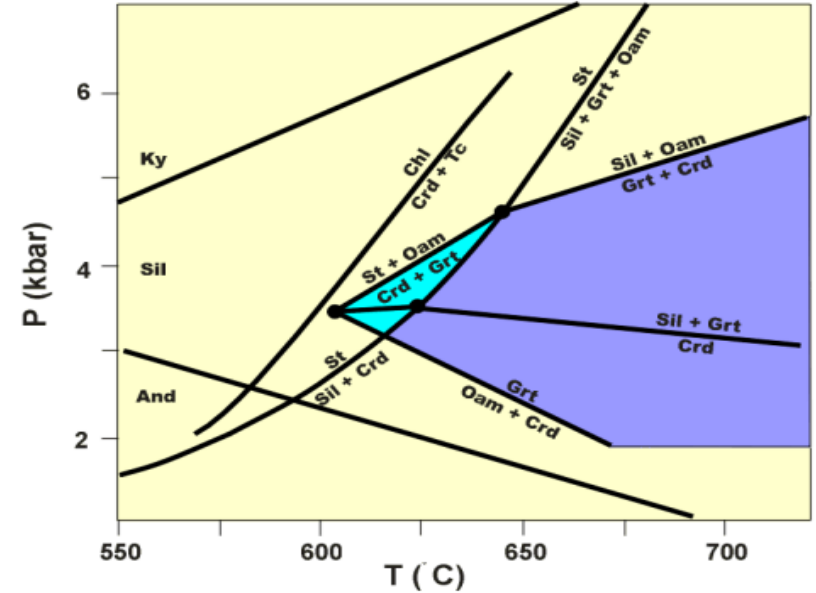
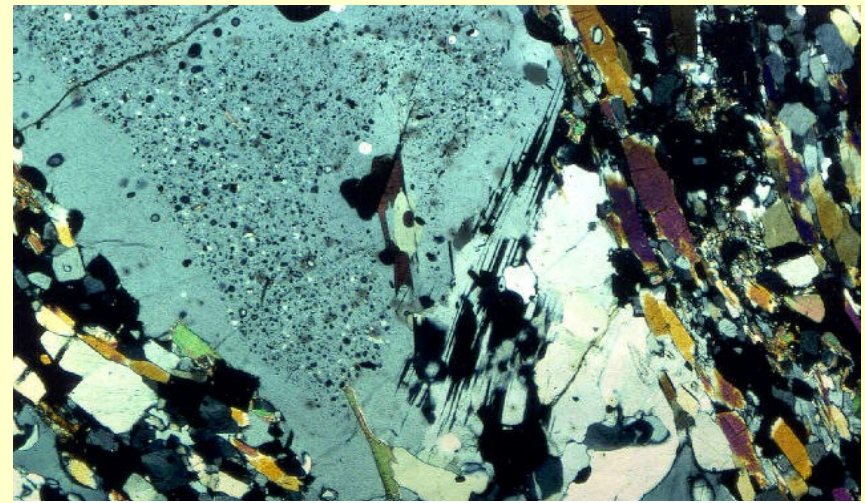
**Pleochroism**

$\alpha$  - pale gray green to green  
 $\beta$  - slaty blue to indigo  
 $\gamma$  - colorless to pale yellow

The ternary diagram at left is a plot of the variation in the Fe(2+), Mg and Mn contents of the Layer-1 octahedral sites. The shaded area illustrates the principle compositional variations in CHLORITOID as compiled by Fransolet (1978 - Bulletin Mineralogie v101, 548-557).

# 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 rohových, plodových břidlicích, v LP/HT regionálně metamorfovaných horninách (ruly, migmatity), v metasedimentech bohatých na ortoamfiboly (cordierit-antofylitické skaliny)



Metapelity (LP/HT)

*Vznik cordieritu*

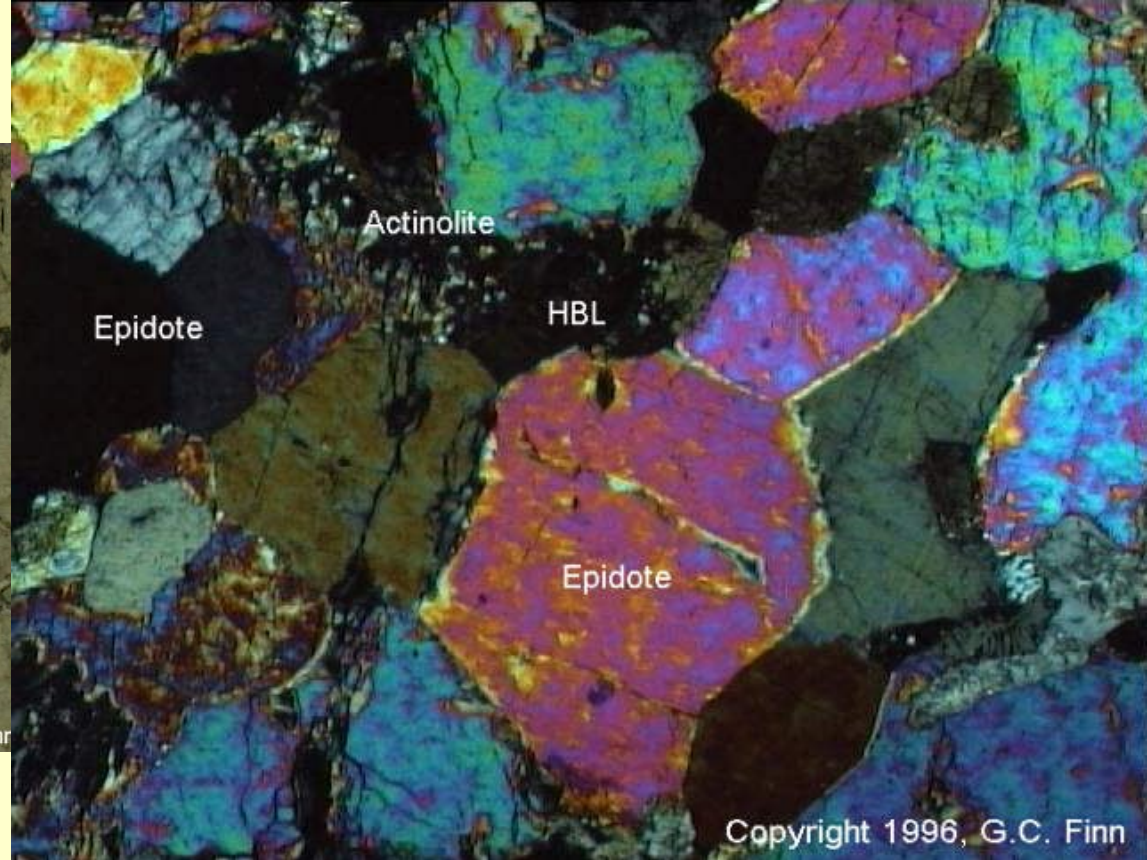
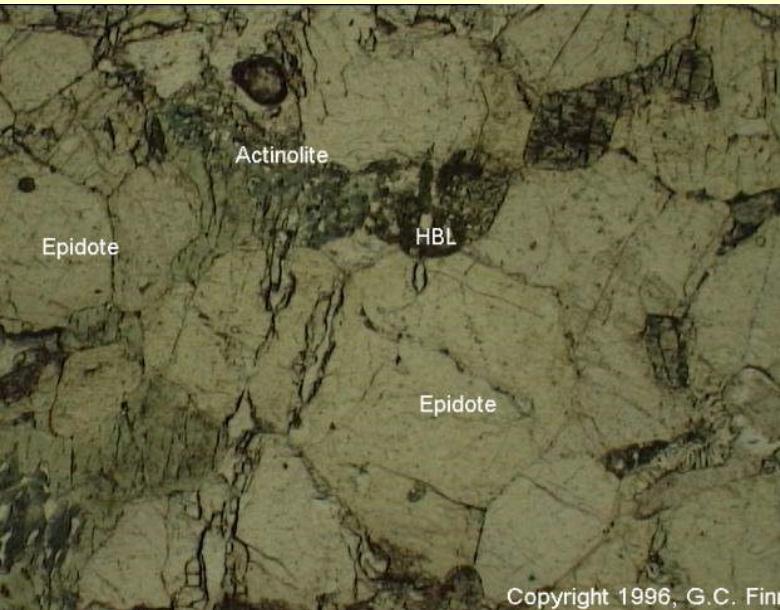
KMASH: flogopit + sillimanit = Mg-cordierit + muskovit

KMASH: flogopit + muskovit = Mg-cordierit + K-živec +  $\text{H}_2\text{O}$

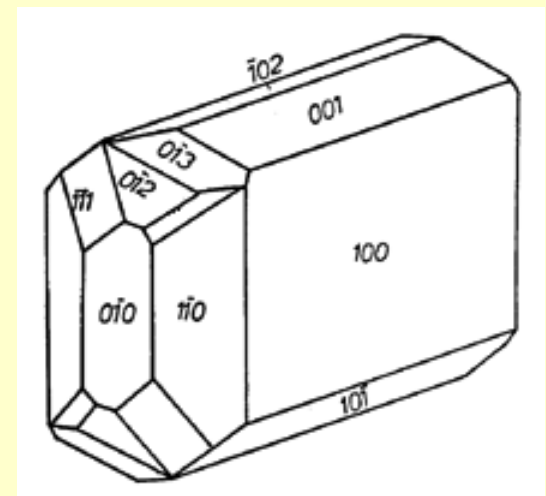
KFMASH: biotit + sillimanit = granát + cordierit +  $\text{H}_2\text{O}$

PT mřížka pro metasedimenty bohaté ortoamfibolem, Hudson a Hart (1992)

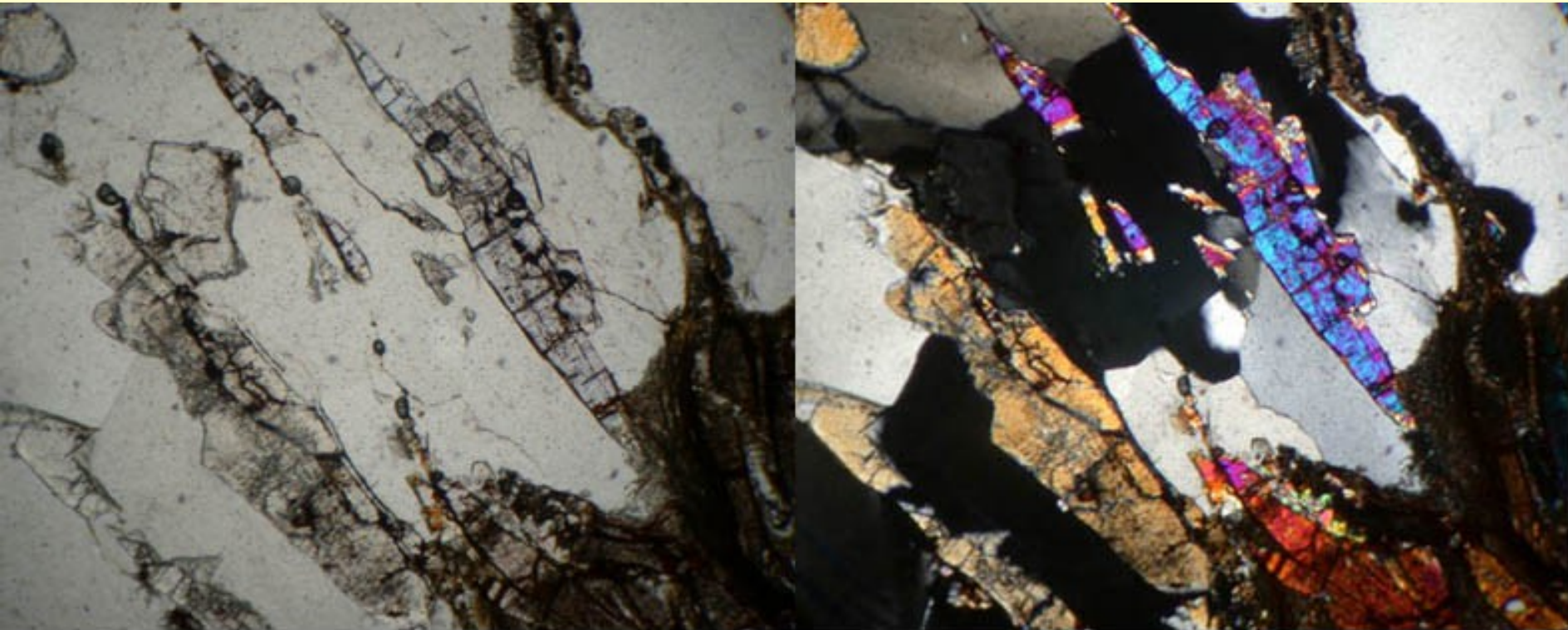
# Skupina epidotu



- 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



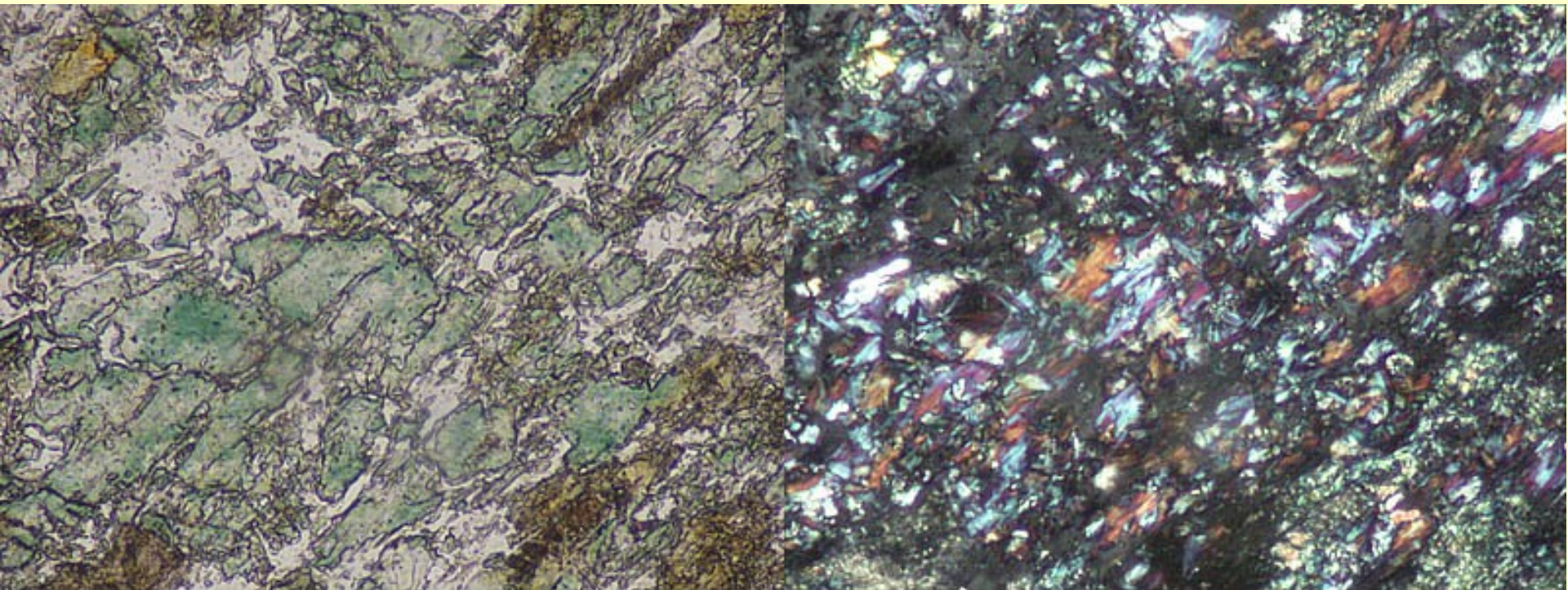
- **Lawsonit**
- Sorosilikát
- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$
- Výskyt: metabazity



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).

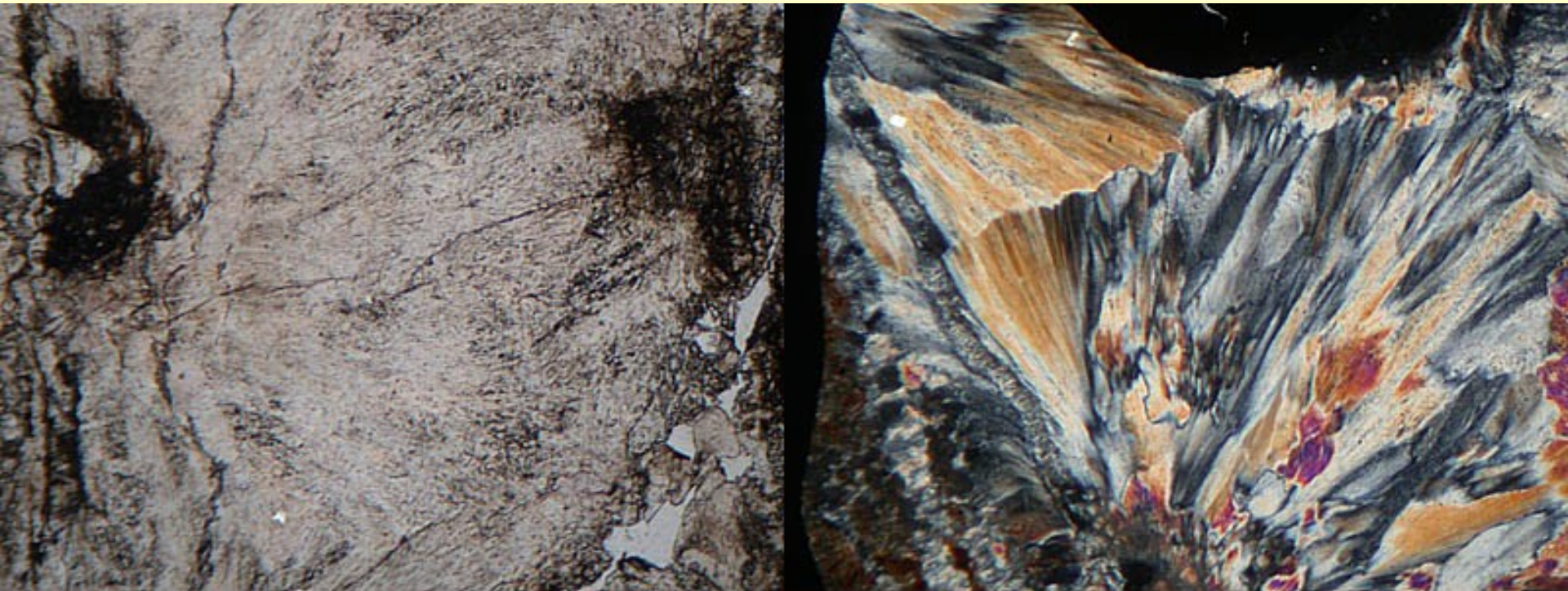


- **Pumpellit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})(\text{Al, Fe})_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$
- Výskyt: metabazity



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

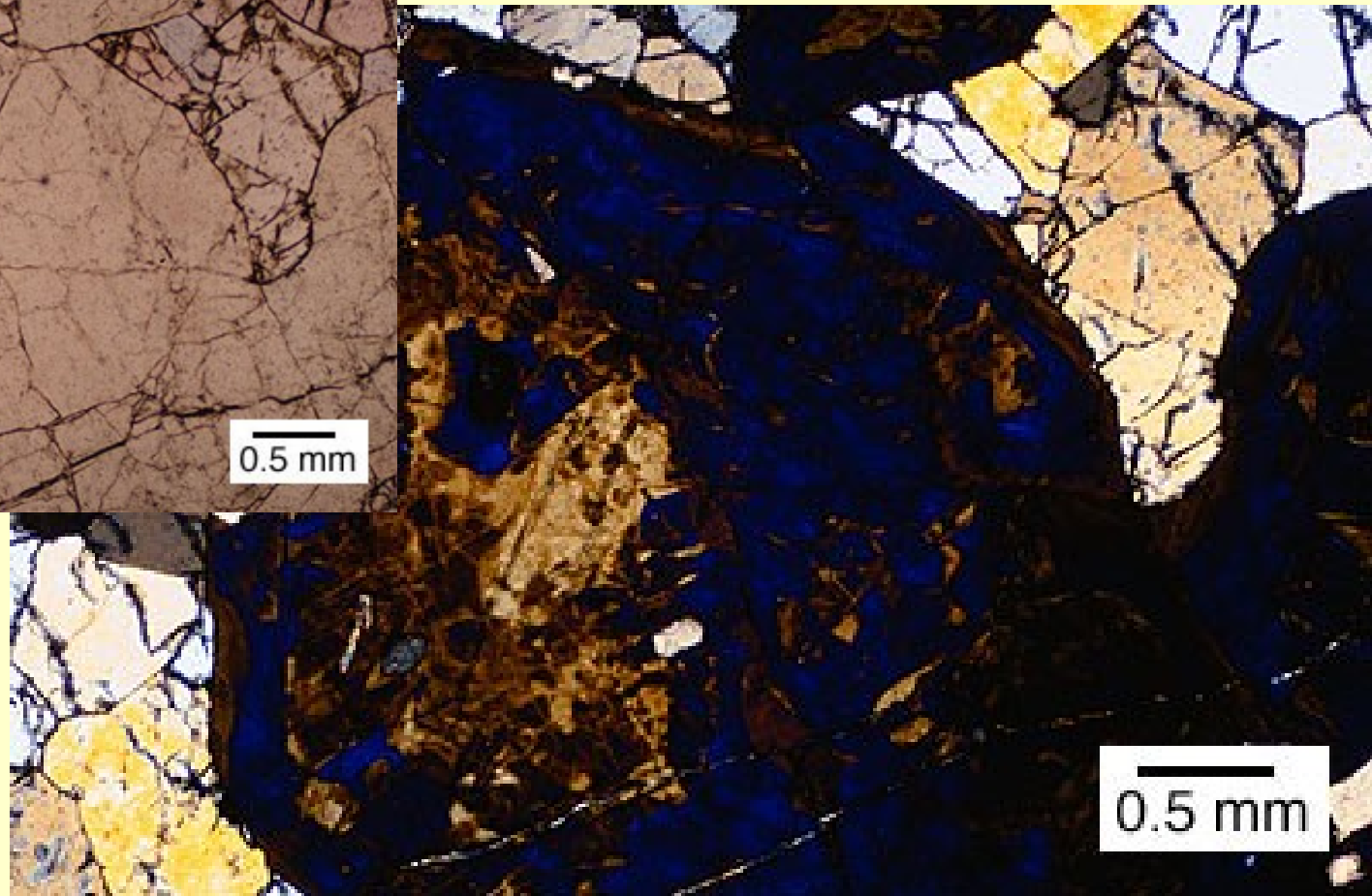
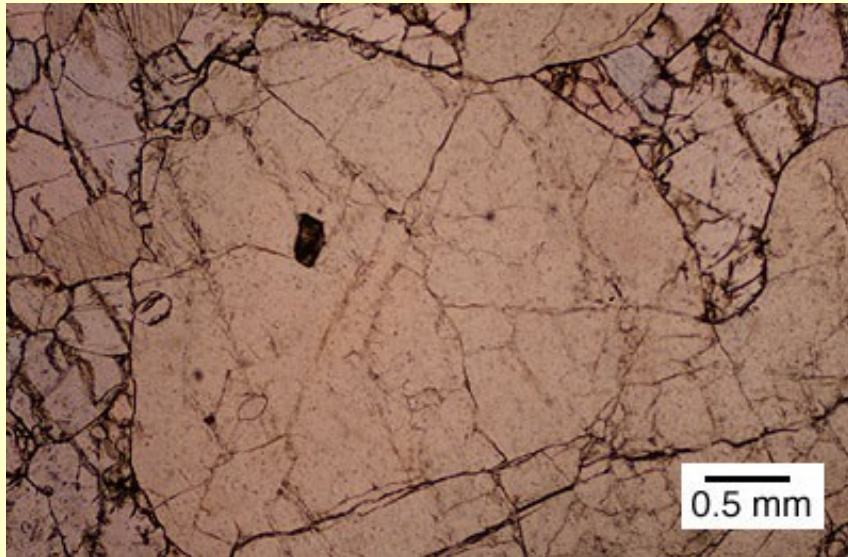
- **Prehnit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Výskyt: metabazity



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 $\text{CaMgSiO}_4$

Ca → M2 (velký ion)

ve vysoce metamorfovaných karbonátech s příměsí silikátů.

The diagram shows the chemical formula  $\text{M}_2\text{TO}_4$  at the top. Two lines branch downwards from the formula. The left line points to the text "6-fold Octahedral ( $\text{O}_6$ ) Sites". The right line points to the text "4-fold Tetrahedral Site ( $\text{T}_4$ )".

$\text{M}_2$	T	NAME	Cation	r (Å)
Mg Mg	Si	Forsterite	$\text{Mg}^{2+}$	0.72
Fe Fe	↓	Fayalite	$\text{Fe}^{2+}$	0.78
Mn Mn		Tephroite		
Ca Mg		Monticellite	$\text{Mn}^{2+}$	0.83
Ca Fe		Kirschsteinite		
Ca Mn		Glaucochroite	$\text{Ca}^{2+}$	1.00

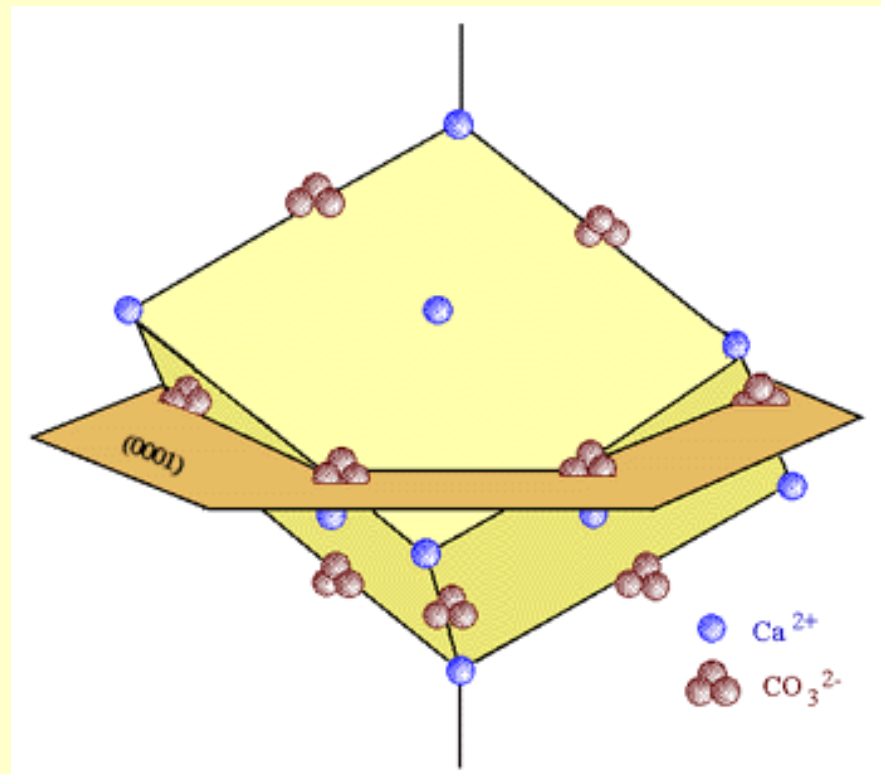
# UHLIČITANY

- **KALCIT**  $\text{CaCO}_3$ , 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**  $\text{MgCO}_3$ , trigonální
- Vždy obsahuje něco příměsí Mn, Ca či Fe.
- Vytváří samostatnou horninu. Nebo může být přítomen v dolomitických mramorech.

## **DOLOMIT** $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ , trigonální

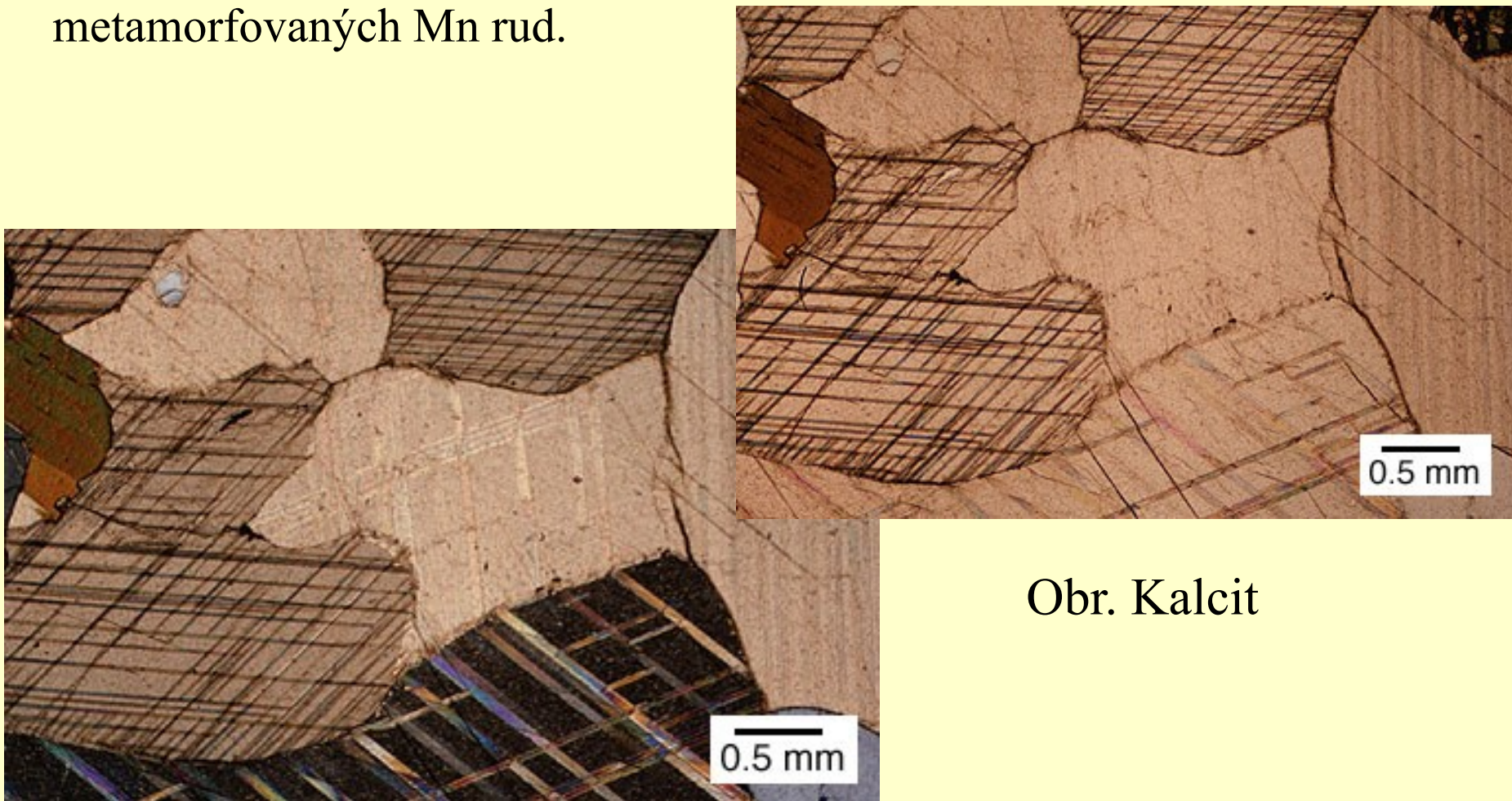
Chemicky je to podvojný uhličitán ve kterém se poměr mezi atomi Ca a Mg pohybuje kolem hodnoty 1:1.

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



Obr. Struktura kalcitu

- **SIDERIT**  $\text{FeCO}_3$  trigonální
- Část Fe může být zastoupena Mn nebo Ca či Mg.
- **ANKERIT**  $\text{Ca Fe}(\text{CO}_3)_2$  trigonální
- **RODOCHROZIT**  $\text{MnCO}_3$  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 pojmout 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

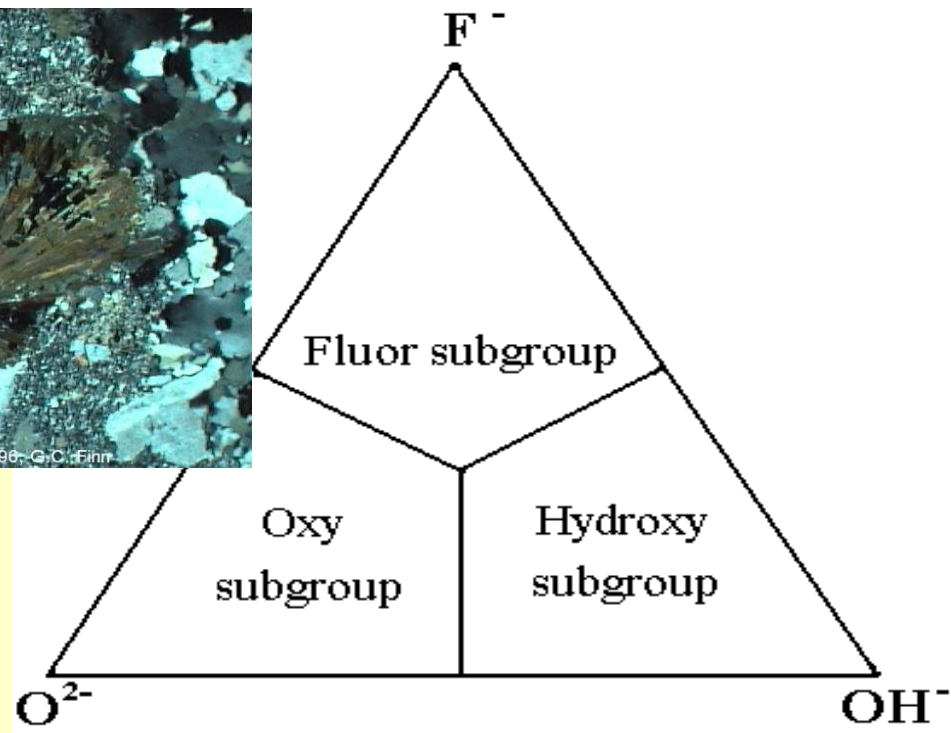
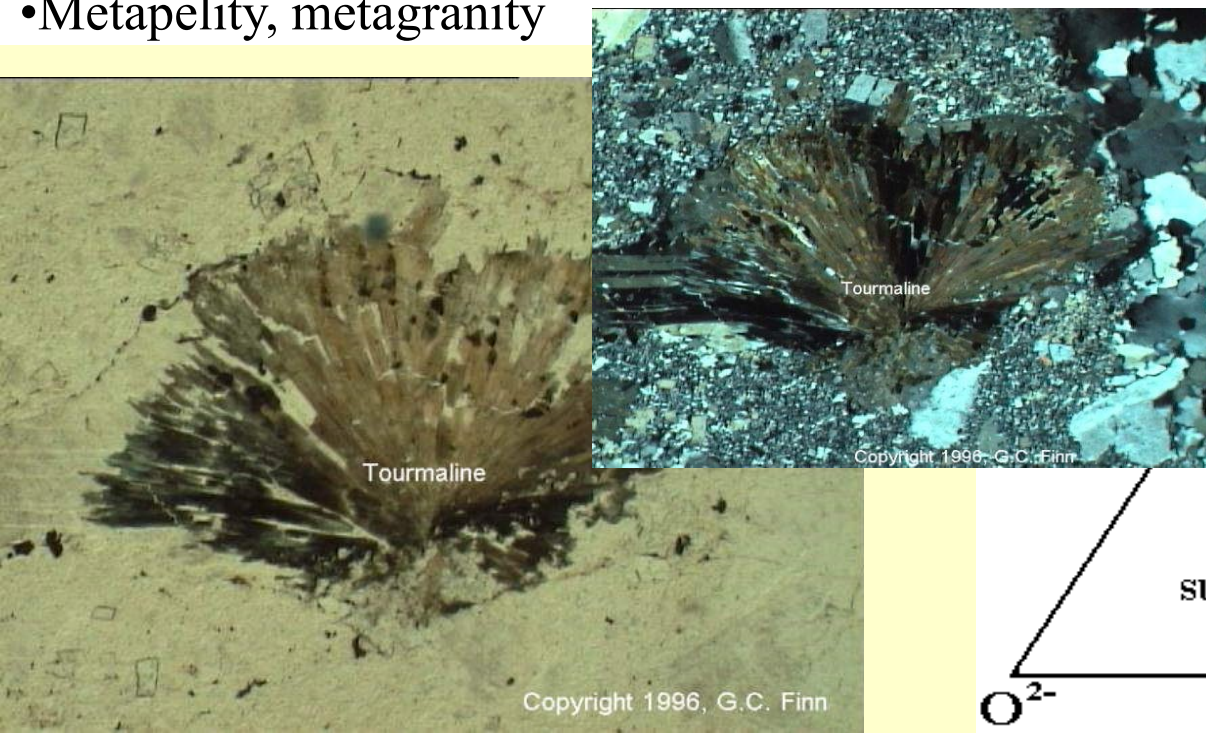
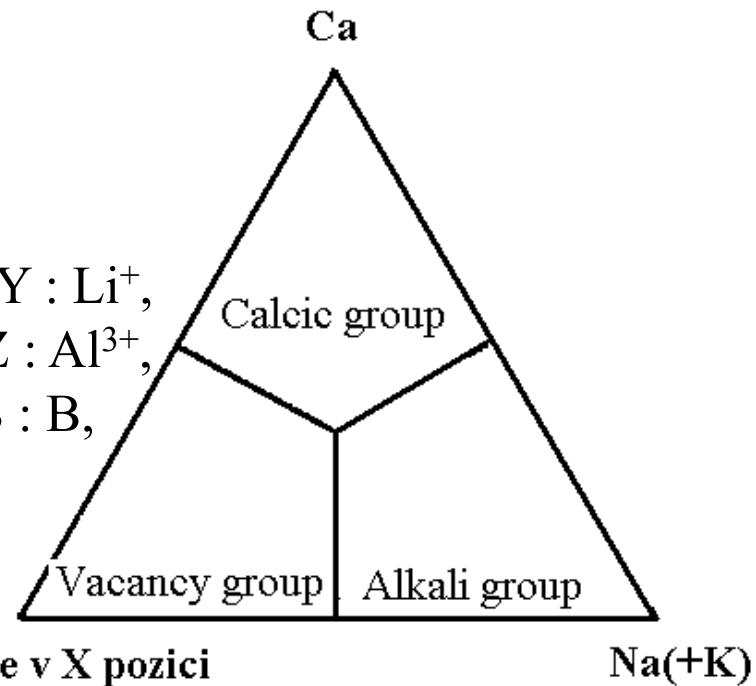
- Hexagonální minerály s podobnou strukturou
- **Korund  $Al_2O_3$**  - akcesorie v Al bohatých metamorfitech
- **Hematit  $Fe_2O_3$**  - součást metamorfovaných Fe-rud a jako akcesorie v bazických horninách
- **Ilmenit  $FeTiO_3$**  - akcesorie hlavně v bazických horninách a metapelitech. Fe je často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



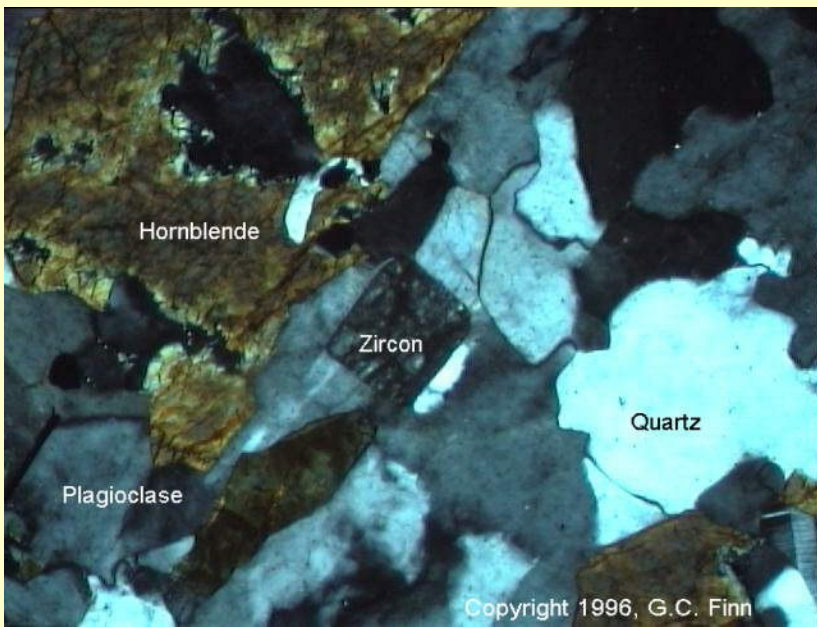
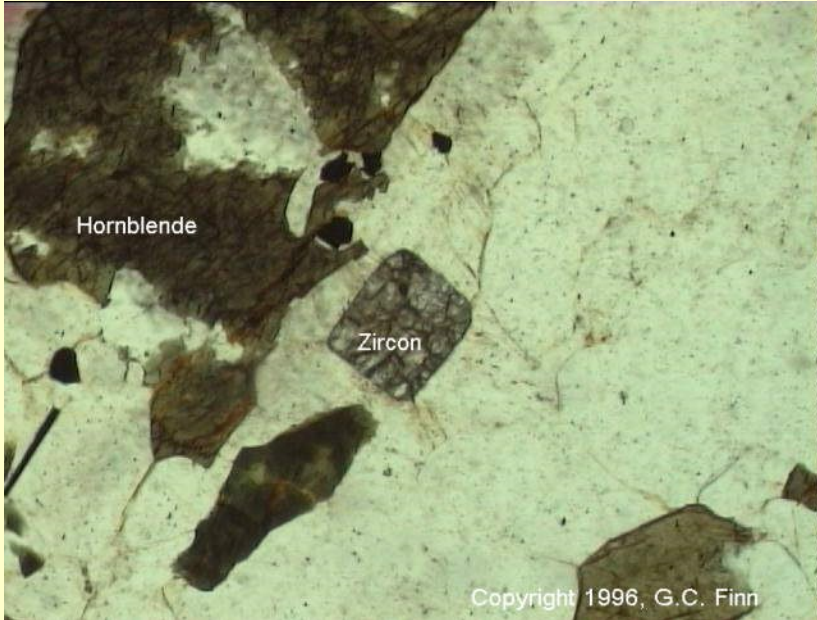
# B) SILIKÁTY

## Skupina turmalínu

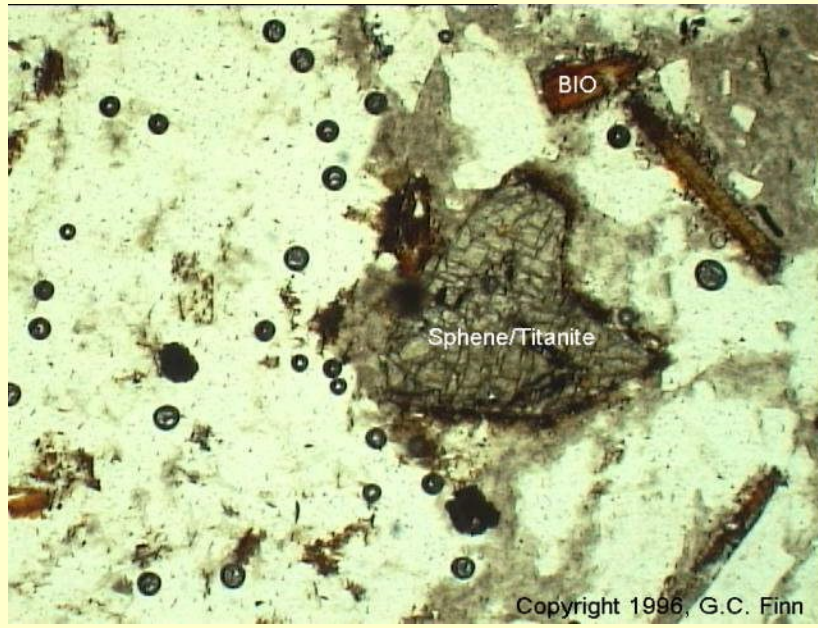
- Chemický vzorec  $X Y_3 Z_6 [ T_6 O_{18} ] [ BO_3 ]_3 V_3 W$
- pozice X může být obsazena:  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ; pozice Y :  $Li^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$ ; pozice Z :  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ; 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  $Zr(SiO_4)$**

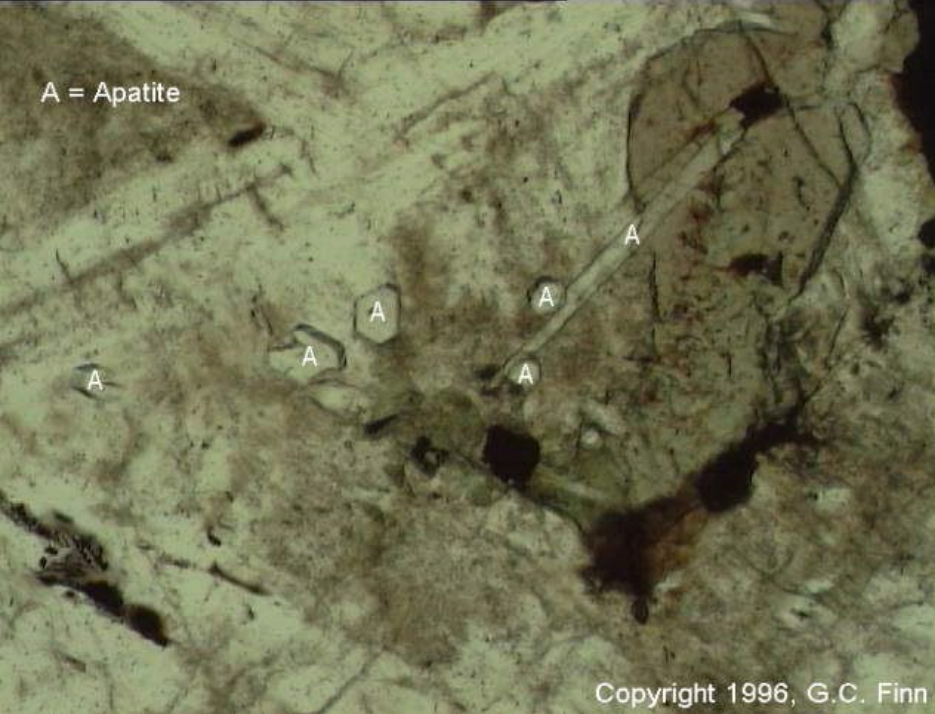


**Titanit  $CaTi(O/SiO_4)$**

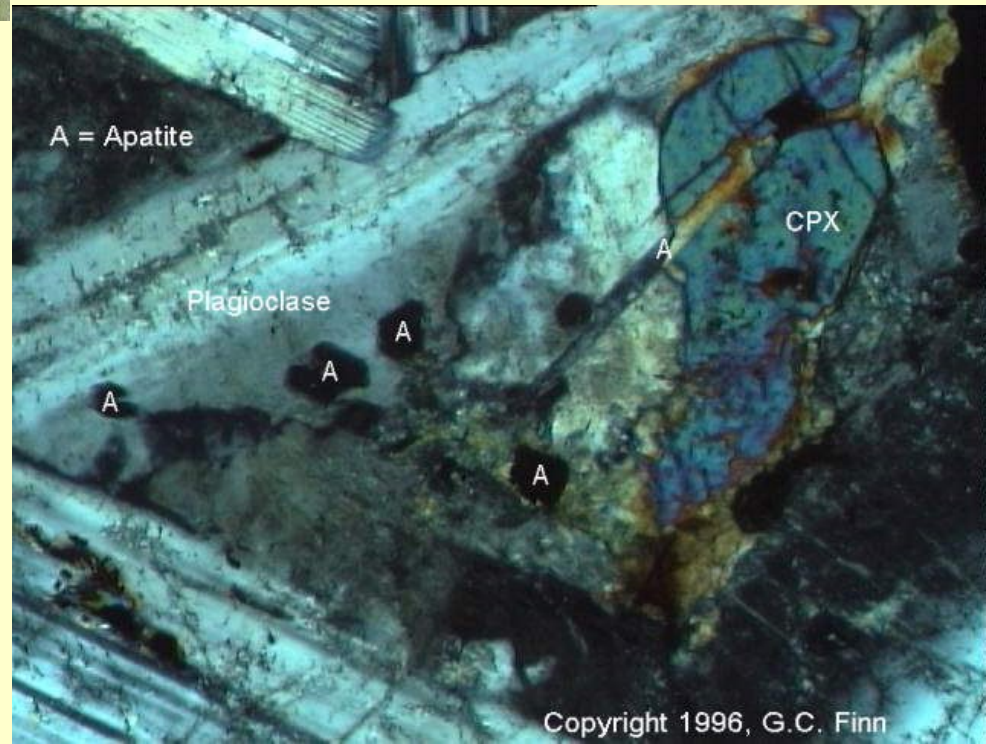


# C) Fosfáty

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

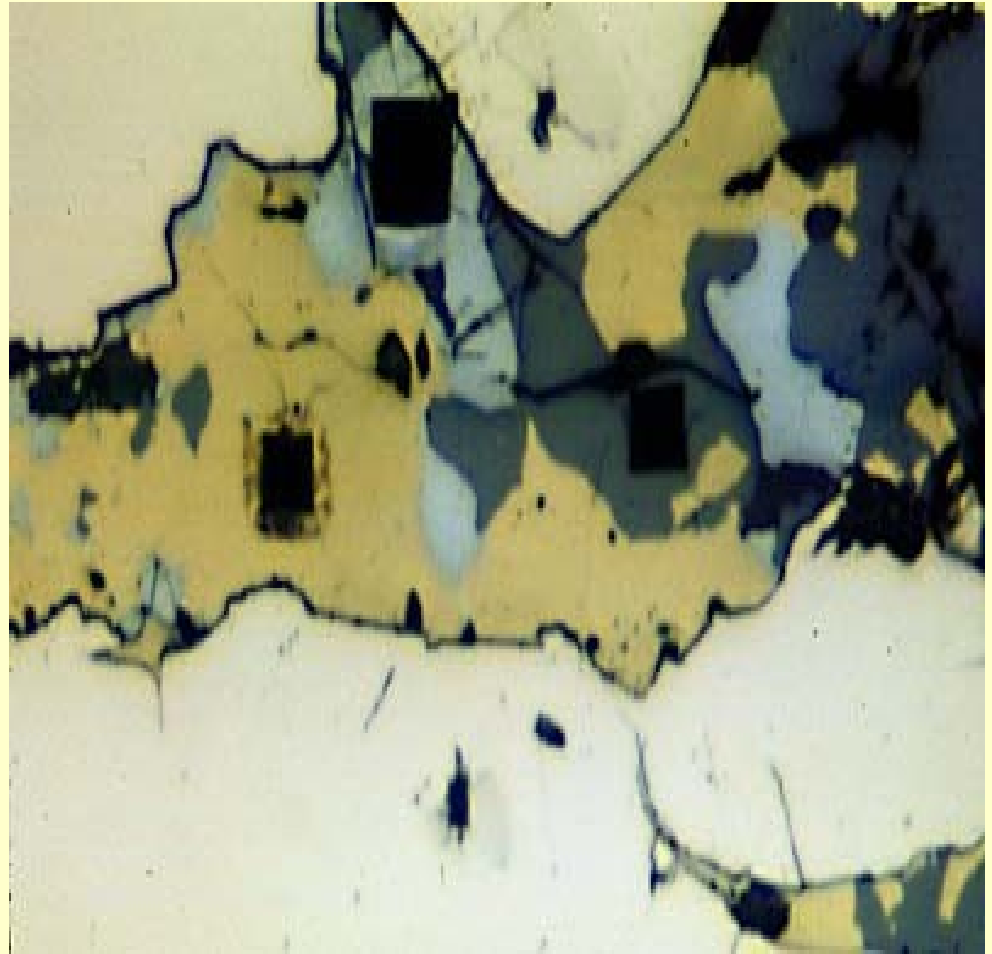


Monazit, xenotim



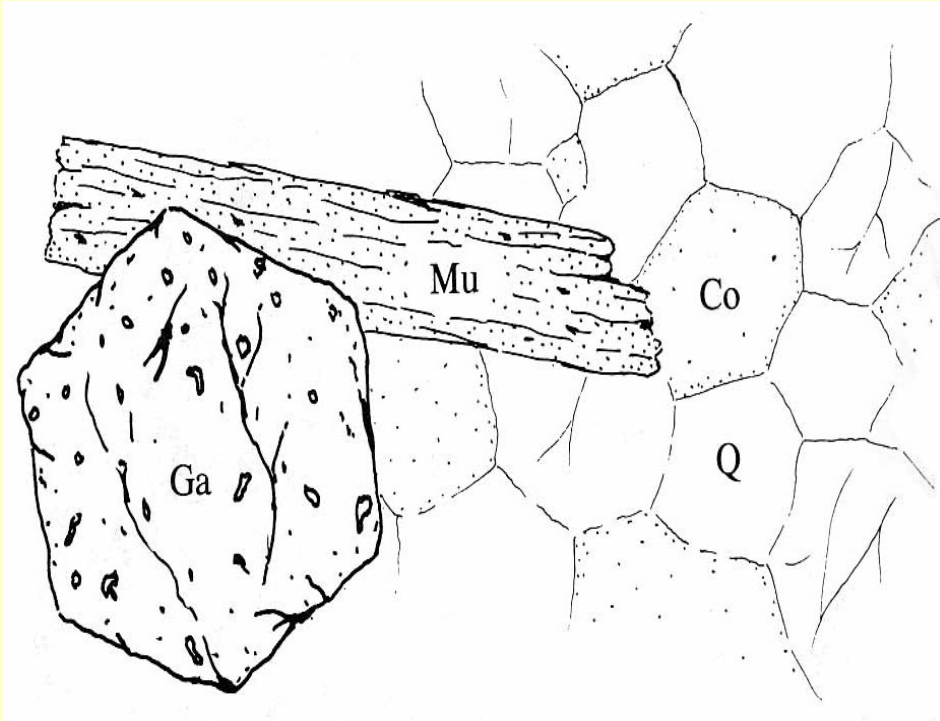
## D) Sulfidy

- **Pyrrhotin**  $\text{FeS}$
- **Pyrit**  $\text{FeS}_2$
- **Pentlandit**  $(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$
- **Chalkopyrit**  $\text{CuFeS}_2$



Pyrit , chalkopyrite, sfalerite a galenit

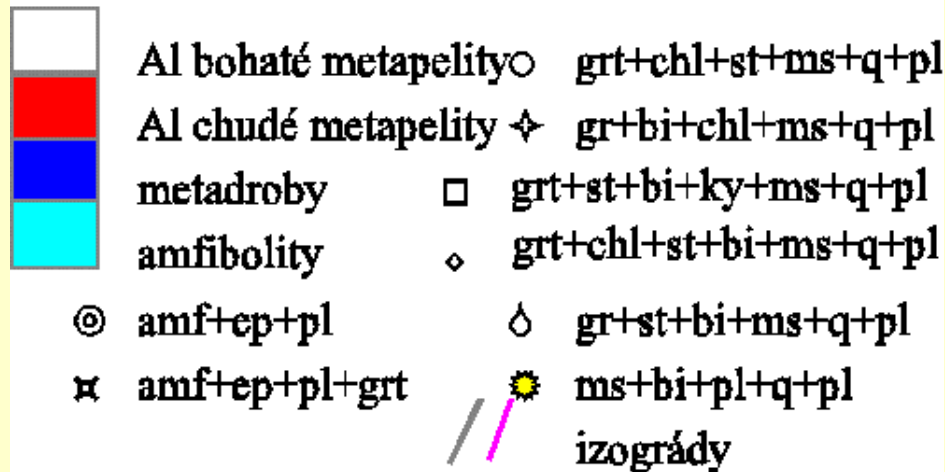
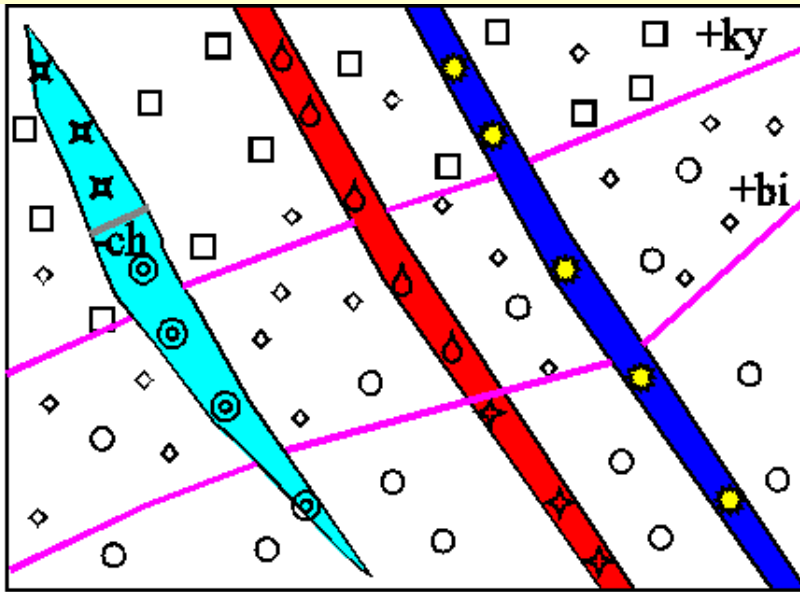
# Krystalizační síla



- *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

# Metamorfnní zóny



- Vyčleňování metamorfnních zón je založeno na sledování výskytu indexových minerálů v terénu.
- Spodní hranice metamorfnní zóny je na mapě znázorněna spojnicí bodů prvního výskytu indexového minerálu.
- Svrchní hranice je omezena podobnou čarou, která spojuje místa výskytu následujícího indexového minerálu.
- Indexový minerál většinou přetrvává do vyšších stupňů metamorfózy než je jeho zóna.
- Linie které jednotlivé zóny oddělují nazýváme izogrady.

# 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): Metamorfnní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfnní petrologii