

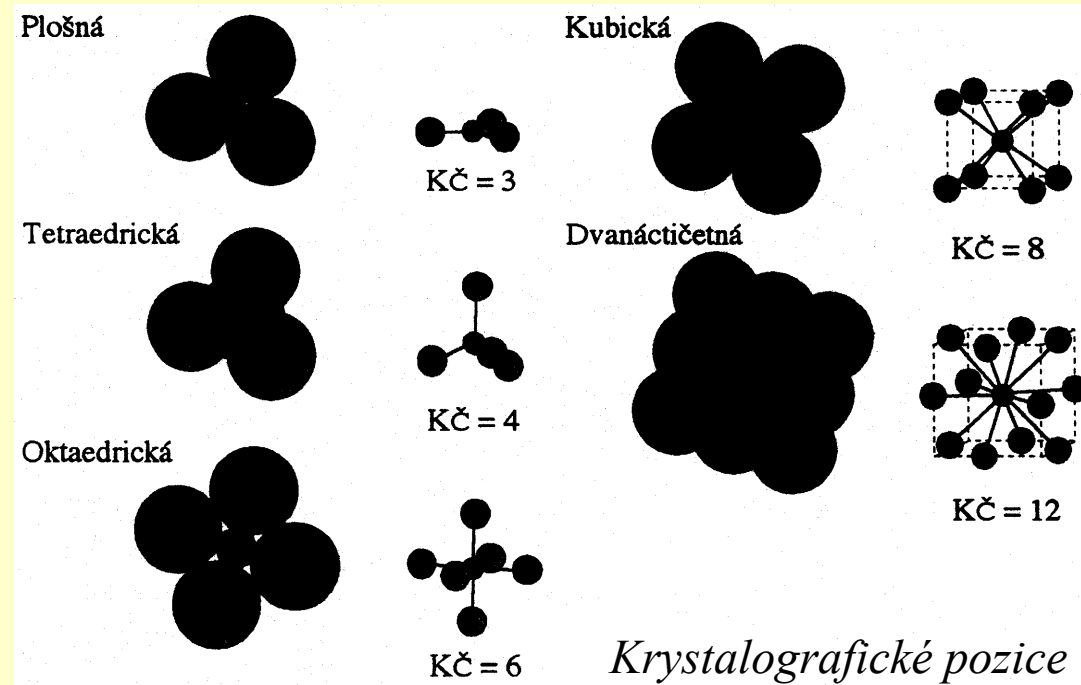
Metamorfizní petrologie I

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)

min.	koncové členy	substituční vektory
olivín	forsterit Mg_2SiO_4 \longleftrightarrow fayalit Fe_2SiO_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 $\text{Ca}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)(\text{Al}_2\text{Si}_6)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	${}^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+} \text{IV}\text{Si}^{4+} \longleftrightarrow {}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} \text{IV}\text{Al}^{3+}$ (tschermak exchange)
slídy	muskovit $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ \longleftrightarrow phengit $\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	${}^{\text{VI}}\text{Al}^{3+} \text{IV}\text{Al}^{3+} \longleftrightarrow {}^{\text{VI}}\text{Mg}^{2+} \text{IV}\text{Si}^{4+}$ (inverse tschermak exchange)

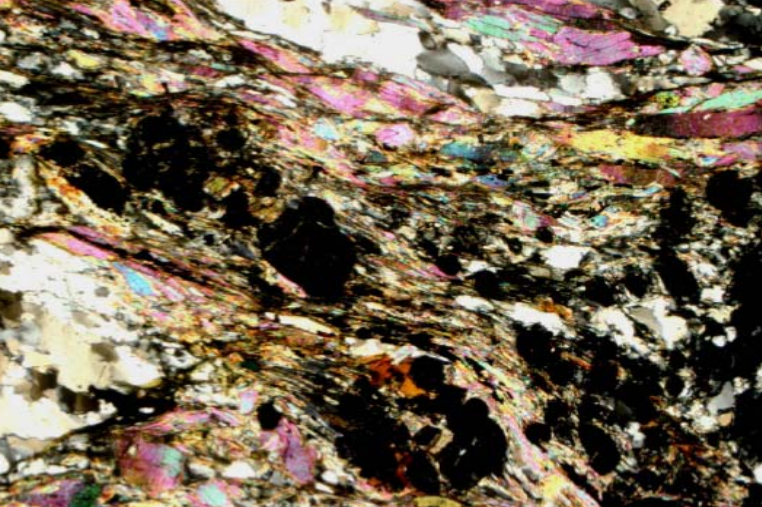
SYMBOLS FOR ROCK- AND ORE-FORMING MINERALS

→ 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	Ccl	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	kornerupine
Apy	arsenopyrite	Coe	coesite	Gln	glaucophane	→ Ky	kyanite
Asp	aspidolite	→ Crd	cordierite	Gt	goethite	Ltp	latrappite
Aug	augite	Crn	corundum	Gft	graftonite	Lmt	laumontite
Brt	barite	Cv	covellite	Gdd	grandidierite	Lws	lawsonite
Bet	betafite	Crs	cristobalite	Gr	graphite	Lpd	lepidolite*
Brl	beryl	Cum	cummingtonite	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

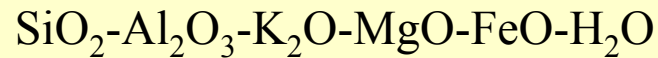
Mkt	magnesiokatophorite	→	Opx	orthopyroxene*		Rdn	rhodonite	→	Tlc	talc	
Mrb	magnesioriebeckite		Osm	osumilite	→	Rt	rutile		Tap	tapiolite	
Mgs	magnesite		Pg	paragonite		Sa	sanidine		Tep	tephroite	
Mgt	magnetite		Prg	pargasite		Spr	sapphirine		Thm	thomsonite	
Mcl	manganocolumbite		Pct	pectolite		Sar	sarcopside	→	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 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, pyrofylyt
- 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)
-

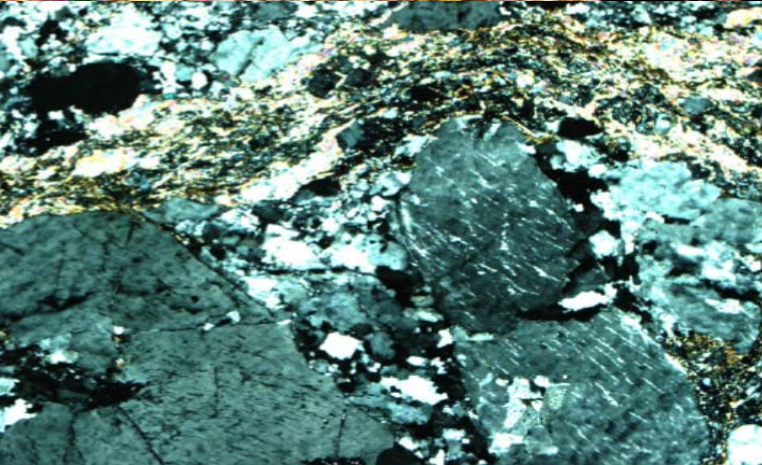
Minerály metapelitů a ortorul



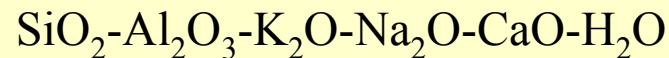
Metapelite (fyllit, svor, rula)



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



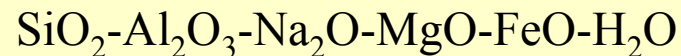
Křemen-živcové horniny (ortoruly)



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 SiO₂-Al₂O₃-K₂O-CaO-MgO-H₂O

Metakarbonáty MgO-CaO-CO₂-H₂O

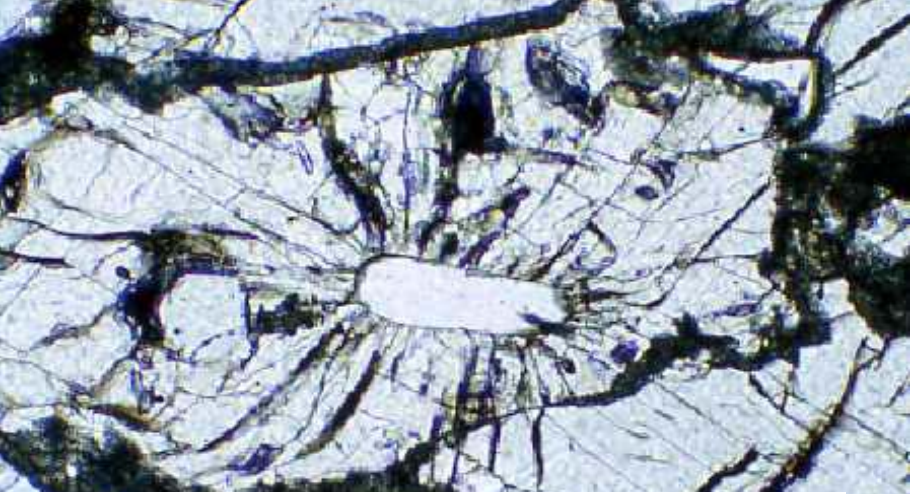
Křemité dolomity MgO-CaO-SiO₂-CO₂-H₂O

Ultramafity SiO₂-MgO-CaO-CO₂-H₂O

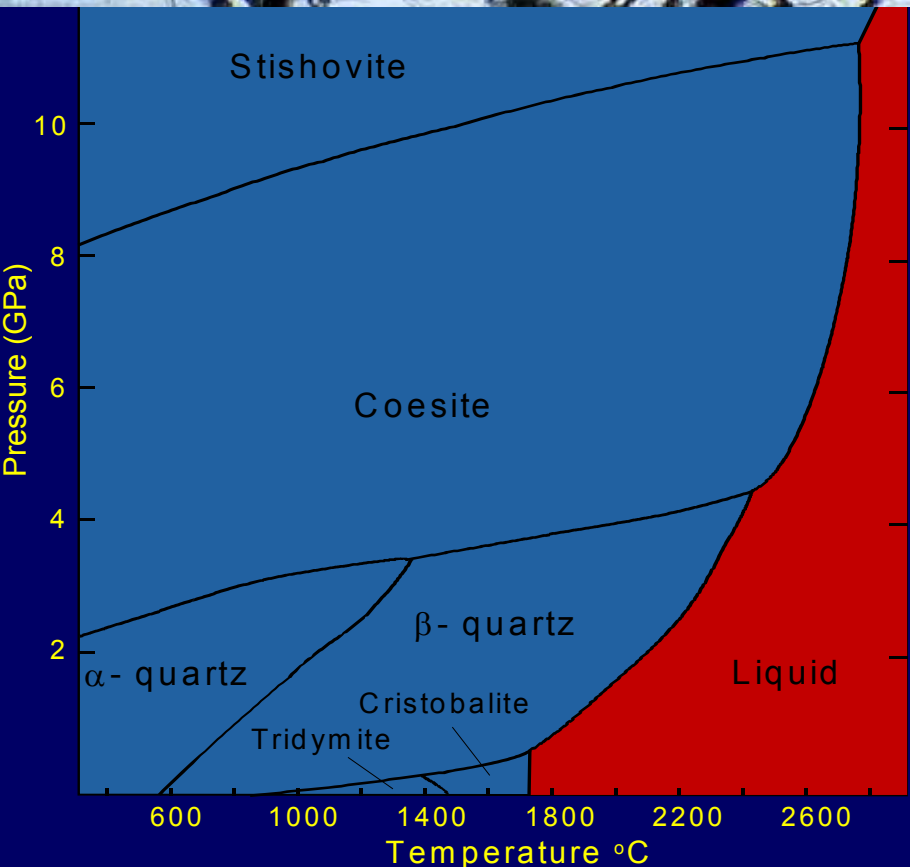
Minerály: pyroxeny, vesuvian, granát, Ca-Mg amfiboly, olivín, wollastonit, minerály serpentinové skupiny, (křemen, plagioklas), spinelidy.

ultramafity – serpentinit, mastková břidlice, chloritická břidlice

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

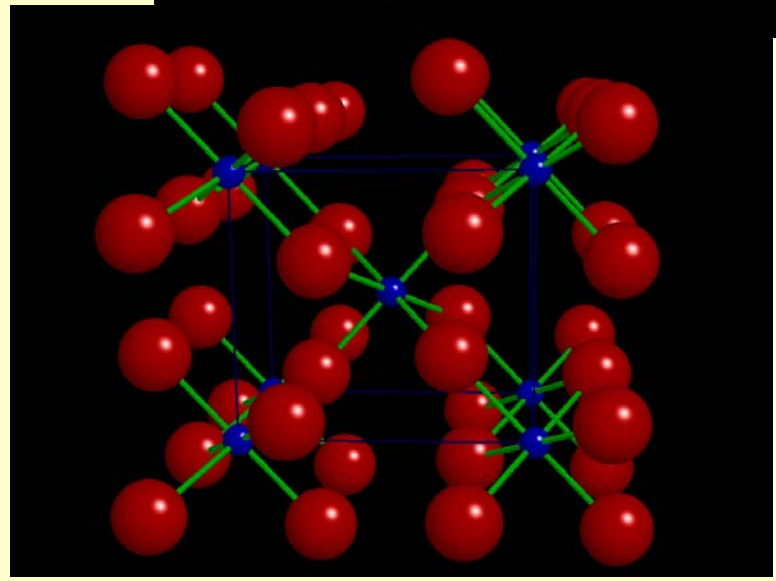
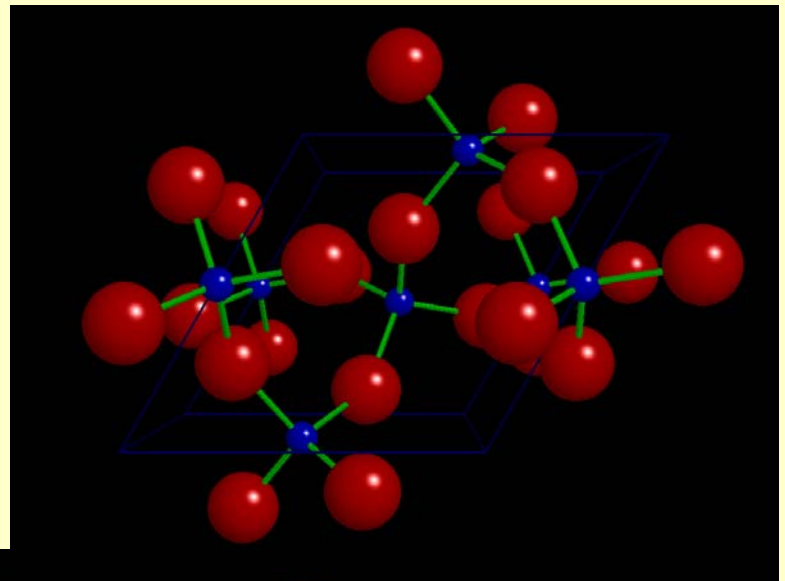


Uzavřenina coesitu v granátu - eklogit



Křemen (SiO₂)

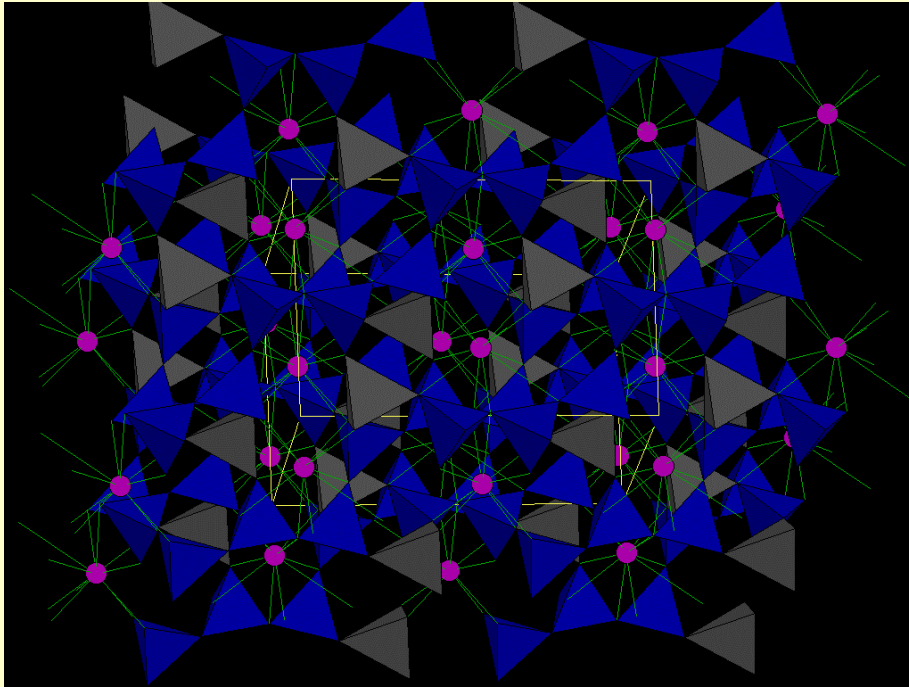
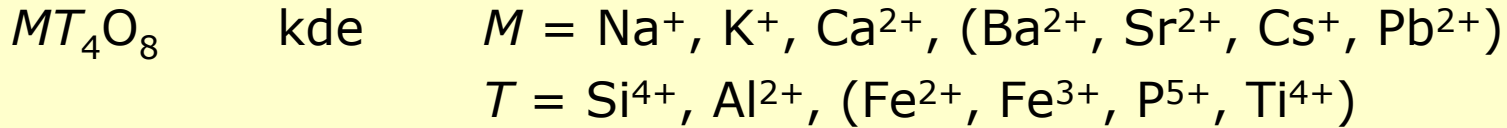
Nižší křemen Si^{IV}



Stishovit Si^{VI}

Živce

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

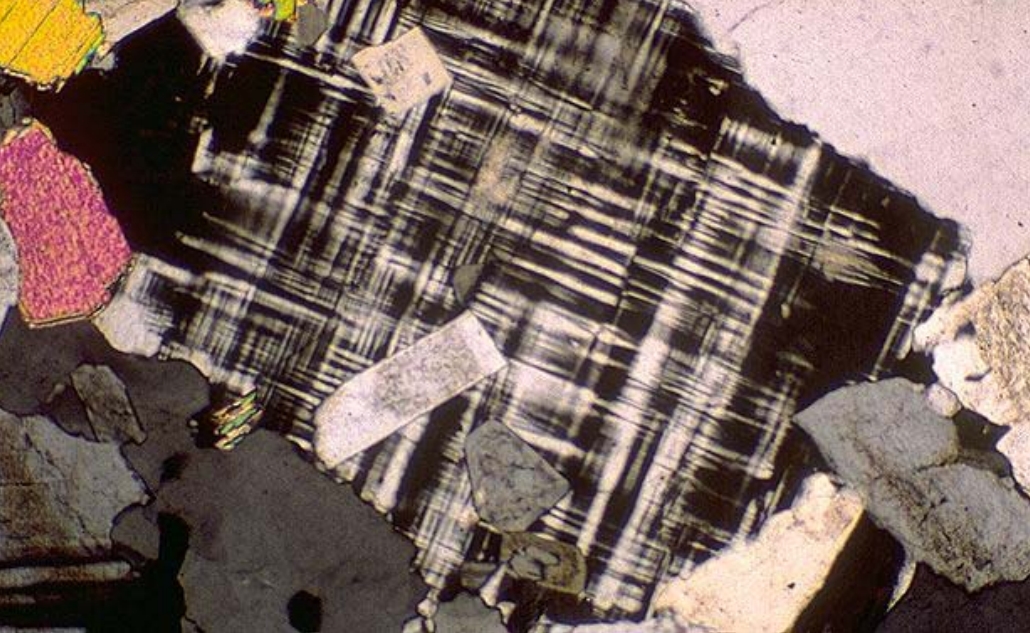


Albit: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

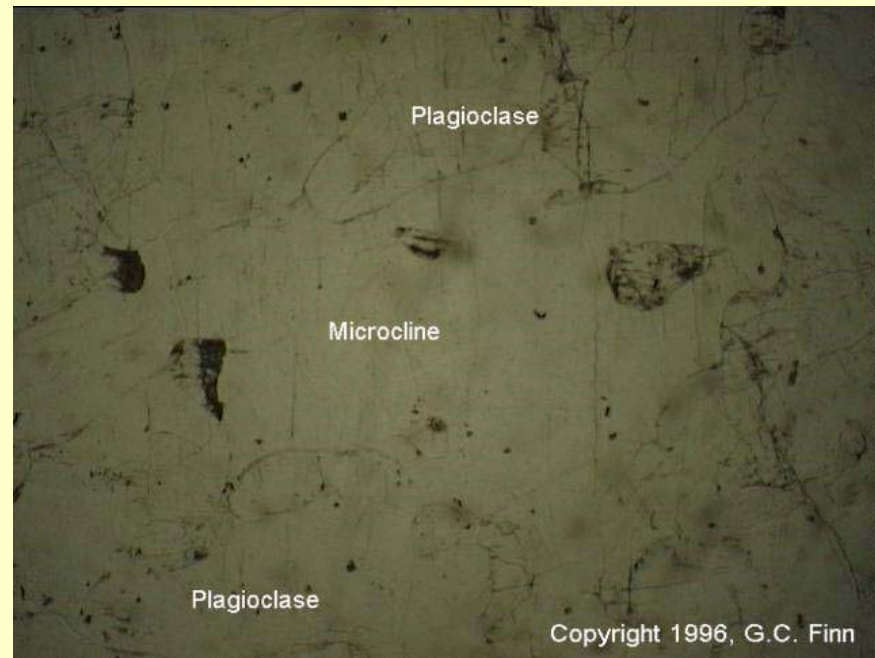
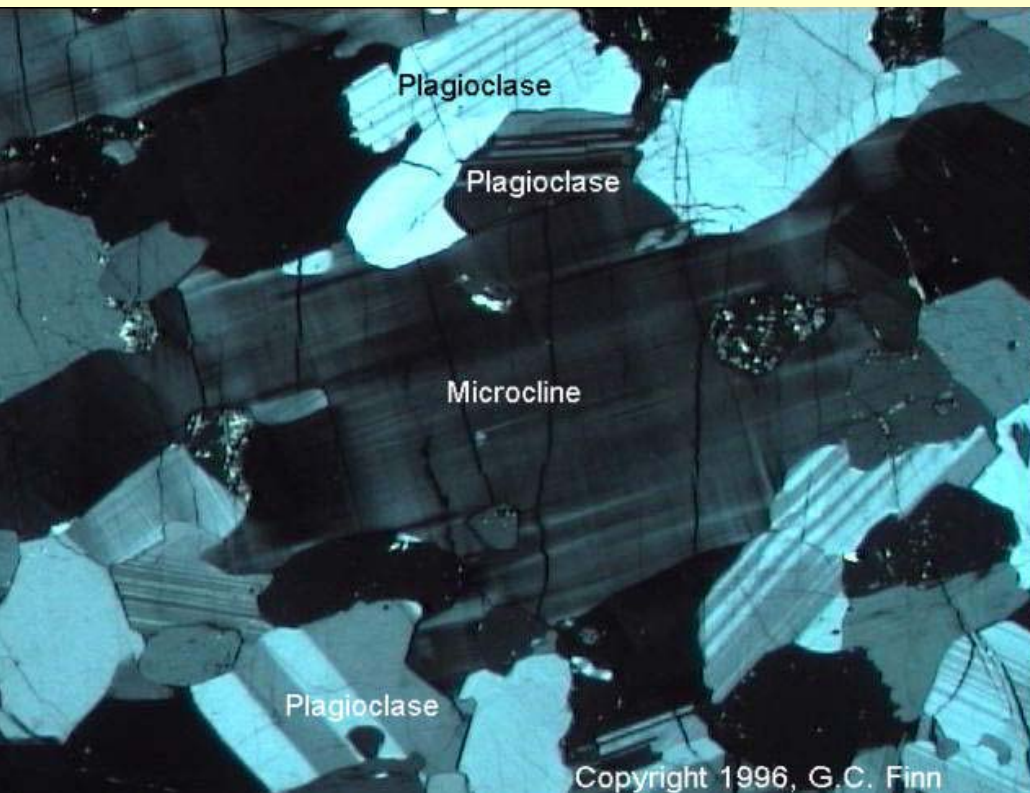
Jestliže Al^{3+} zastupuje jedno Si^{4+}
umožňuje struktura obsazení Na^+ nebo K^+

Pokud jsou ve struktuře nahrazovány dva
 Si^{4+} za Al^{3+} obsazuje pozici 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** - KAlSi_3O_8
(*ortoklas, mikroclin a albit do 5% An*)
- Kromě Na, Ca a K mohu živce obsahovat Ba, Sr, Rb.



alkalické živce

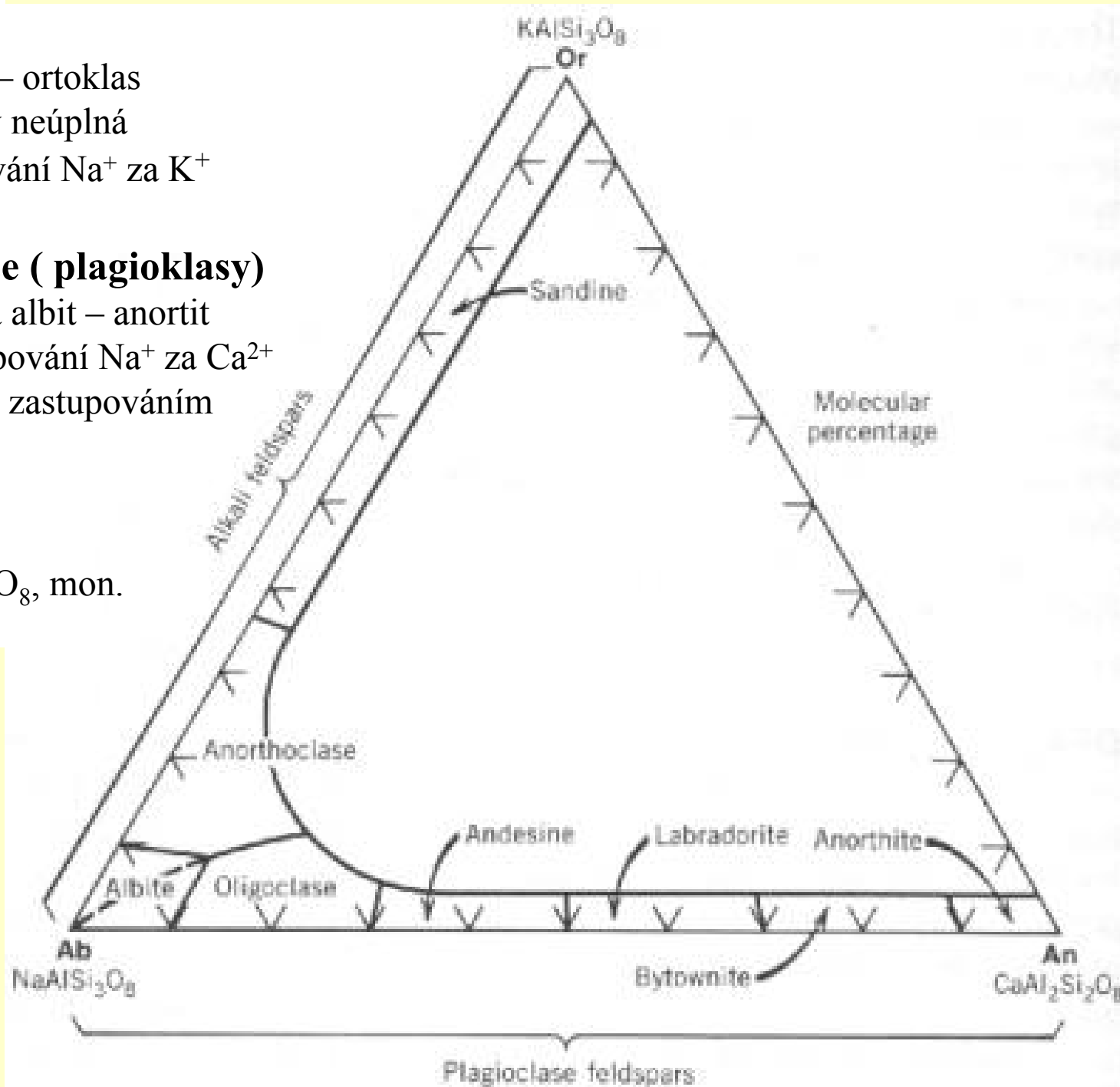
- izomorfní řada albit – ortoklas
- za povrchové teploty neúplná
- izovalentní zastupování Na^+ za K^+

sodnovápenaté živce (plagioklasy)

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

barnaté živce

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

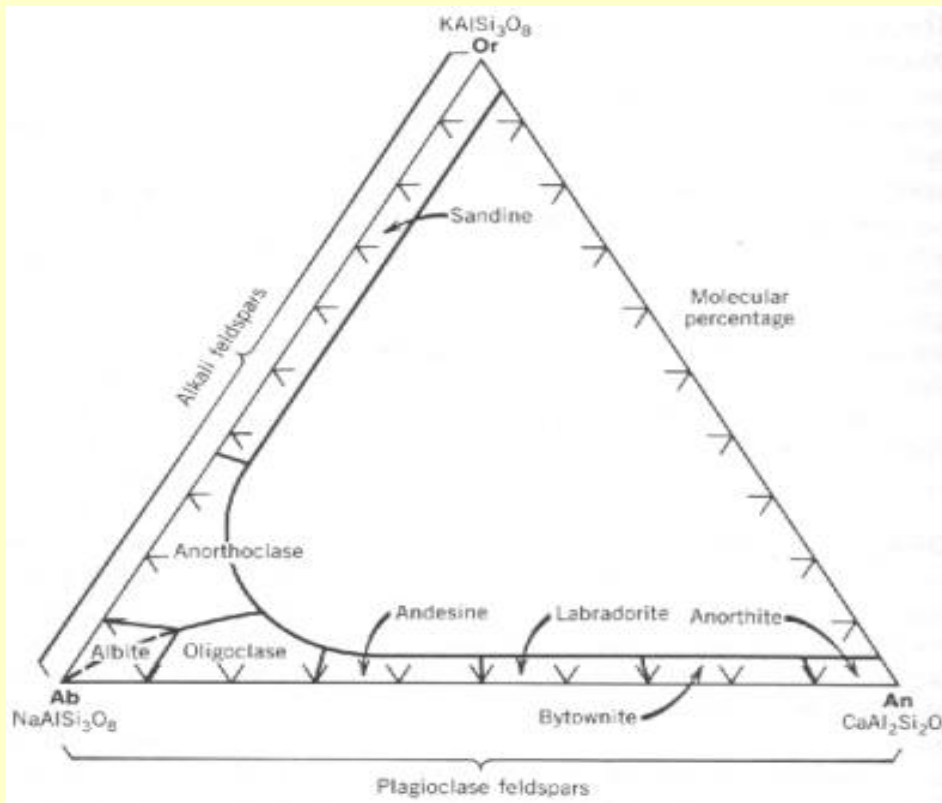


Alkalické živce

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

Plagioklas

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

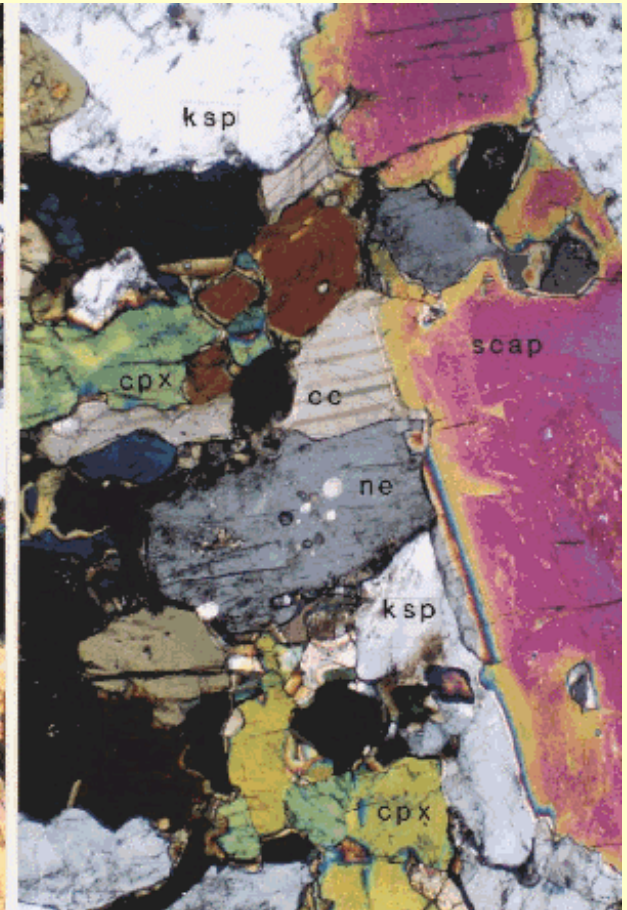
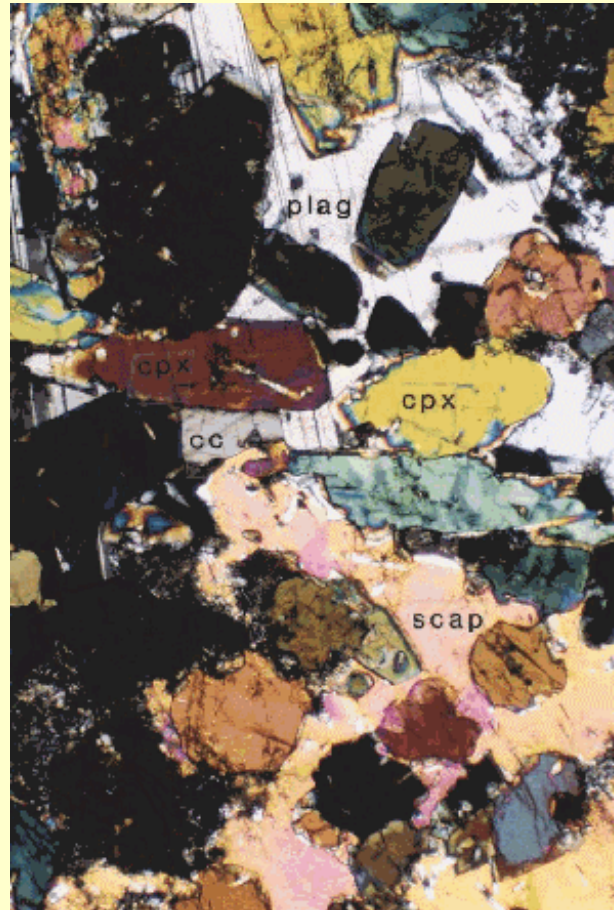
Přeměny:

- 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
- saussurizace: 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

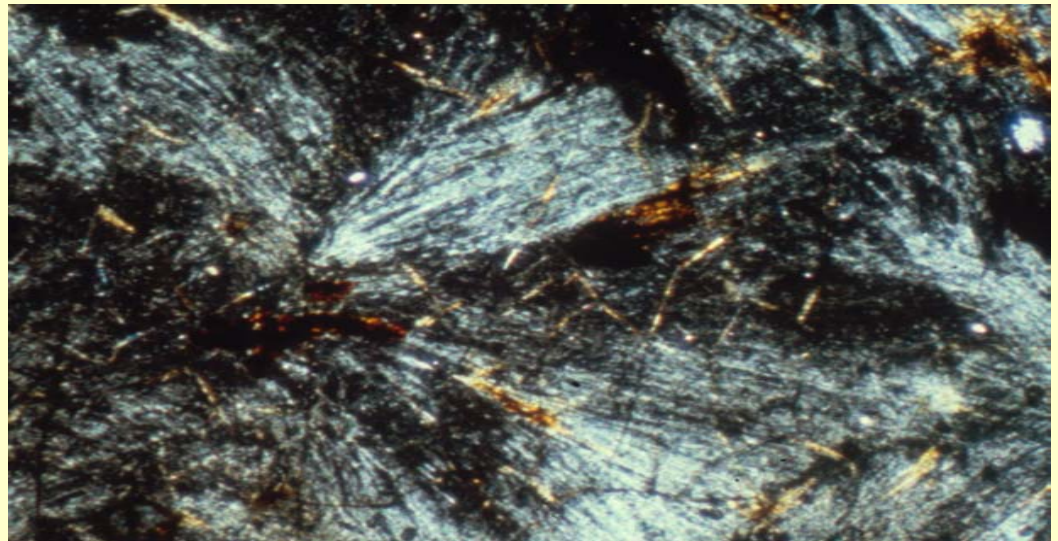
- Skapolit ve vyvřelé hornině ovlivněné asimilací: minerální složení augit (cpx), plagioklas (plag), skapolit (scap), kalcite (cc) nefeline (ne) draselný živec (ksp)



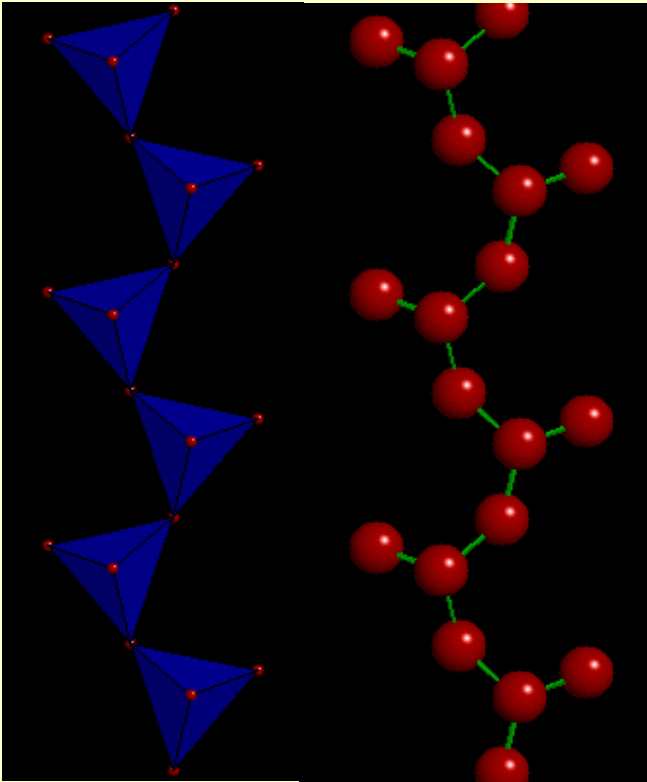
Skupina zeolitů

- 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
- $CaAlSi_2O_6 \cdot 3H_2O$

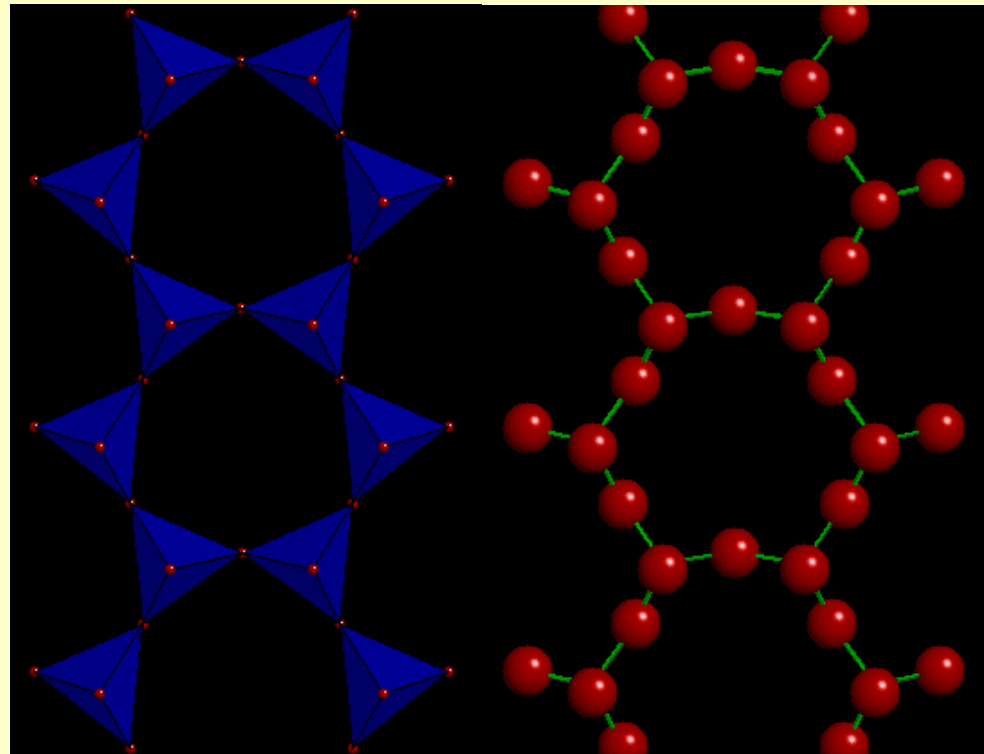


Inosilikáty



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

pyroxeny



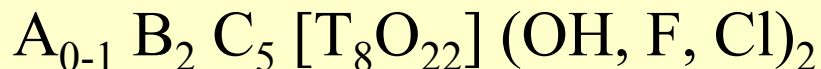
Inosilikáty

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

amfiboly

Chemické složení amfibolů

Obecný vzorec:



A = Na K

B = Ca Na Mg Fe²⁺ (Mn Li)

C = Mg Fe²⁺ Mn Al Fe³⁺ Ti

T = Si Al

- strukturu amfibolů tvoří dvojité řetězce tetraedrů [SiO₄]⁴⁻, uložené vzájemně rovnoběžně ve směru vertikály
- ve směru protažení se opakuje skupina čtyř tetraedrů [Si₄O₁₁]⁶⁻ (dvojčlankový řetězec) část Si⁴⁺ v tetraedrech může být nahrazena Al³⁺ mezi řetězci jsou uloženy kationty W, X, Y

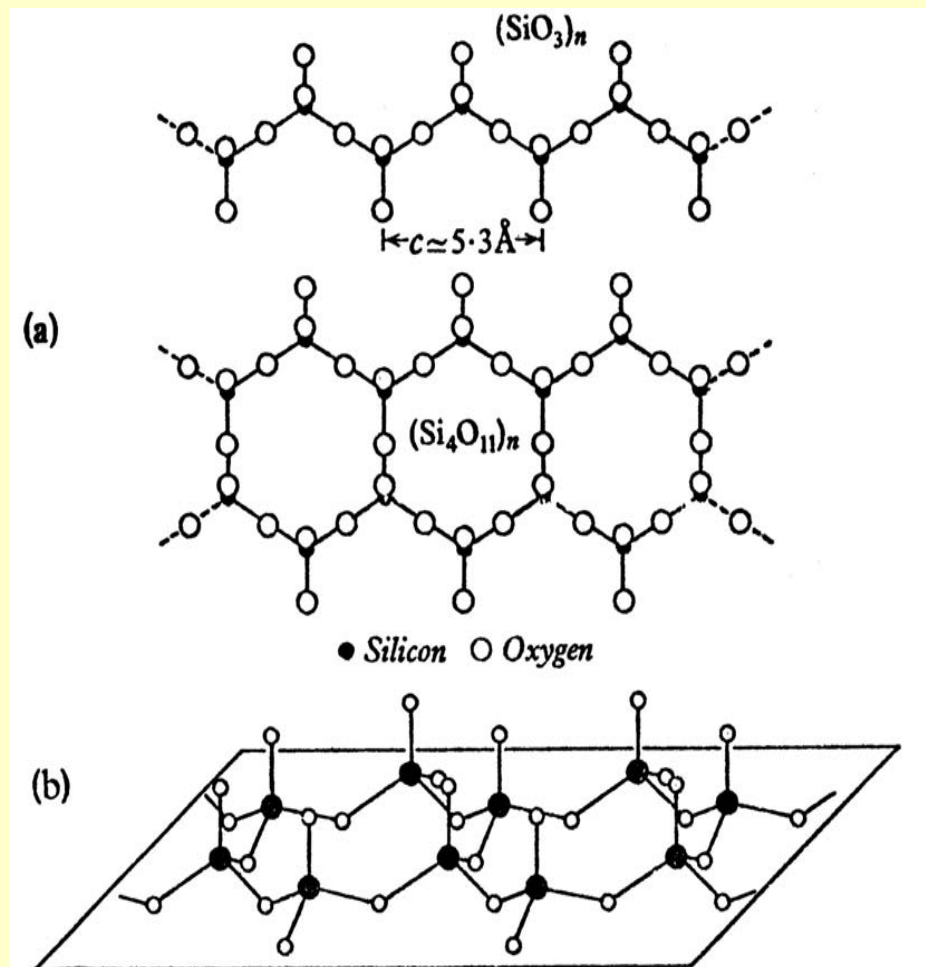


FIG. 53. (a) Comparison of amphibole band $(Si_4O_{11})_n$ and pyroxene chain $(SiO_3)_n$. (b) Perspective view of the double chain, or band, which occurs in the structures of all amphiboles (after Jong, 1959).

1. Anthophyllite-Cummingtonite sub-group.	
Ca+Na=0	(Mg,Fe ⁺² ,Fe ⁺³ ,Li) ₅₋₇ Al ₂₋₀ [Si ₆₋₈ Al ₂₋₀ O ₂₂](OH,F) ₂
Orthorhombic.	
Anthophyllite	(Mg,Fe ⁺²) ₇ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Gedrite	(Mg,Fe ⁺²) ₆₋₅ Al ₁₋₂ [Si ₆ (Si,Al) ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Ferrogedrite	(Fe ⁺² ,Mg) ₅ Al ₂ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Holmquistite	Li ₂ (Mg,Fe ⁺²) ₃ (Al,Fe ⁺³) ₂ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Monoclinic.	
Cummingtonite	(Mg,Fe ⁺²) ₇ [Si ₈ O ₂₂](OH) ₂
Grunerite	(Fe ⁺²) ₄ (Fe ⁺² ,Mg) ₃ [Si ₈ O ₂₂](OH) ₂
2. Calcium amphiboles.	
Ca>Na	Ca ₂ Na ₀₋₁ (Mg,Fe ⁺²) ₃₋₅ (Al,Fe ⁺³) ₂₋₀ [Si ₆₋₈ Al ₂₋₀ O ₂₂](O,OH,F) ₂
Monoclinic.	
Tremolite	Ca ₂ Mg ₅ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Ferroactinolite	Ca ₂ Fe ₅ ⁺² [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Hornblende	(Na,K) ₀₋₁ Ca _{1.5-2.0} (Mg,Fe ⁺²) ₃₋₅ (Al,Fe ⁺³) ₂₋₀ [Si ₆₋₇ Al ₂₋₁ O ₂₂](OH,F) ₂
Common hornblende	(Ca,Na,K) ₂₋₃ (Mg,Fe ⁺² ,Fe ⁺³ ,Al) ₅ [Si ₆ (Si,Al) ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Edenite	NaCa ₂ Mg ₅ [Si ₇ AlO ₂₂](OH,F) ₂
Ferroedenite	NaCa ₂ Fe ₅ ⁺² [Si ₇ AlO ₂₂](OH,F) ₂
Tschermakite	Ca ₂ Mg ₃ (Al,Fe ⁺³) ₂ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Ferrotschermakite	Ca ₂ Fe ₃ ⁺² (Al,Fe ⁺³) ₂ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Pargasite	NaCa ₂ Mg ₄ (Al,Fe ⁺³) ₃ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Ferrohastingsite	NaCa ₂ Fe ₄ ⁺² (Al,Fe ⁺³) ₃ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](OH,F) ₂
Basaltic hornblende	Ca ₂ (Na,K) _{0.5-1.0} (Mg,Fe ⁺²) ₃₋₄ (Fe ⁺³ ,Al) ₂₋₁ [Si ₆ Al ₂ O ₂₂](O,OH,F) ₂
Kaersutite	Ca ₂ (Na,K)(Mg,Fe ⁺² ,Fe ⁺³) ₄ Ti[Si ₆ Al ₂ O ₂₂](O,OH,F) ₂
Barkevikite	Ca ₂ (Na,K)(Fe ⁺² ,Mg,Fe ⁺³ ,Mn) ₅ [Si _{6.5} Al _{1.5} O ₂₂](OH,F) ₂
3. Alkali-amphiboles.	
Na>Ca	Na ₂₋₃ Ca ₁₋₀ (Mg,Fe ⁺²) ₅₋₃ (Al,Fe ⁺³) ₀₋₂ [Si ₇₋₈ Al ₁₋₀ O ₂₂](OH,F) ₂
Monoclinic.	
Glaucofanite	Na ₂ Mg ₃ Al ₂ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Magnesioriebeckite	Na ₂ Mg ₃ Fe ₂ ⁺³ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Riebeckite	Na ₂ Fe ₃ ⁺² Fe ₂ ⁺³ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Richterite	Na ₂ Ca(Mg,Fe ⁺² ,Mn,Fe ⁺³ ,Al) ₅ [Si ₈ O ₂₂](OH,F) ₂
Katophorite	Na ₂ CaFe ₄ ⁺² (Fe ⁺³ ,Al)[Si ₇ AlO ₂₂](OH,F) ₂
Magnesiokatophorite	Na ₂ CaMg ₄ (Fe ⁺³ ,Al)[Si ₇ AlO ₂₂](OH,F) ₂
Eckermannite	Na _{2.5} Ca _{0.5} (Mg,Fe ⁺² ,Fe ⁺³ ,Al,Li) ₅ [Si _{7.5} Al _{0.5} O ₂₂](OH,F) ₂
Arfvedsonite	Na _{2.5} Ca _{0.5} (Fe ⁺² ,Mg,Fe ⁺³ ,Al) ₅ [Si _{7.5} Al _{0.5} O ₂₂](OH,F) ₂

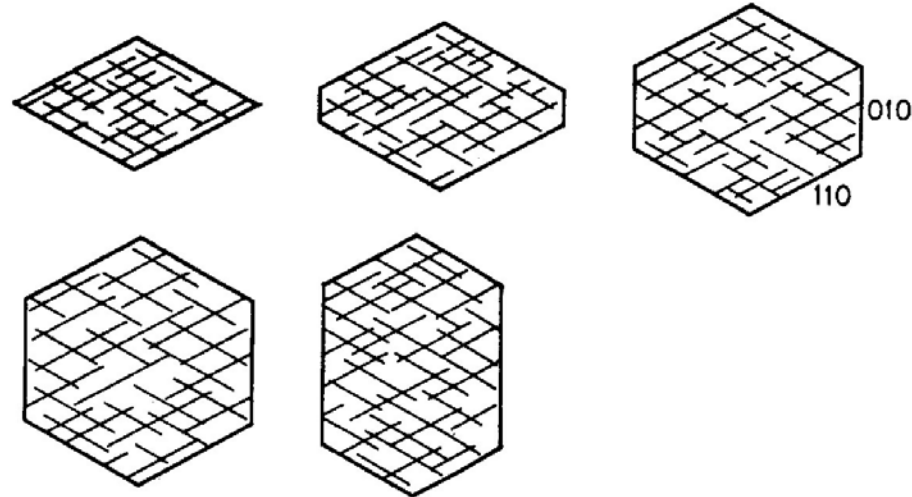
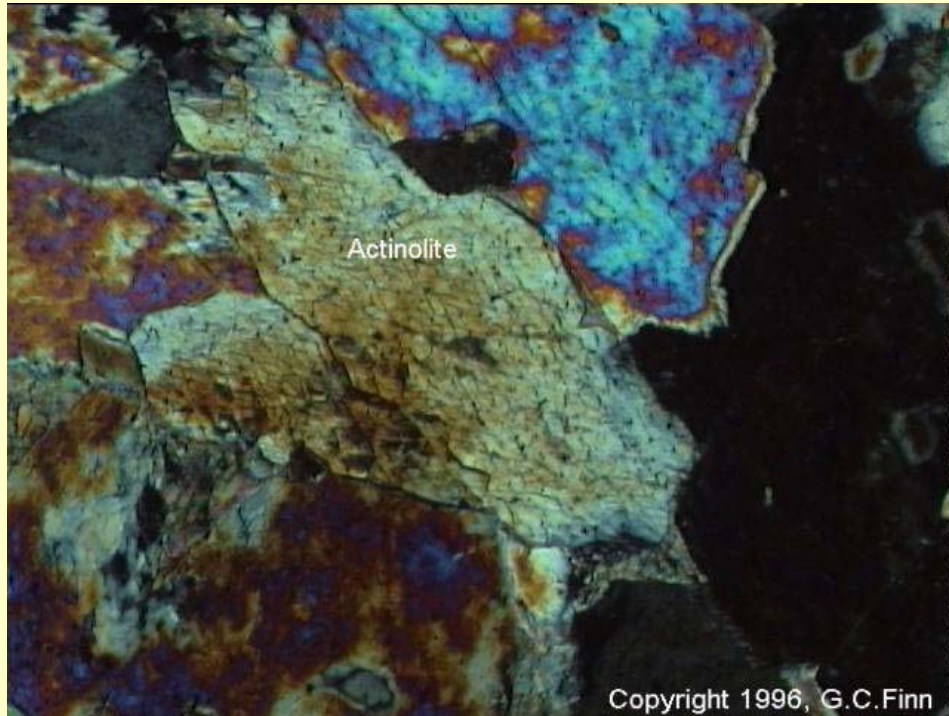
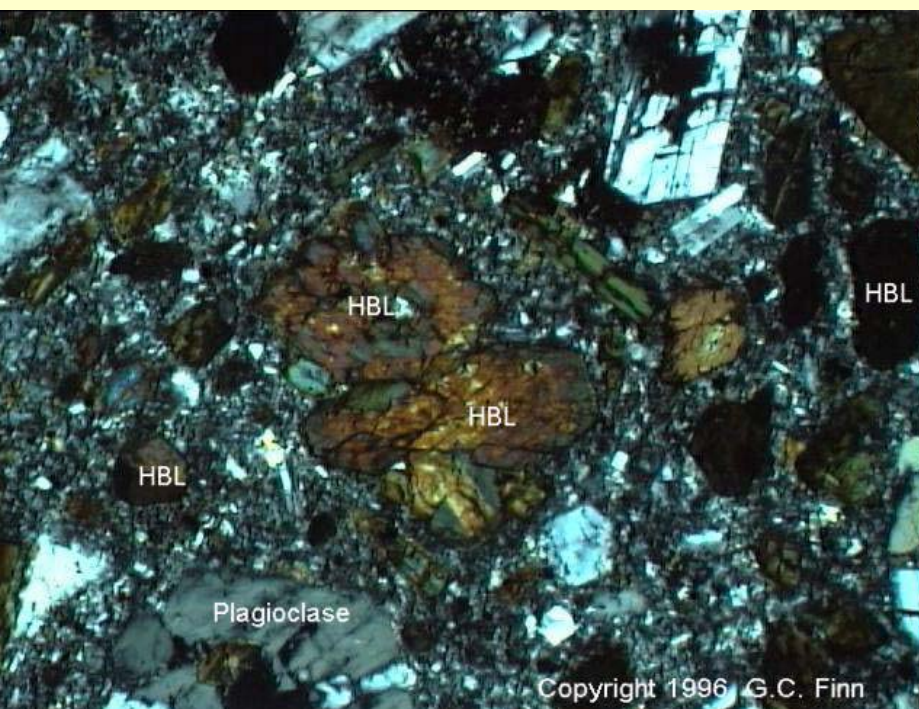


FIG. 14-22. Cross sections of minerals of the amphibole group showing cleavage.

Substituční vektory

- Fe²⁺Mg₋₁
- MnMg₋₁
- Al₂Mg₋₁Si₋₁ : tschermakitová substituce
- Fe³⁺AlMg₋₁Si₋₁ : ferri-tschermakitová
- TiAl₂Mg₋₁Si₋₂ : Ti-tschermakitová substituce
- NaAlV₋₁Si₋₁ : edenitový vektor
- KAlV₋₁Si₋₁ : K-edenitový vektor
- MgCa₋₁ : cummingtonitový vektor
- NaAlCa₋₁Mg₋₁ : glaukofanitový vektor



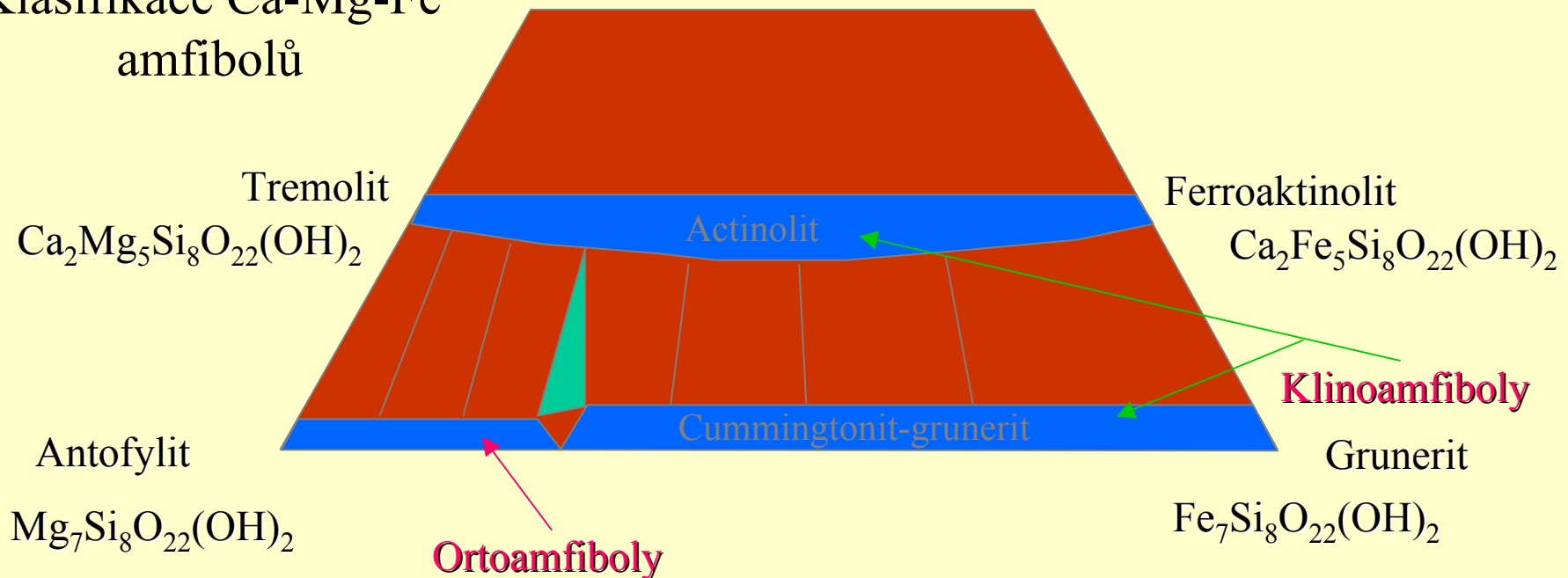
➤ amfiboly mají velký počet pozic a velký rozsah velikostí kationtů, které tyto pozice obsazují proto jsou chemicky velmi variabilní

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	$\square\text{Na}_2(\text{Fe}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$2[\text{M}4]\text{Ca} + 2[6]\text{Mg} = 2[\text{M}4]\text{Na} + 2[6]\text{Al}$	Glaucophanite	$\square\text{Na}_2(\text{Mg}_3\text{Al}_2)\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
$[\text{A}]\square + [6]\text{Mg} + 2[4]\text{Si} = [\text{A}]\text{Na} + 2[4]\text{Al} + [6]\text{Al}$	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 míšivost)
- amfiboly můžeme rozdělit na : (a) Mg–Fe amfiboly, (b) Ca-amfiboly, (c) alkalické amfiboly
- složení Mg–Fe a Ca amfibolů lze částečně znázornit v trojúhelníku s vrcholy $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ (antofylit) – $\text{Fe}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ (grunerit) – $\text{Ca}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ (hypotetický krajní člen)

Klasifikace Ca-Mg-Fe amfibolů



Klasifikace amfibolů

- dnes se používá klasifikace (Leake et al., 1997; *Amer. Mineral.* v82, 1019-1037).

- klasifikace je založena na několika parametrech:

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

b) množství Si kationtů při přepočtu na 23 kyslíků

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

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

- Základní rozdělení amfibolů je založeno na obsazení pozice B:

- **magnesium-iron-manganese-lithium amphiboles**

$(Ca+Na)_B < 1$ and $(Mg+Fe^{2+}+Mn+Li)_B \geq 1$

- **calcic amphiboles**

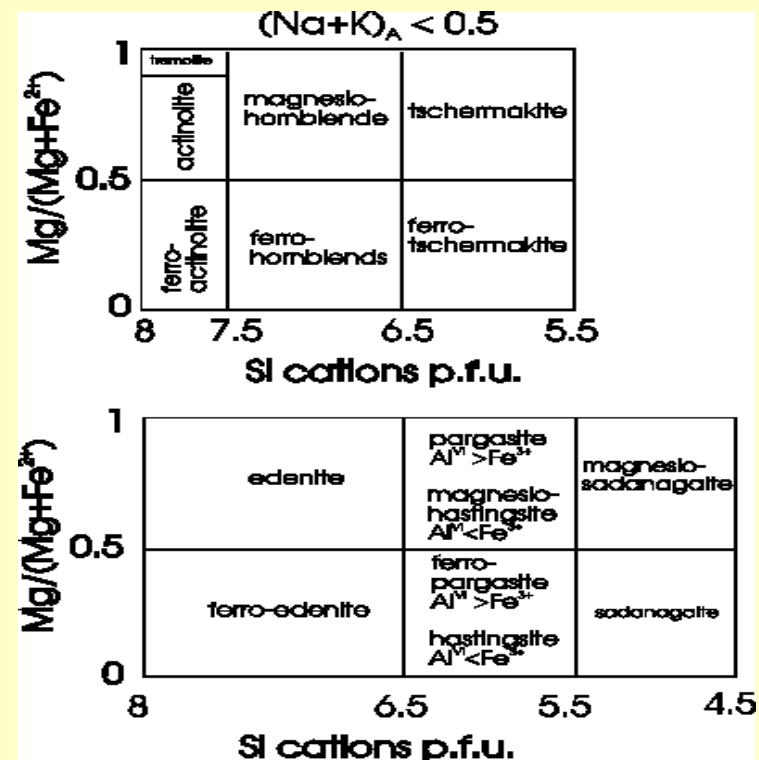
$(Ca+Na)_B \geq 1$ and Na_B less than 0.5

- **sodic-calcic amphiboles**

$(Ca+Na)_B \geq 1$ and $Na_B = 0.5 - 1.5$

- **sodic amphiboles**

$Na_B \geq 1.5$



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.

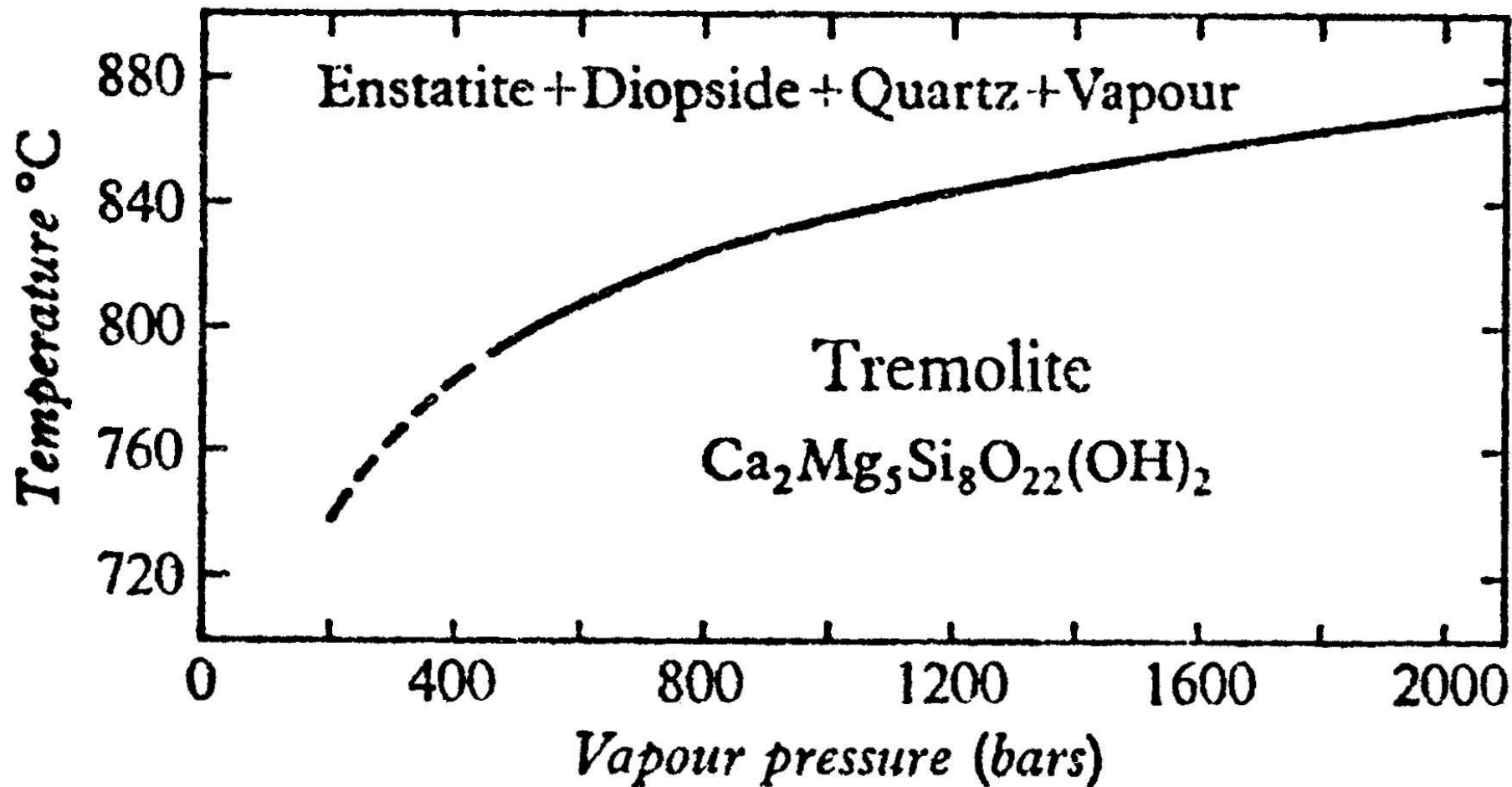


FIG. 65. The univariant equilibrium curve for the reaction tremolite \rightleftharpoons enstatite + diopside + quartz + vapour (after Boyd, 1954).

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.



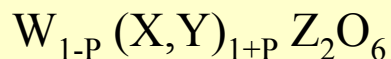
$$T = \frac{78.44 + Y_{Ab-An} - 33.6X_{Na}^{[M4]} - (66.8 - 2.92P)X_{Al}^{[M2]} + 78.5X_{Al}^{[T1]} + 9.4X_{Na}^{[A]}}{0.0721 - R \ln \left(\frac{27 X_{Na}^{[M4]} X_{Si}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}}{64 X_{Ca}^{[M4]} X_{Al}^{[T1]} X_{Ab}^{Pl}} \right)}$$

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

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

Chemismus Pyroxenů

Obecný vzorec pyroxenů:

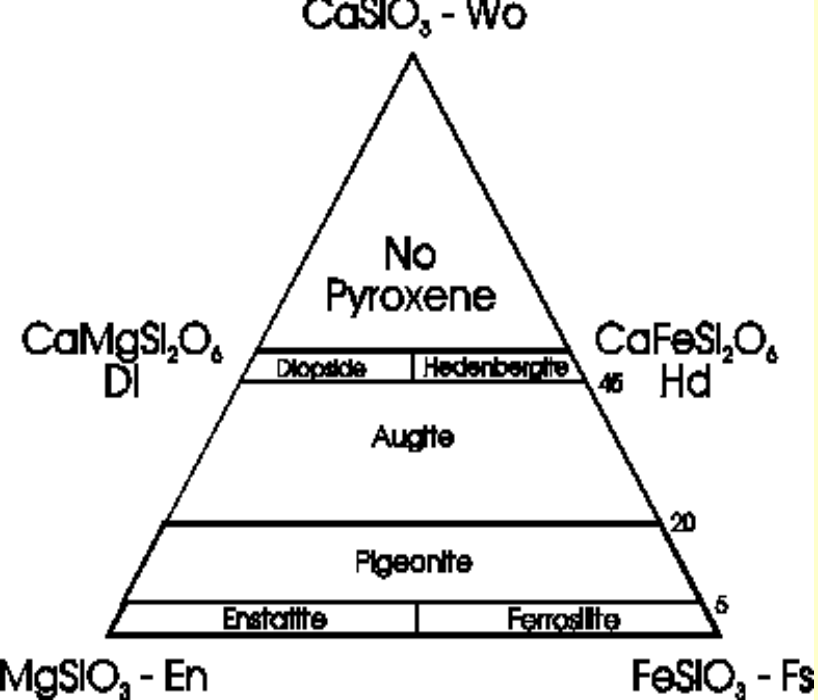


- W = **Ca** Na
- X = **Mg** **Fe²⁺** Mn Ni Li
- Y = Al **Fe³⁺** Cr Ti
- Z = **Si** Al

- 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 ₂	O ₆	
Mg	Mg	Si		Orthorhombic
Fe ²⁺	Fe ²⁺			
Ca	Mg			Monoclinic
Ca	Fe ³⁺			
Ca	Mn			
Na	Al			
Na	Fe ²⁺			
Ca	Al	Al, Si		
Mg	Al	Al, Si		



a) Mg-Fe pyroxeny

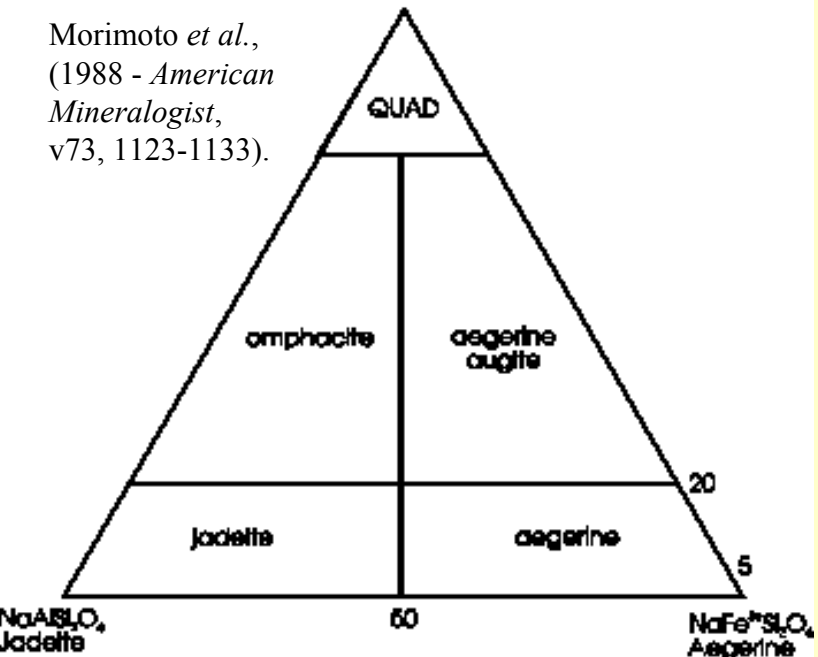
- ✓ při obsahu složky Ca₂Si₂O₆ do 5 % jsou rombické a nad touto hranicí monoklinické (pigeonit)
- ✓ úplná izomorfní řada mezi enstatitem Mg₂Si₂O₆ a ferrosiletem Fe₂Si₂O₆

b) Ca-pyroxeny

- ✓ jsou monoklinické
- ✓ úplná izomorfní řada mezi diopsidem CaMgSi₂O₆ a hedenbergitem CaFeSi₂O₆
- ✓ augit je přechodný člen se zvýšeným podílem Fe³⁺ a Al na úkor Fe²⁺ a Mg)

Wo+En+Fs

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

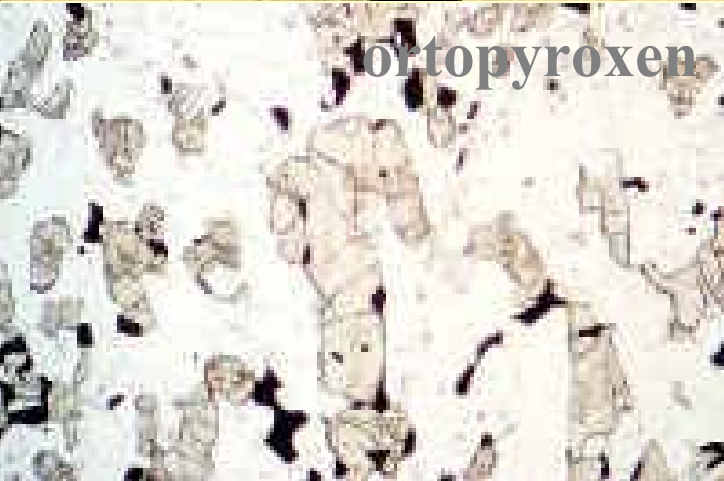
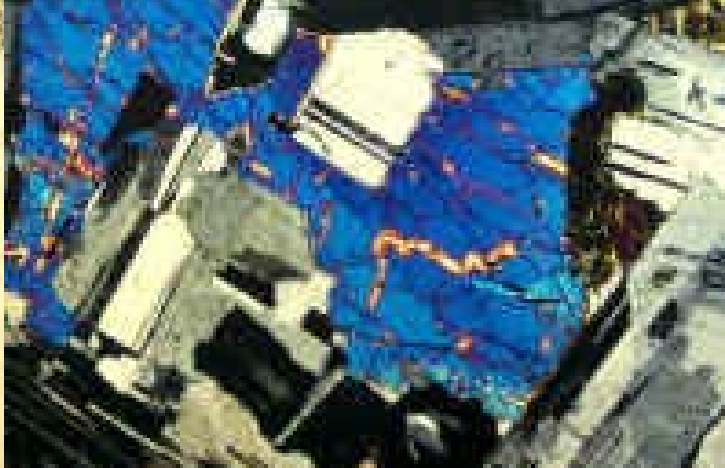


c) alkalické pyroxeny (Ca-Na, Na a Li)

- ✓ jsou monoklinické
- ✓ složení můžeme vyjádřit v trojúhelníku NaAlSi₃O₆ - NaFe³⁺Si₃O₆ - (Ca,Mg,Fe)₂Si₂O₆
- ✓ dále sem patří Li-pyroxen spodumen



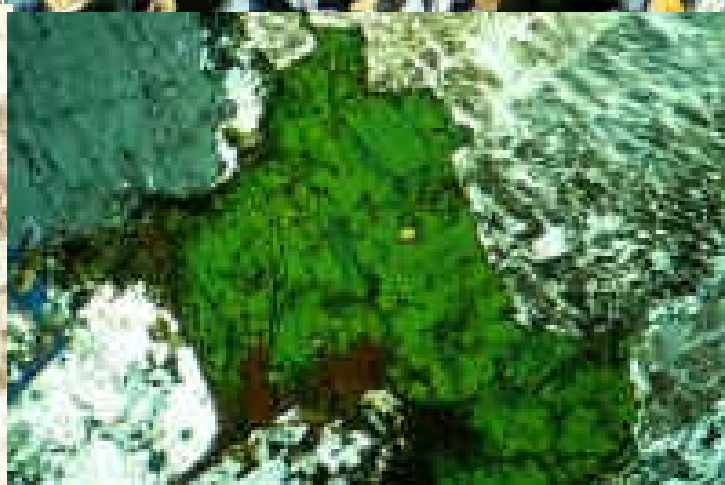
augit



ortopyroxen



egerin



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

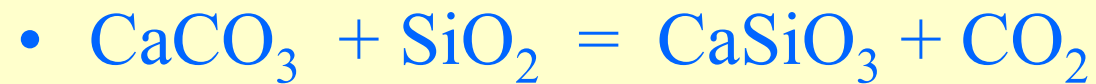
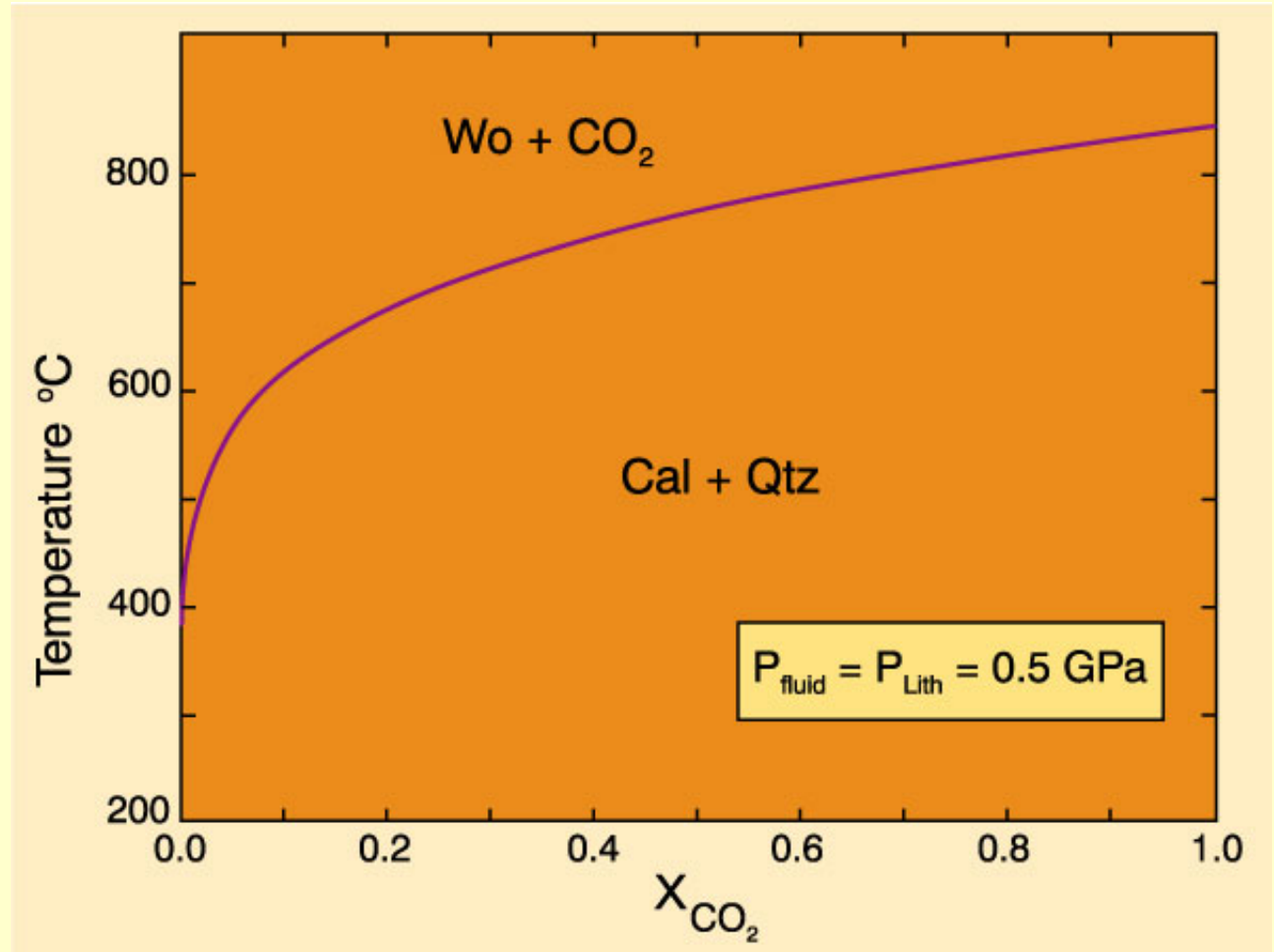
Garnát-Cpx-fengitový barometr

- Holland and Powell (1990, J Metamorphic Geol. 8, 89-124)
- založeno na reakci **pyrope + 2grossular = 6diopside + 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

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

Wollastonit

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



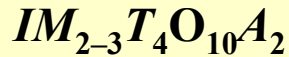
Rozdělení fylosilikátů na dioktaedrické a trioktaedrické slídy

- ✓ tetraedrové sítě jsou uloženy navzájem rovnoběžně vrcholy tetraedrů (kyslíky) jsou orientovány na stejnou stranu vrstvy
- ✓ tyto kyslíky jsou zároveň součástí **oktaedrové sítě** (tvořena koordinačními oktaedry)
- ✓ v centru oktaedrů jsou nejčastěji Fe^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , méně často Li^+ , Ti^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} a další
- ✓ v hraniční rovině mezi tetraedrovou a oktaedrovou vrstvou jsou uloženy nesdílené skupiny OH^- (F^- , Cl^- , O^{2-})
- ✓ **trioktaedrické fylosilikáty** - středy všech oktaedrů jsou obsazeny (převážně dvojmocnými) ionty – **trioktaedrická síť**
- ✓ **dioktaedrické fylosilikáty** - středy oktaedrů jsou obsazeny (převážně trojmocnými) ionty obsazeny dvě třetiny oktaedrických pozic– **dioktaedrická síť**

<u>skup. slíd</u>			
<u>muskovit</u>	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	mon.	diokt.
<u>flogopit</u>	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	mon.	triokt.
<u>biotit</u>	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	mon.	triokt.

Skupina slíd

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



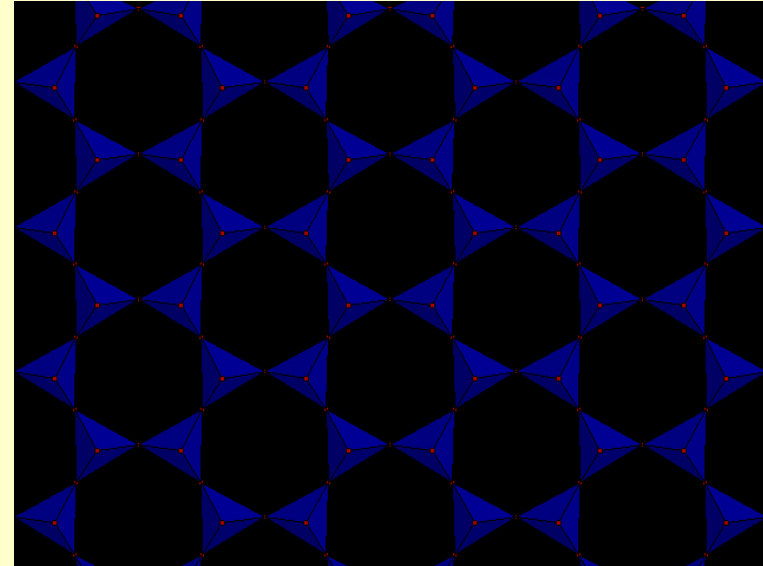
- kde:

$I = K^+, Na^+, \dots$ (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

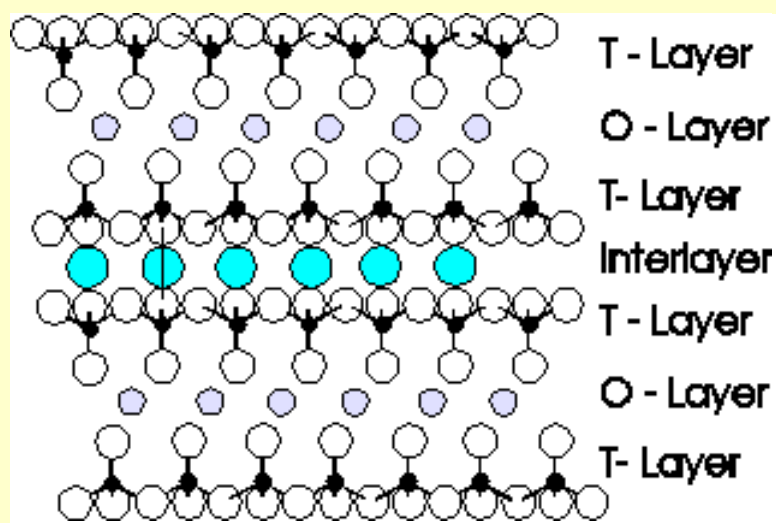
Koncové členy muskovitu a biotitu

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



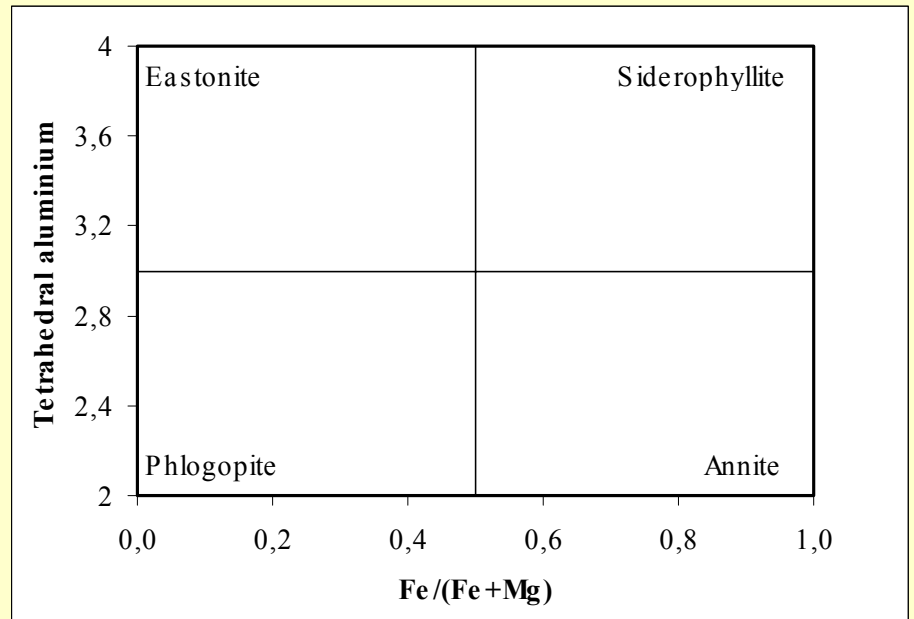
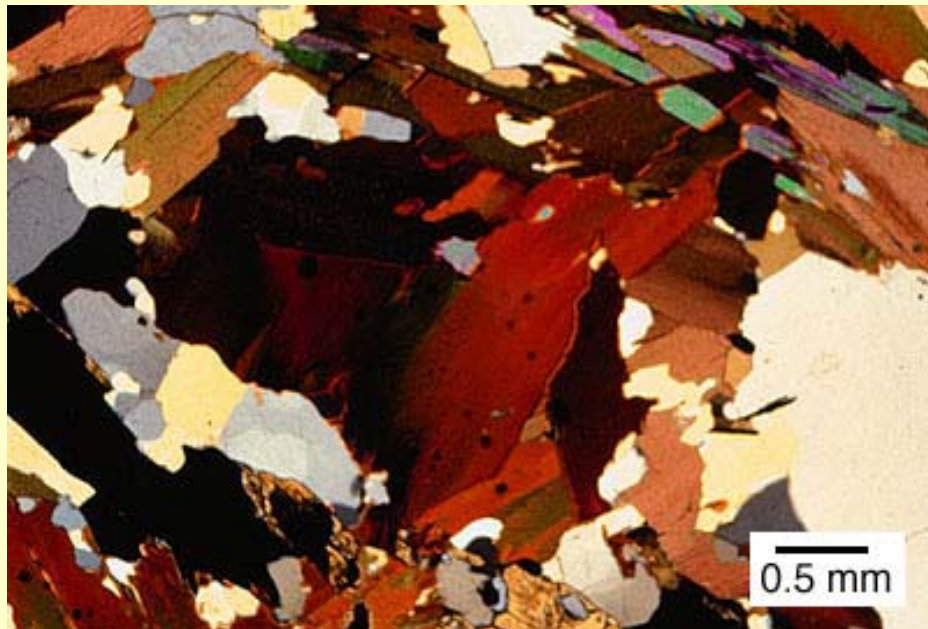
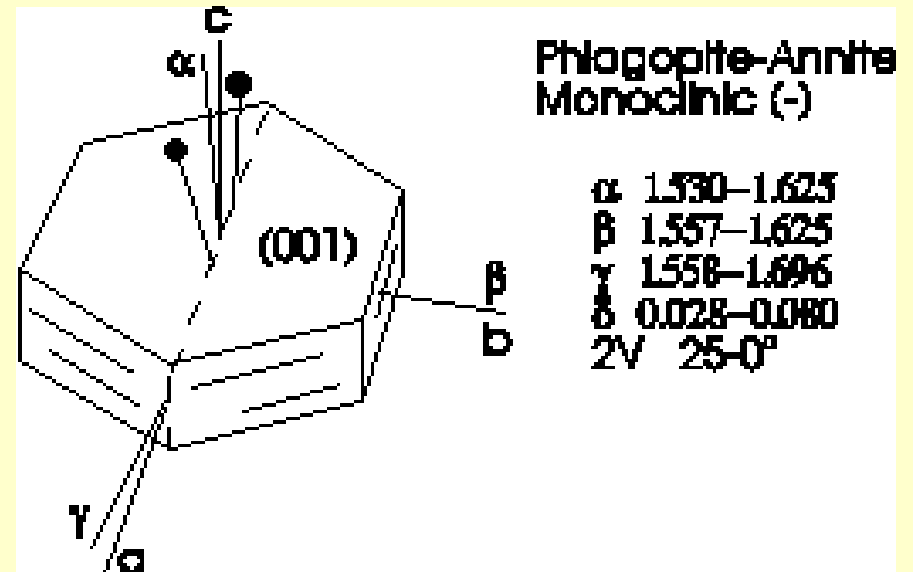
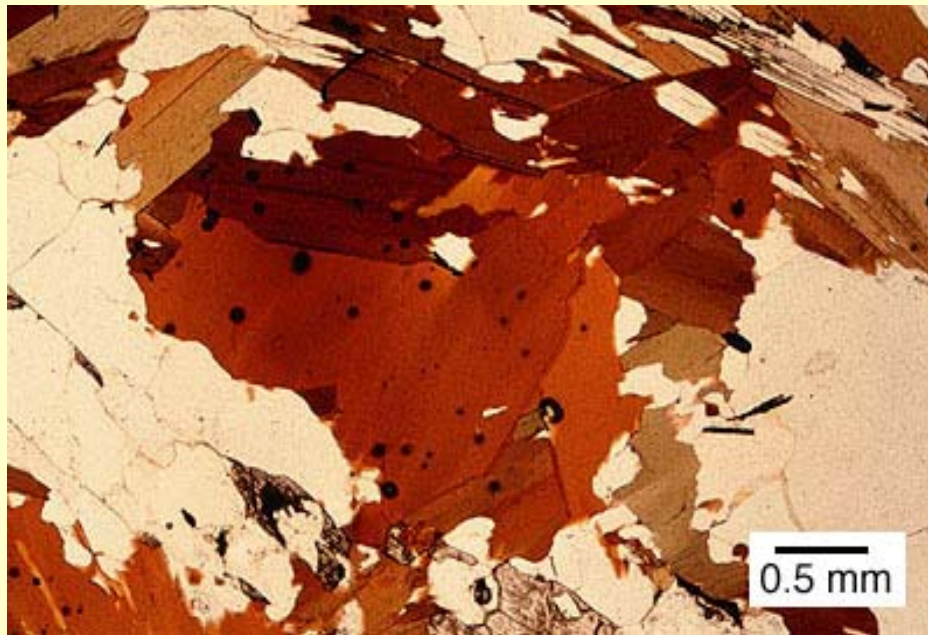
Di-octahedral Micas

	I-site	O-sites	T-sites
Common Micas	K	Al ₂	Si ₃ Al
	Na	Al ₂	Si ₃ Al
Brittle Mica	(K,Na) _{0.6-1}	(Fe,Mg,Al) ₂	Si _{3.5-3.8} Al _{0.5-0.2}
	Ca	Al ₂	Si ₂ Al ₂

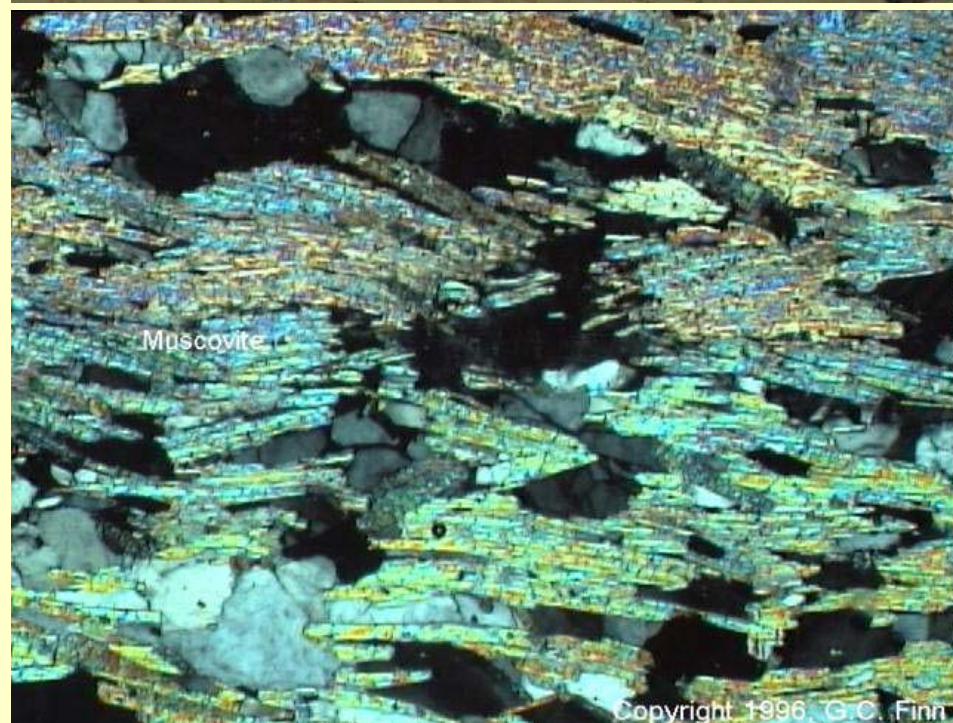
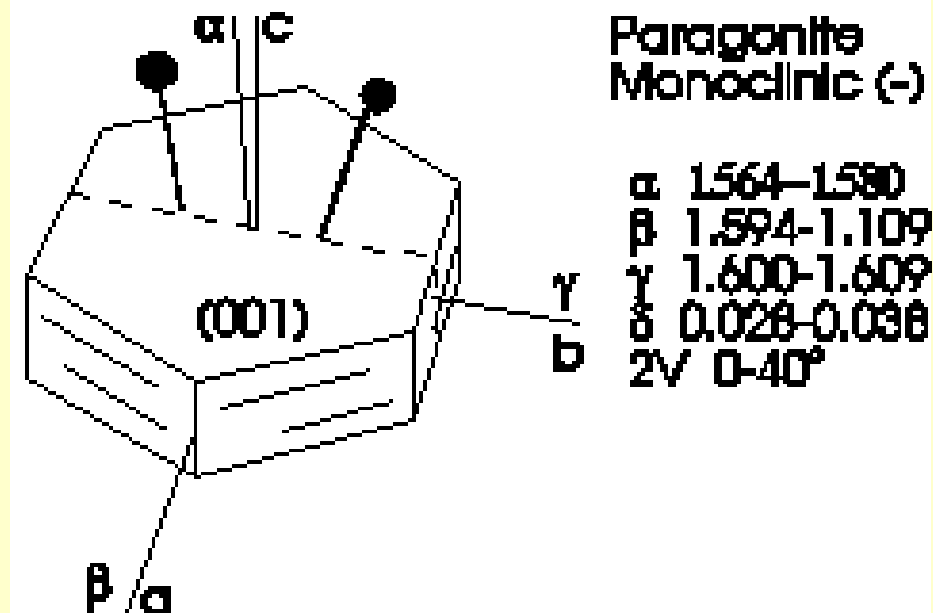
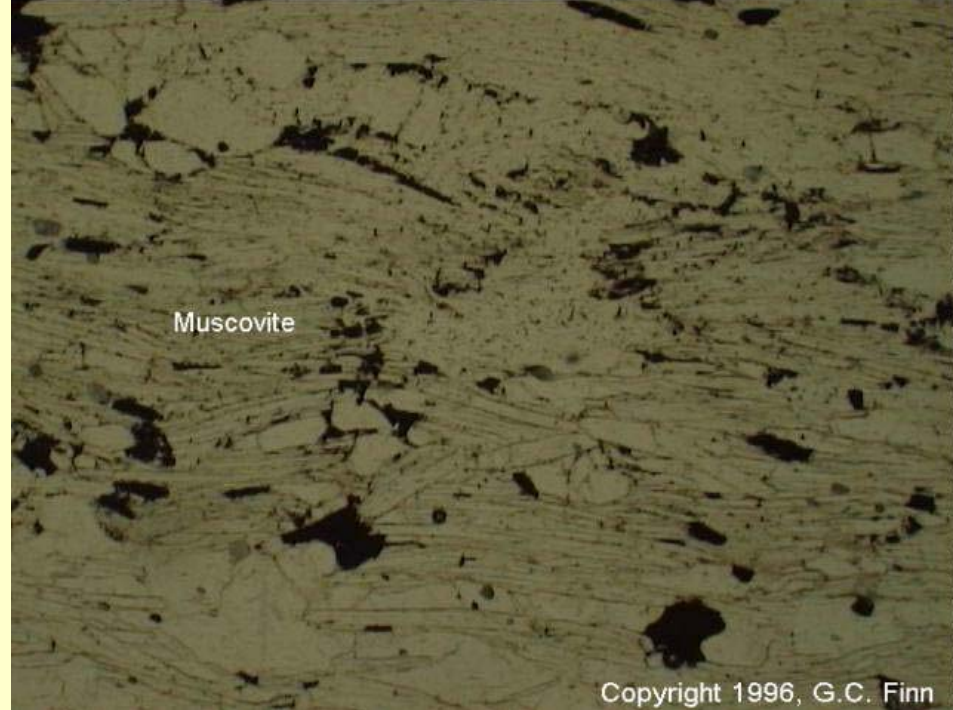
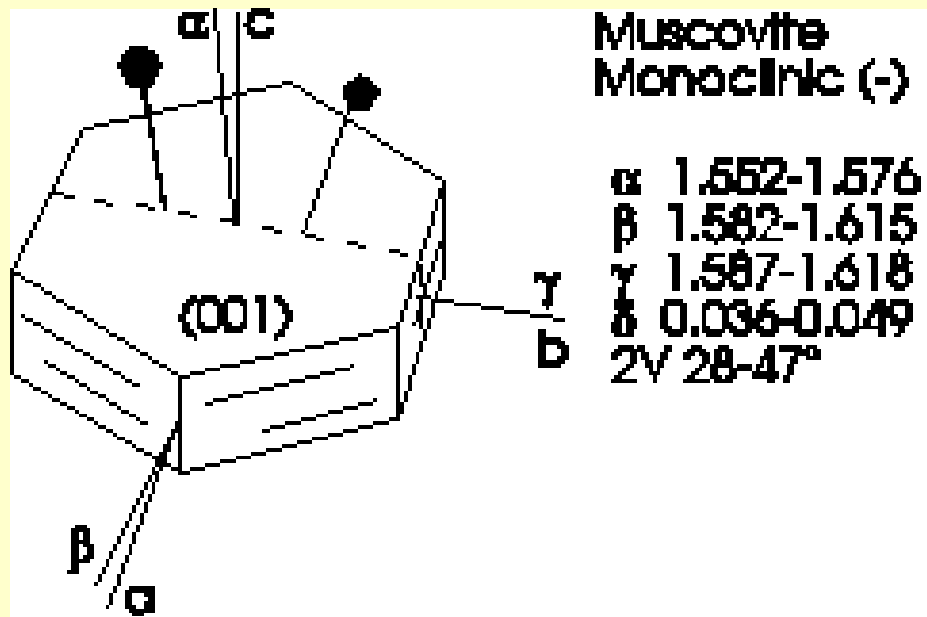
Tr-Octahedral Micas

	I-site	O-sites	T-sites
Common Micas	K	Mg ₃	Si ₃ Al
	K	Fe ₃	Si _{3-2.5} Al _{1-1.5}
Brittle Mica	K	(Fe,Li,Al) ₃	Si _{3-3.5} Al _{1-0.5}
	K	(Li,Al) _{2.5-3}	Si _{3-2.5} Al _{1-1.5}
	Ca	(Mg,Al) ₃	Si _{1.25} Al _{2.75}

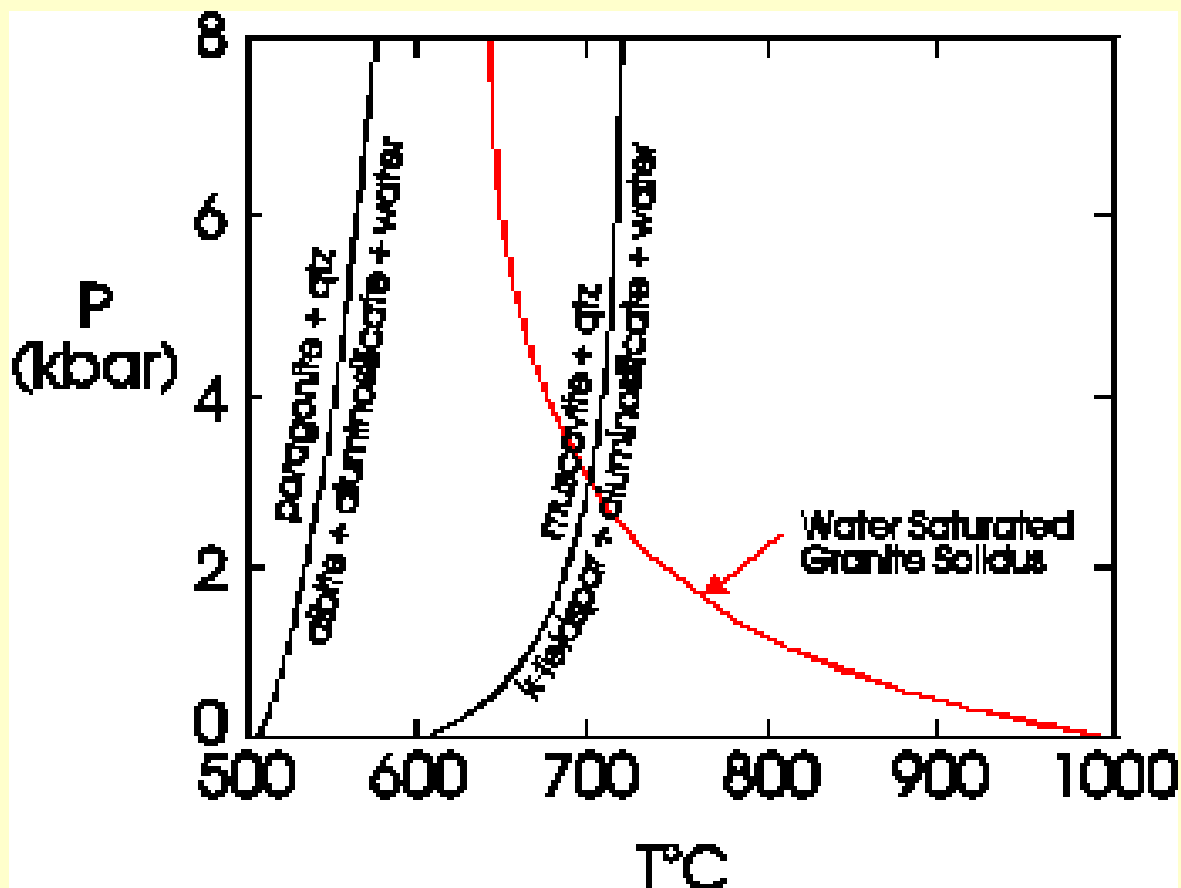
Biotit



Muskovit a paragonit



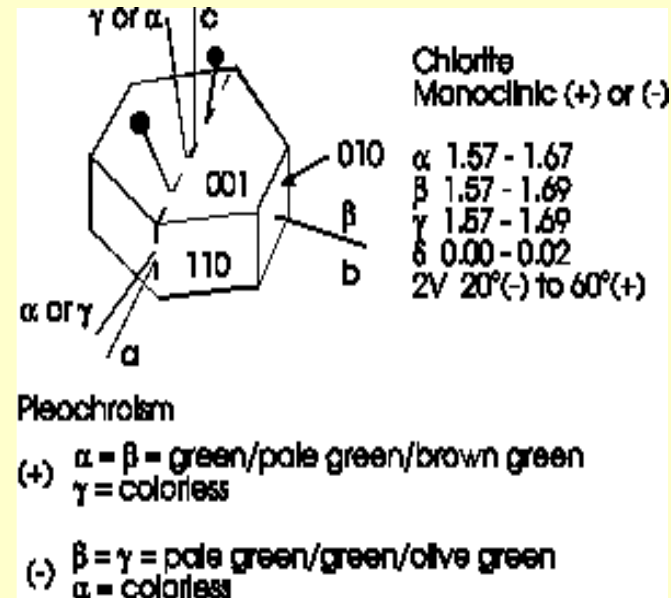
- muskovit a biotit se objevují v metamorfovaných pelitech, psamitech a kyselých magmatických horninách od facie zelených břidlic po facii amfibolitovou (muskovit) a granulitovou (biotit)
- paragonit se někdy vyskytují v nížce a středně metamorfovaných metapelitech nebo metabazitech a stejně jako muskovit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



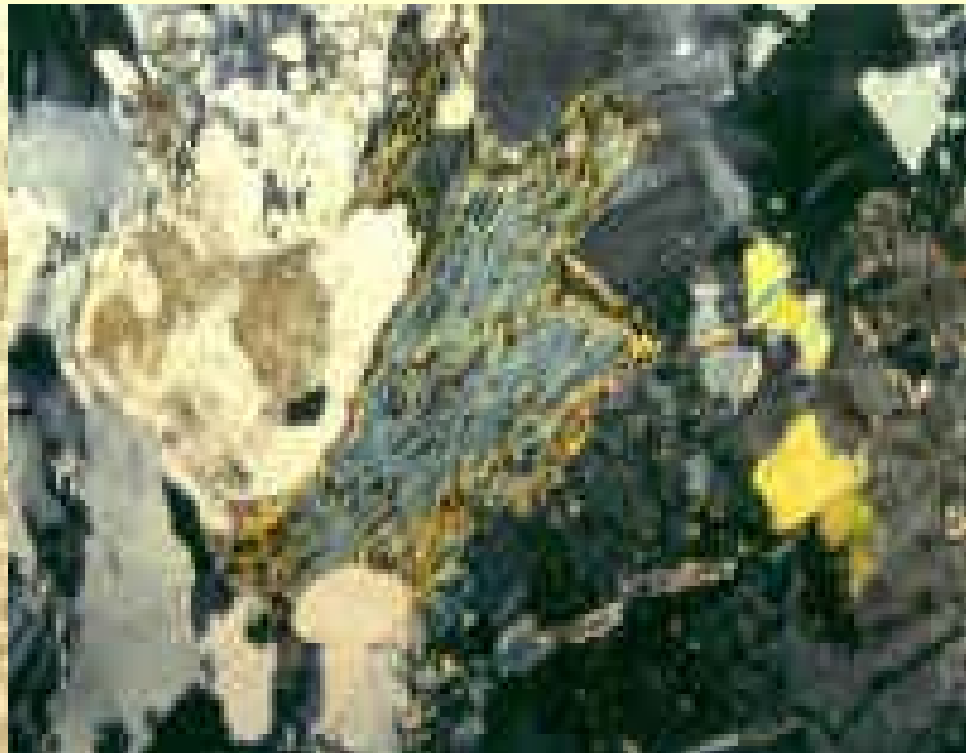
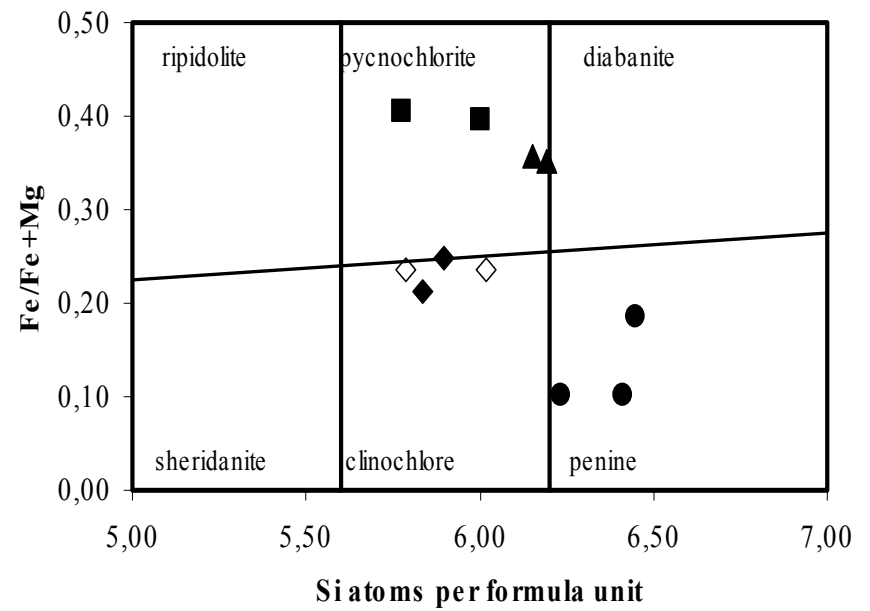
- flogopit je typický pro regionálně i kontaktně metamorfované vápence
- jemnozrný muskovit vzniká hydrotermálně přeměnou silikátů, nejčastěji živců
- pro metamorfní petrologii je důležitá tschermakitová substituce (MgSiAl_2) v muskovitech která indikuje růst tlaku (fengit)

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.
- 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

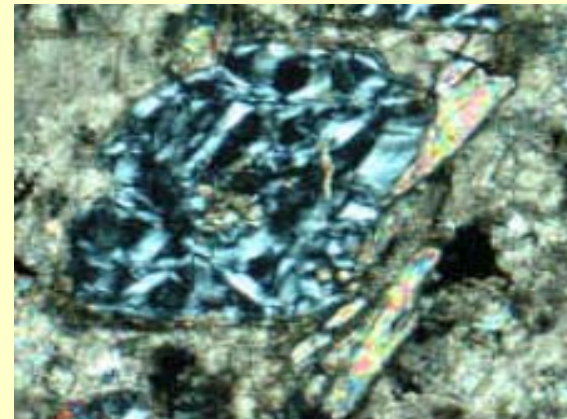


- nejdůležitější jsou:
- **klinochlor**
- $(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- mon.
- **chamosit**
- $(\text{Fe}^{2+},\text{Mg,Fe}^{3+})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{O})_8$
- mon.



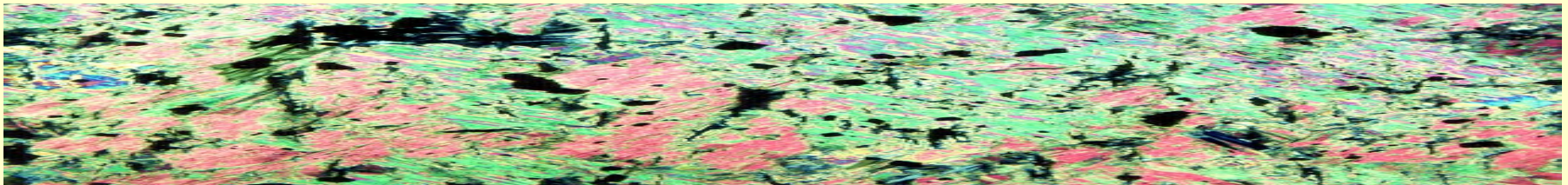
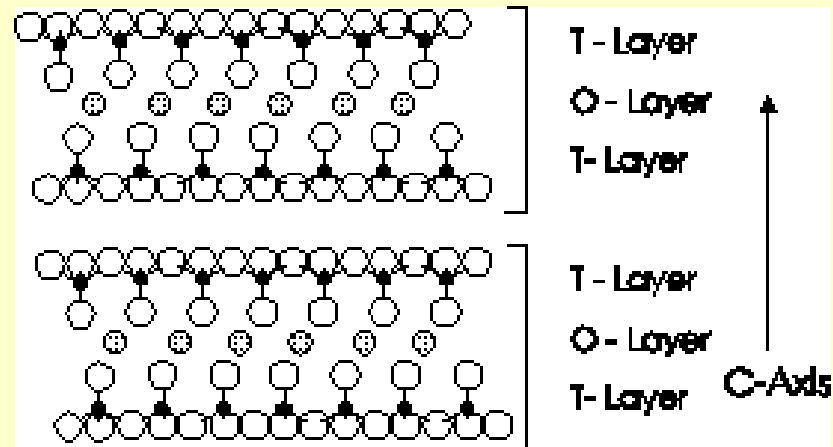
Minerály serpentinové skupiny

- $\text{Mg}_3 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_4$
- **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 trojvrstevých 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 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).

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

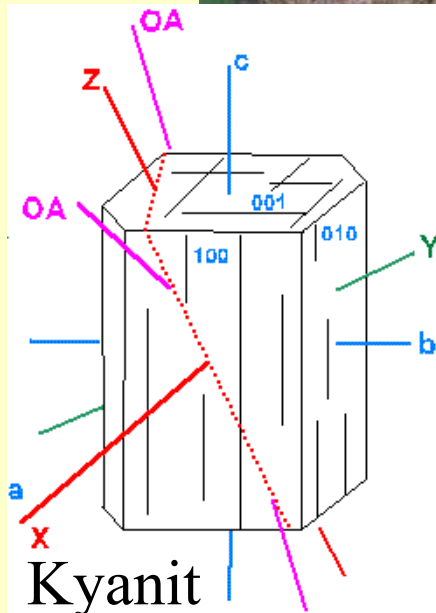
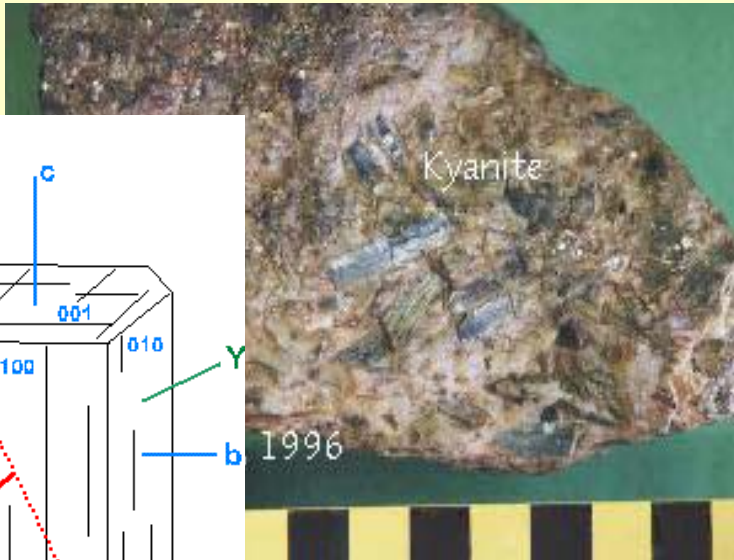
- při nižších teplotách vzniká ve stejném prostředí kaolinit, v alkalickém prostředí muskovit nebo montmorillonit
- bývá přítomen v nížce metamorfovaných metapelitech

MINERÁLY SKUPINY Al_2SiO_5

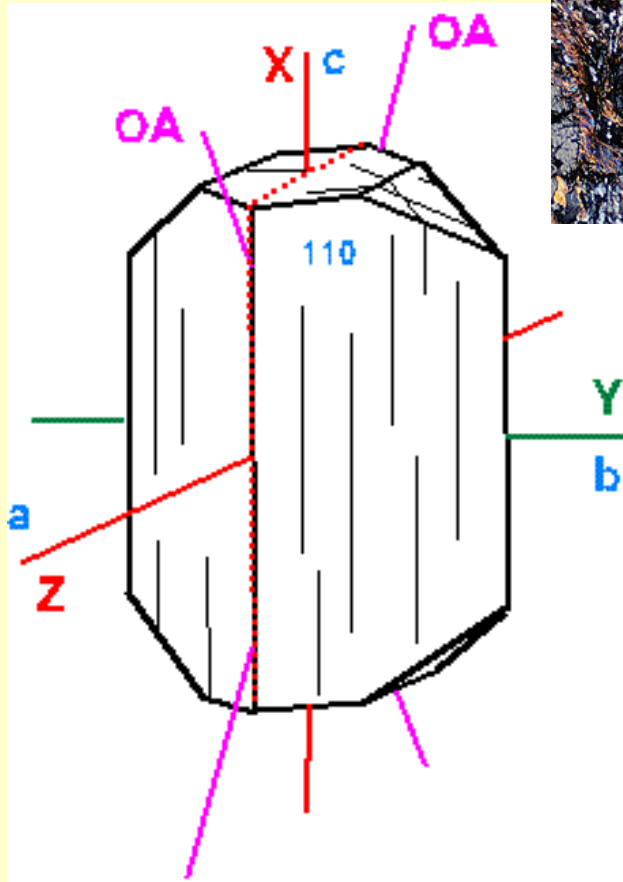
- Do skupiny Al_2SiO_5 patří tři minerály které se vyskytují v Al bohatých hornin:

Kyanit:

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

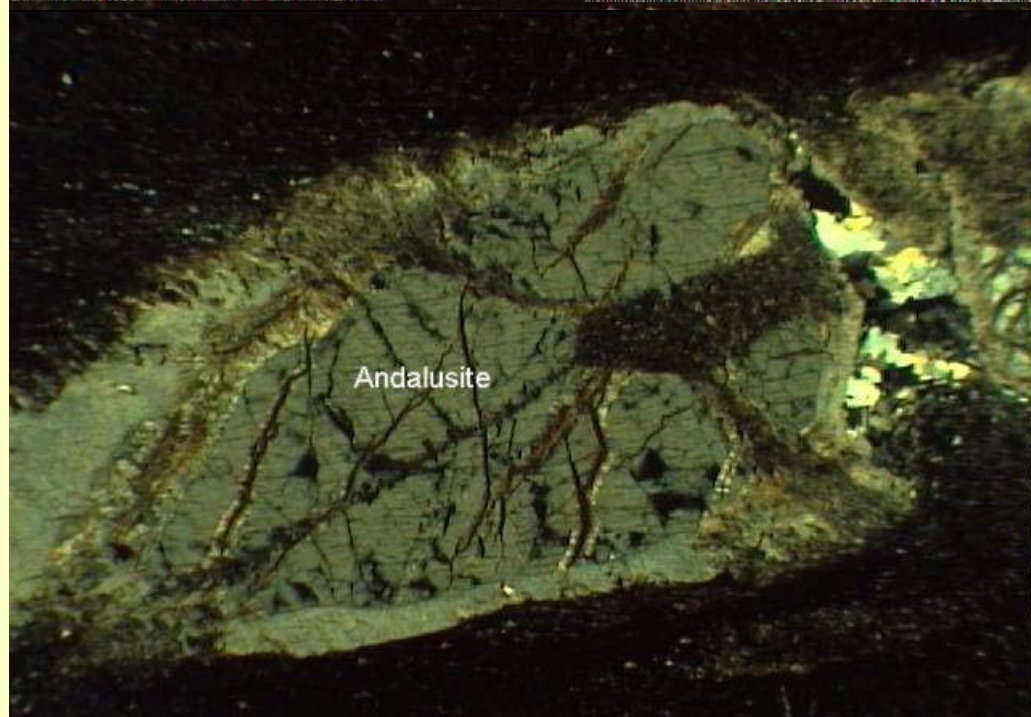


Andalusit



Chlorite +
Muscovite

Andalusite

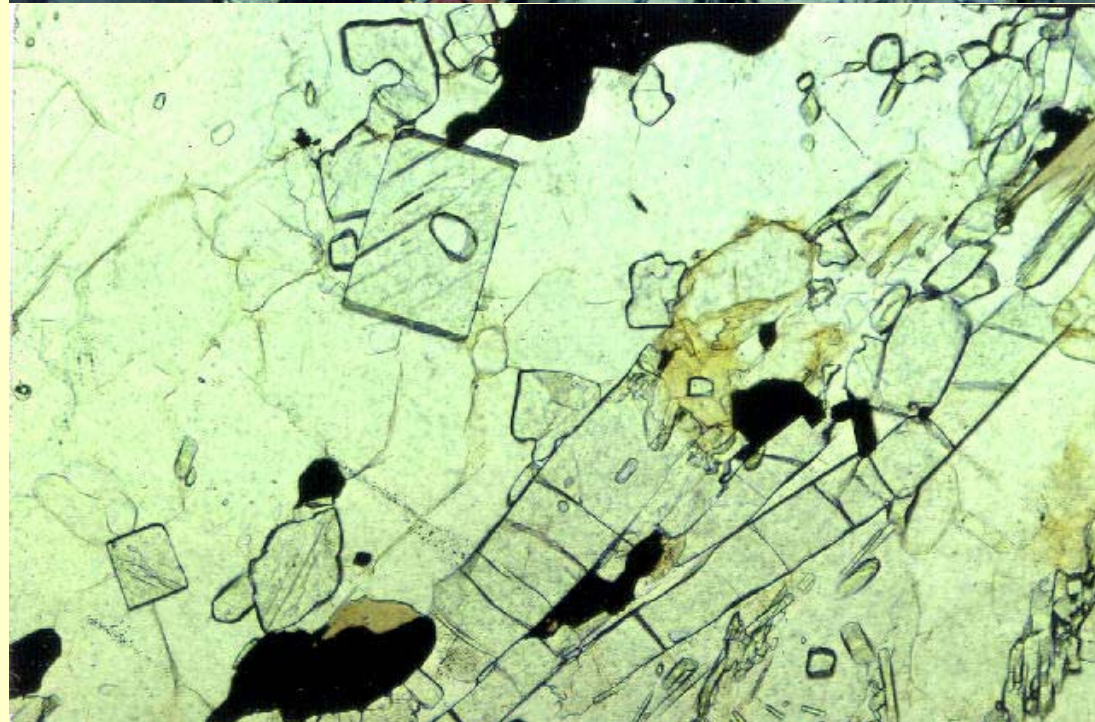
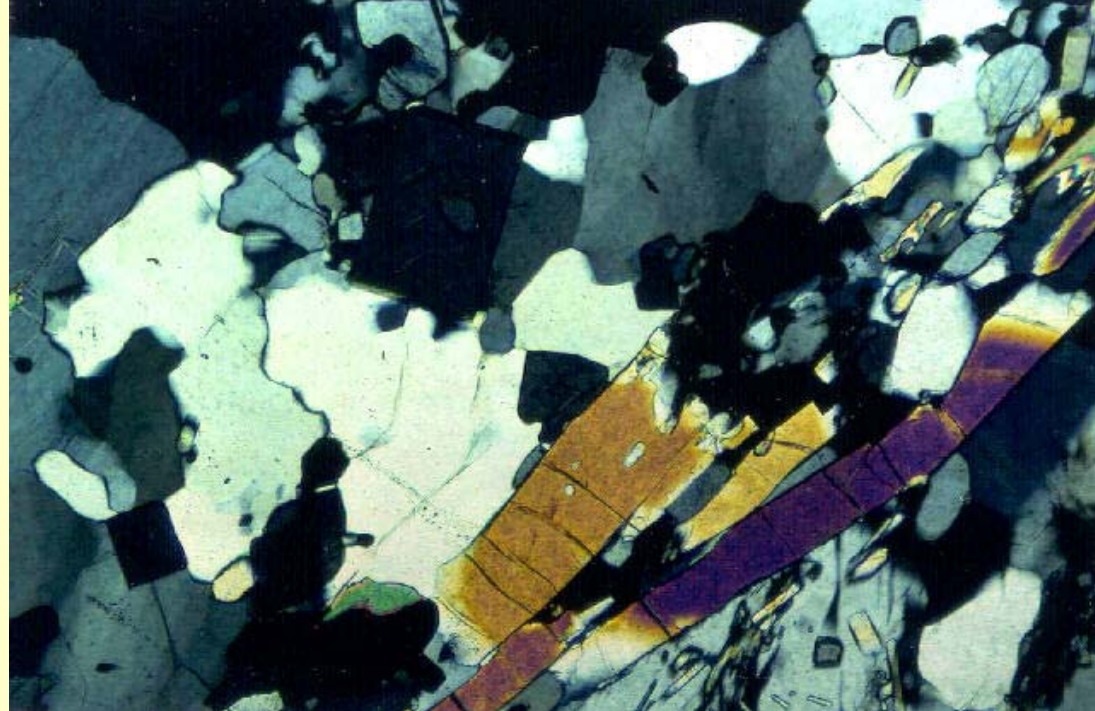
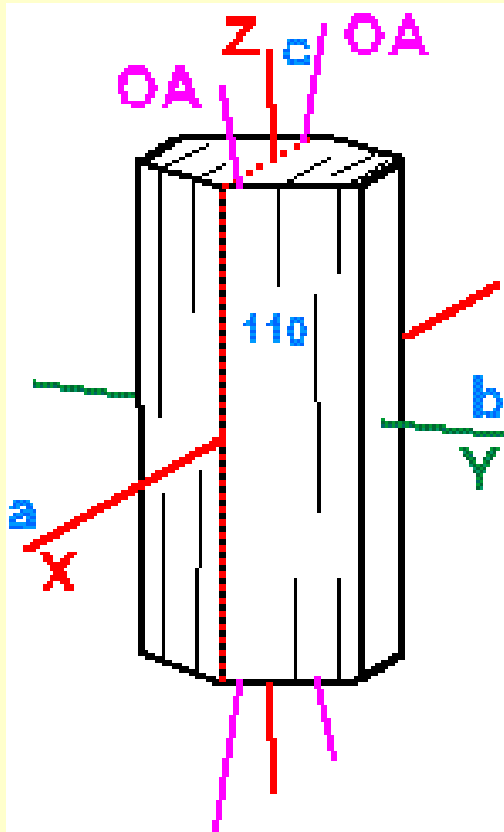


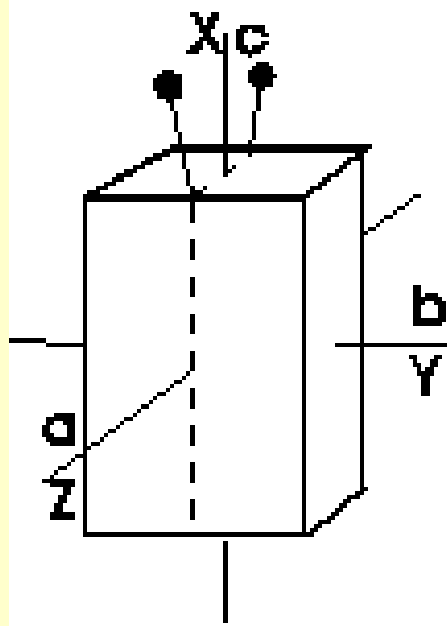
Andalusite

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

Sillimanit

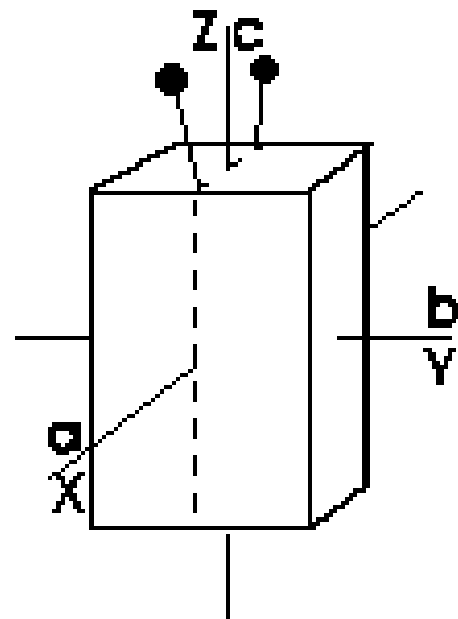
- kosočtverečný
- někdy může obsahovat malé množství Fe a Ti
- vyskytuje se hlavně v Al bohatých metapelitech metamorfovaných v amfibolitové facii





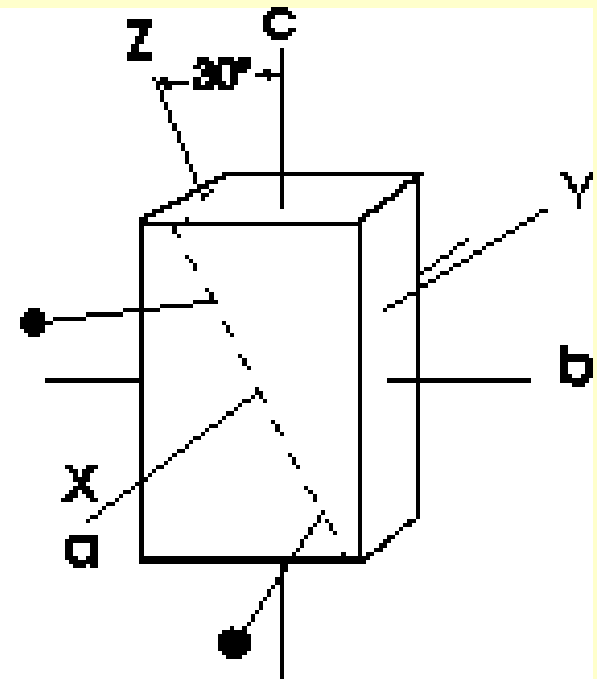
Andalusite

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



Silimanite

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

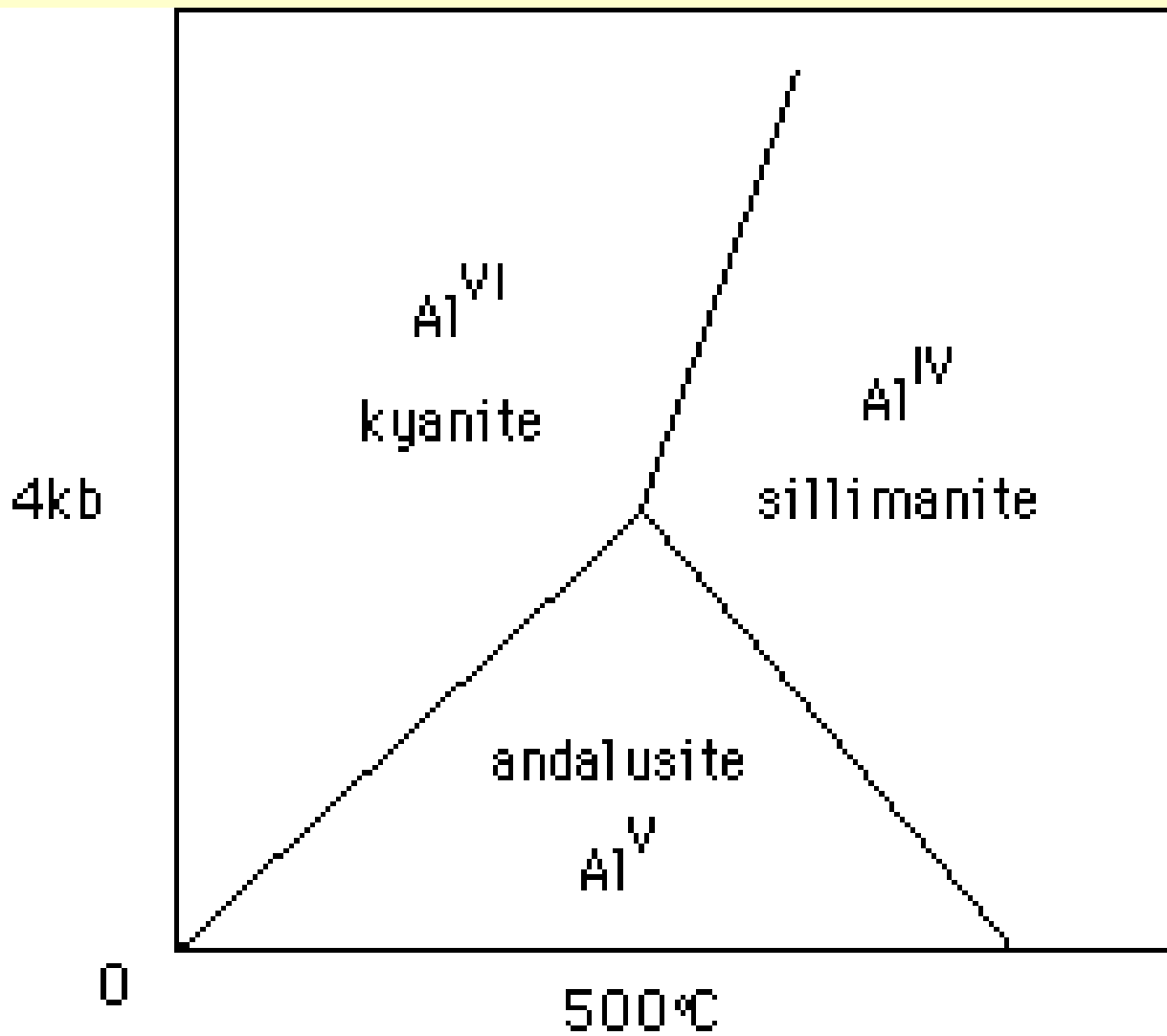


Kyanite

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

– Význam pro petrologii

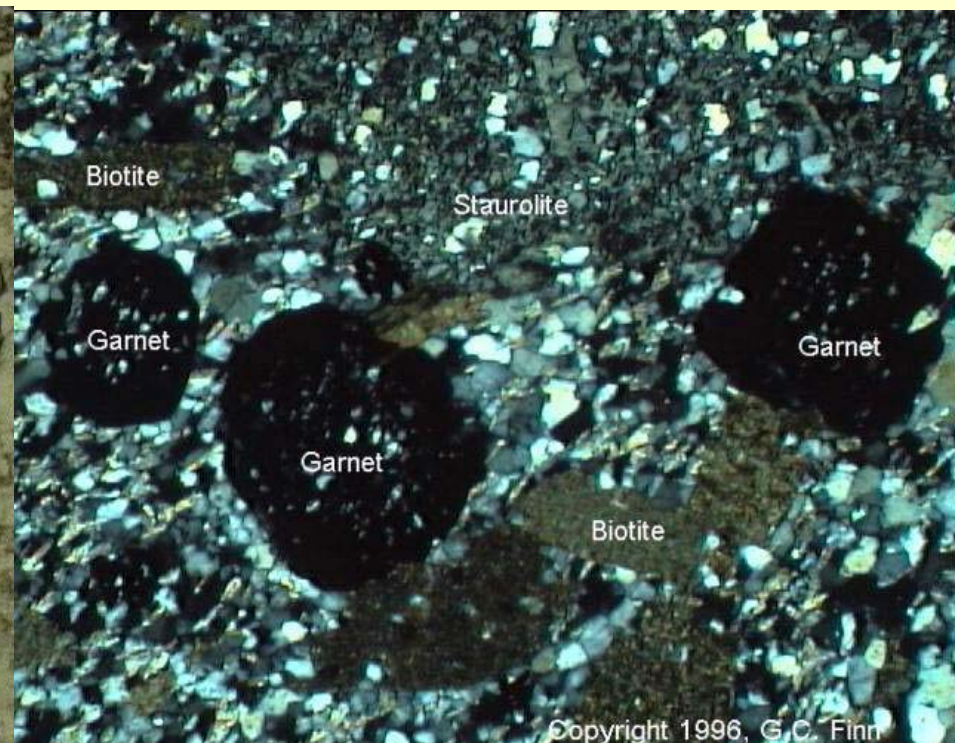
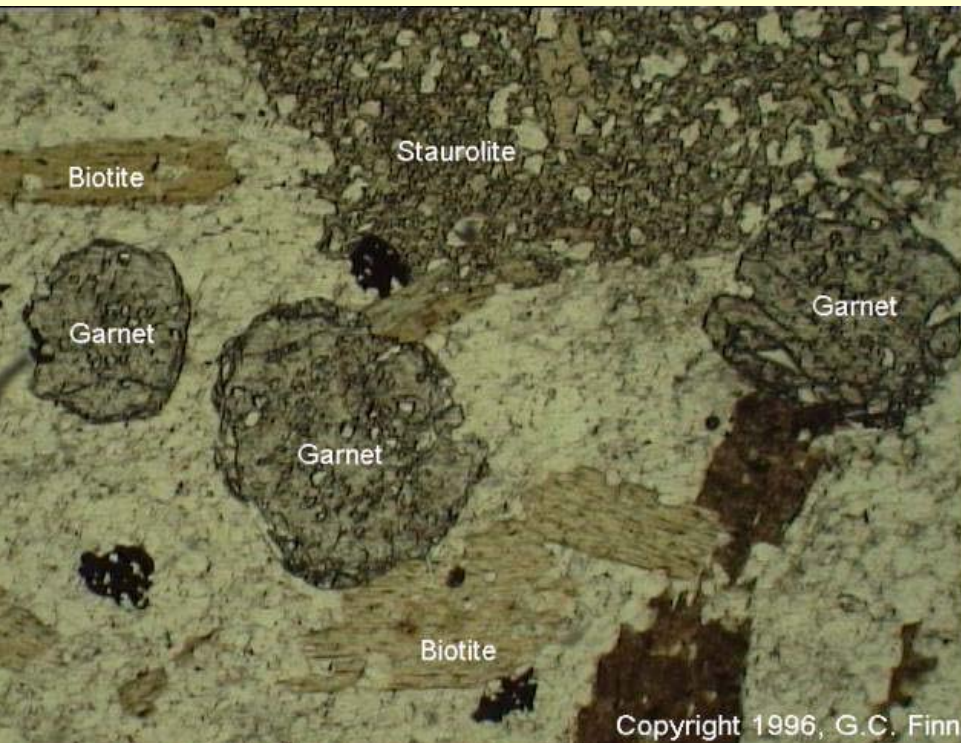
Indikují PT podmínky vzniku horniny. Ukazují že v hornině je dostatek Al aby zde mohli vznikat i jiné hliníkem bohaté indexové minerály.



Obr. Trojný bod minerálů Al_2SiO_5 se podle většiny autorů pohybuje kolem 4 kb a 500 °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

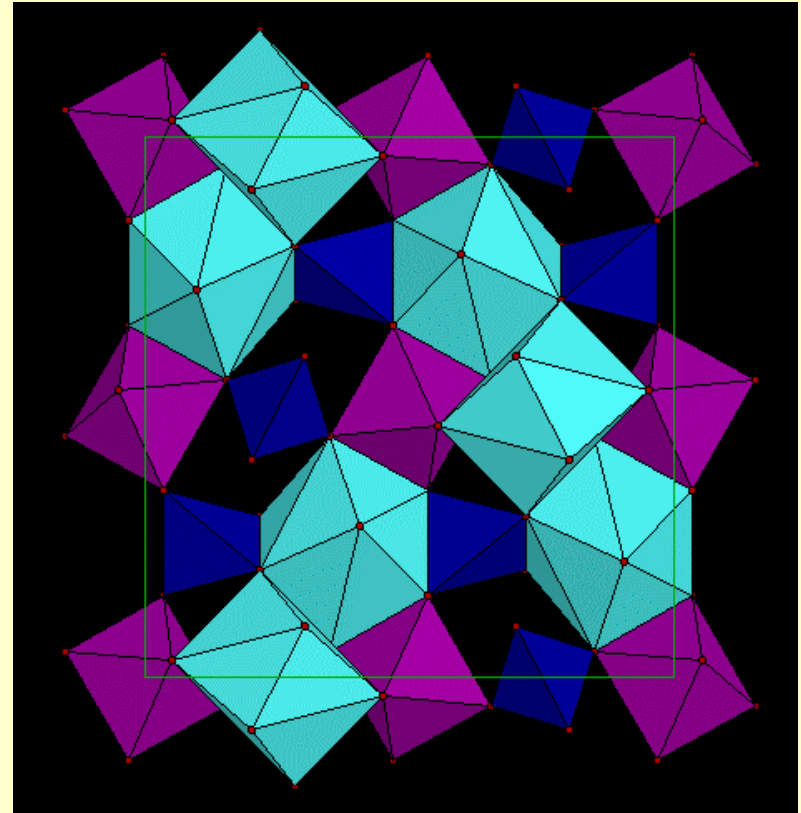
GRANÁTY

- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_3^{2+}B_2^{3+}[SiO_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, 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

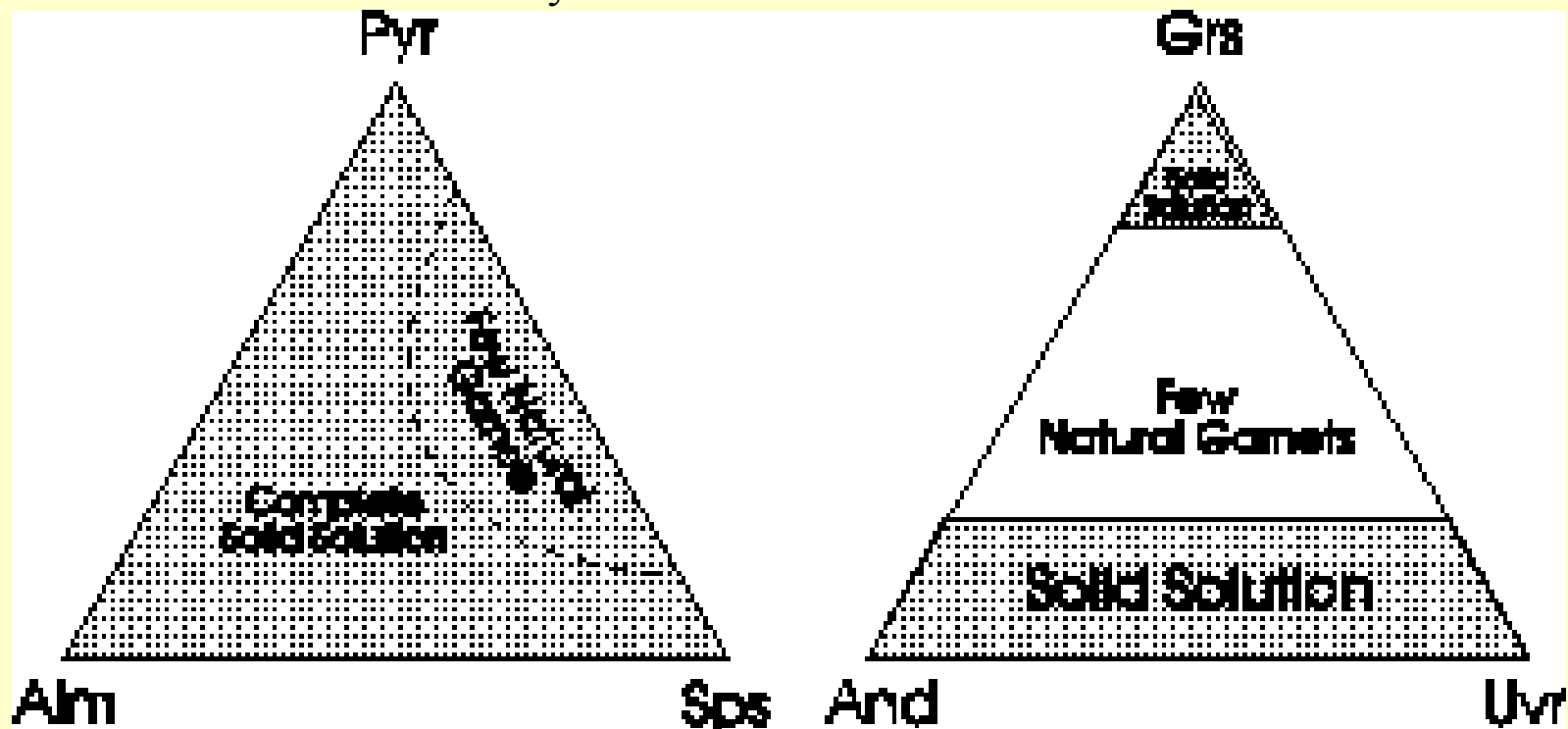
- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_3^{2+}B_2^{3+}[SiO_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, Fe²⁺, Mn, Ca
- Pozici B trojmocné kationty jako Al, Fe³⁺, Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.
- Skupinu granátů tvoří 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 $Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$



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 grosular-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.



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.

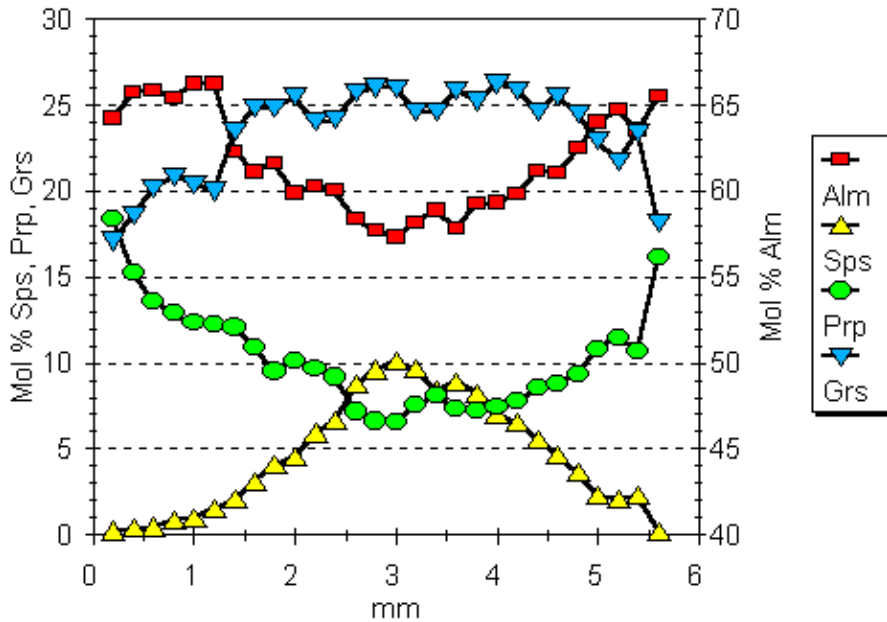
Zonálnost dělíme na:

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

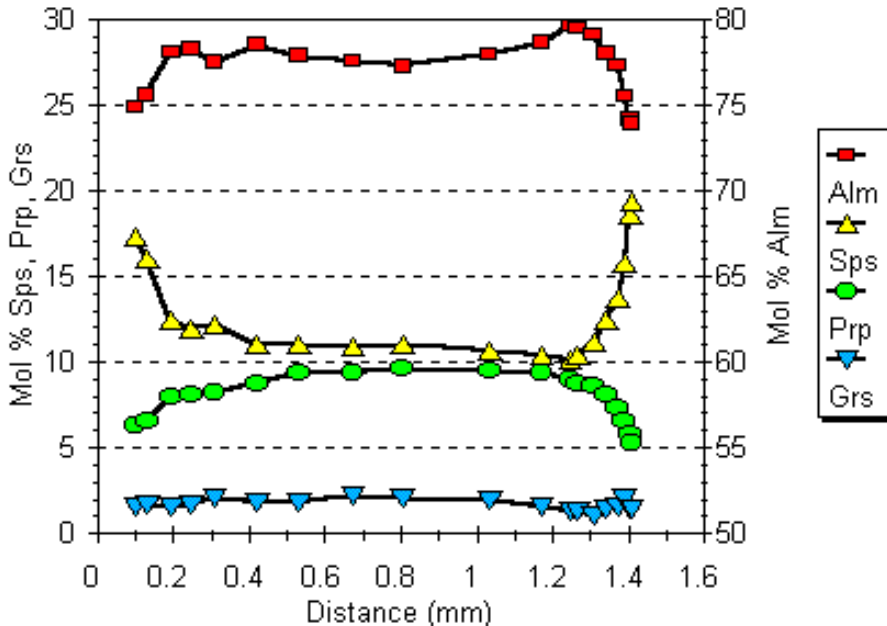
2) Difúzní zonálnost - Vzniká v granátu až po jeho vzniku díky difúzi. Procesy difúze se výrazněji projevují na malých zrnech a na zrnech z více metamorfovaných hornin (difúze roste exponenciálně s rychlostí s níž klesá teplota a proto se difúzní zonálnost výrazněji projevuje u hornin vyššího stupně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

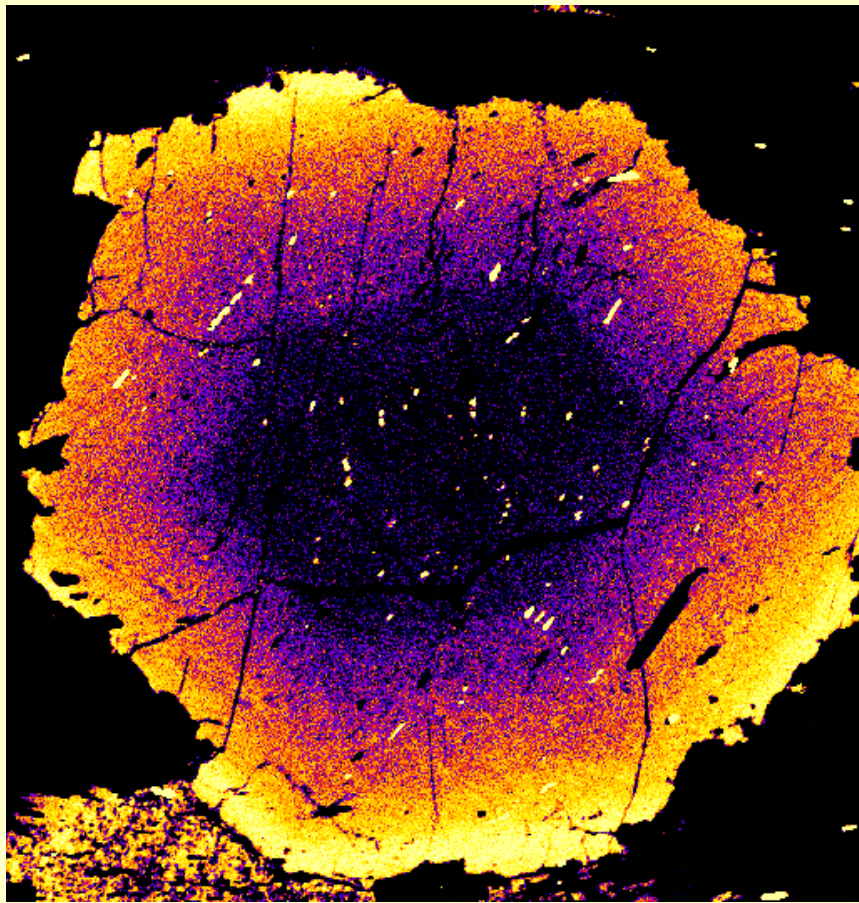
Zonálnost přírodních granátů je většinou výsledkem kombinace růstové a difúzní zonálnosti.

Suru Valley traverse
L429 Donara nappe



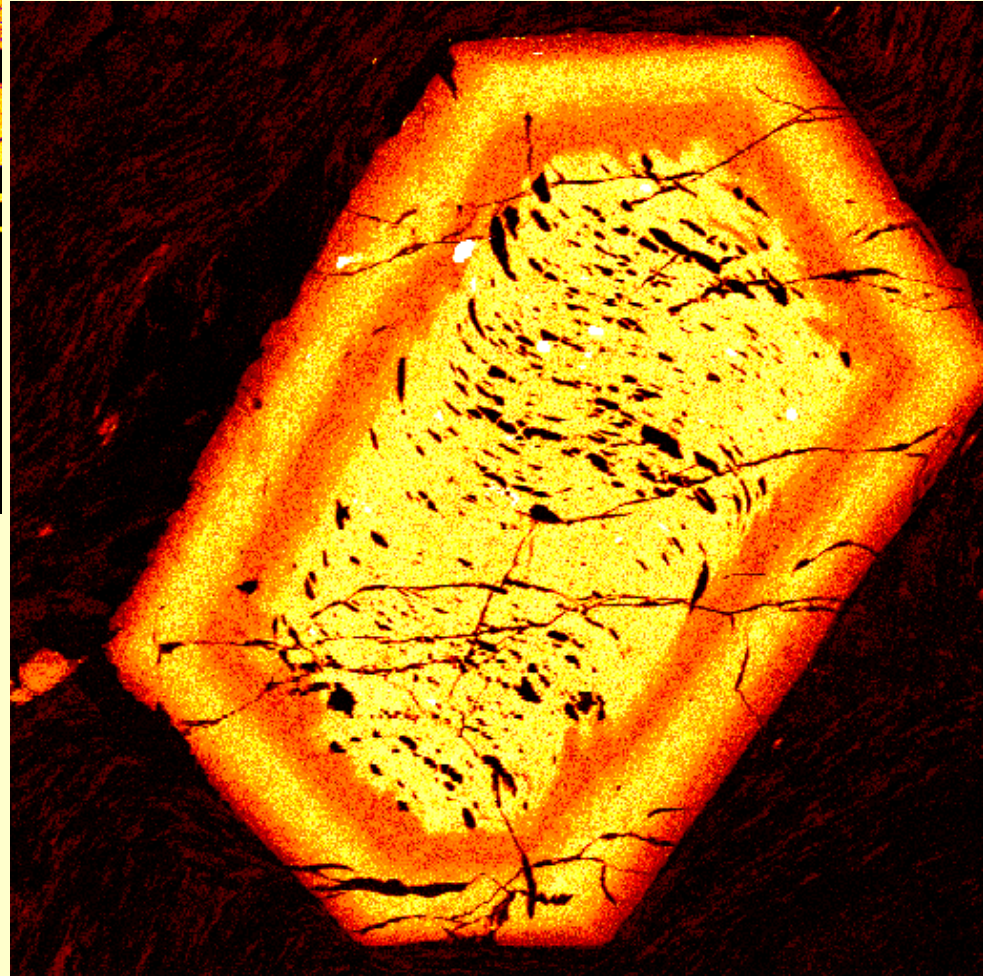
Umasi La Traverse
ZD52 Malung Tokpo (MWD)





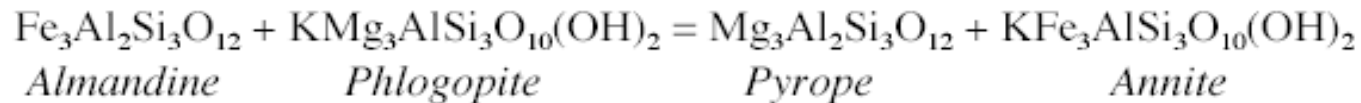
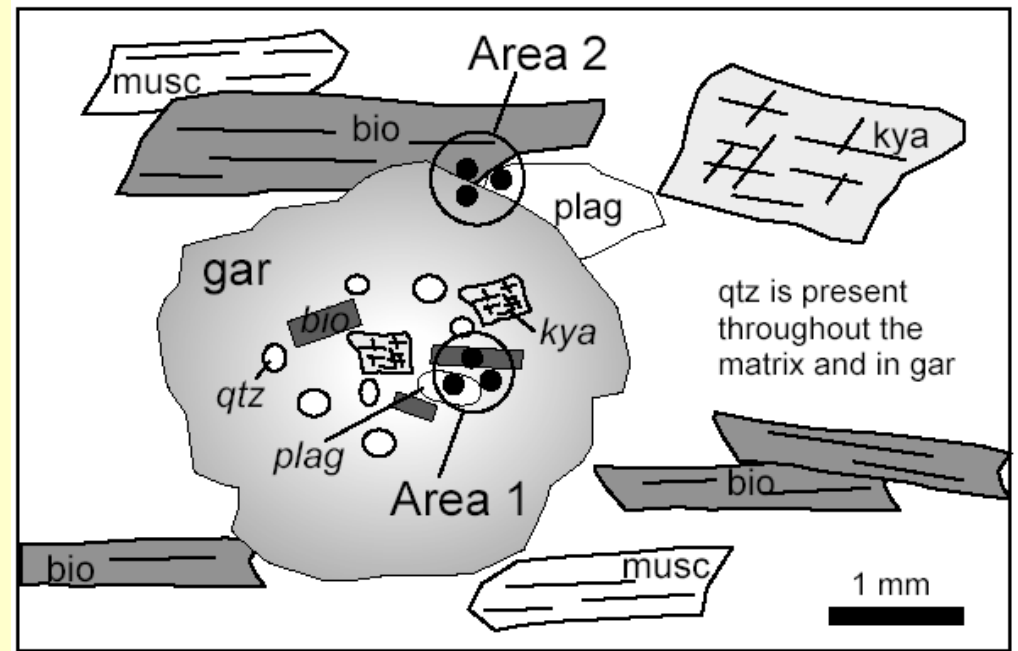
•2) Střední část zrna je tvořena Ca-bohatým jádrem s četnými inkluzemi které mají S-stavbu. Na toto jádro narůstá mladší granát.

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



B) Geothermometry a geobarometry

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



This distribution is described by the following equation:

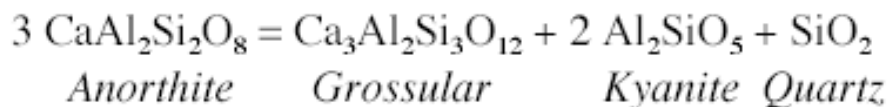
$$\ln K_{Fe-Mg}^{Gt-Bt} = -\left(\frac{52,108}{3R}\right)\frac{1}{T} + \frac{19.51}{3R} - P\left(\frac{0.238}{3R}\right)\frac{1}{T}$$

where

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

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 J mol⁻¹ 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 γ values are themselves functions of composition and temperature).

STAUROLIT

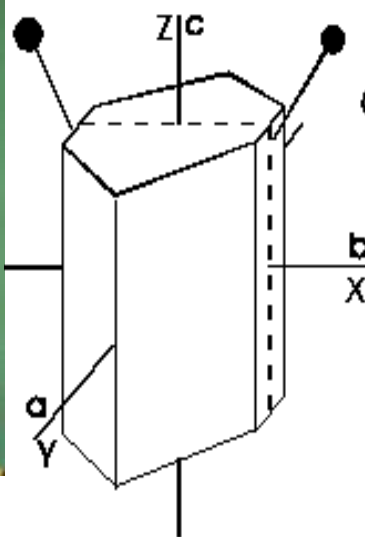
- monoklinický
- typický metamorfní minerál (hlavně metapelity)
- $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- Fe^{2+} je v tetraedrické koordinaci a může být nahrazováno Mg^{2+} a Zn^{2+} .
- většina staurolitů má je bohatá Fe: $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,86 - 0,55$
- $\text{Mg}/(\text{Fe}+\text{Mg}+\text{Zn}) = 0,09$ to $0,28$
- Často se vyskytuje v malém množství Zn (až 0,7 apfu)
- devět kationtů Al^{3+} v oktaedrické pozici může být částečně nahrazeno Fe^{3+} nebo Ti, Al^{3+} může být až z 20% substituován Fe^{3+} nebo Ti^{4+} (až 0.32 apfu Ti)
- substituce Ti v oktaedrické pozici bývá doprovázena substitucí Al^{3+} za 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)
 α 1.736-1.747
 β 1.740-1.754
 γ 1.745-1.762
 δ 0.009-0.015
 $2V$ 80-90°

α = colorless
 β = pale yellow
 γ = golden yellow

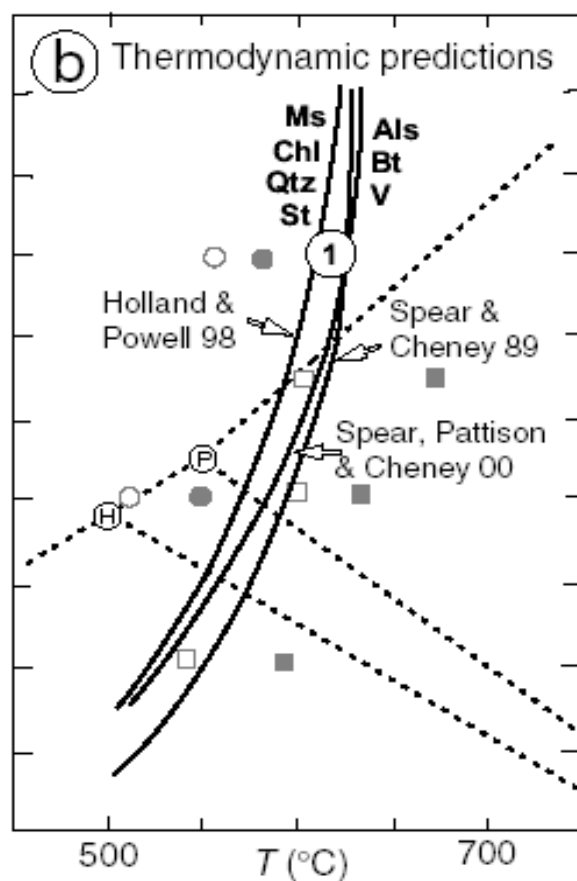
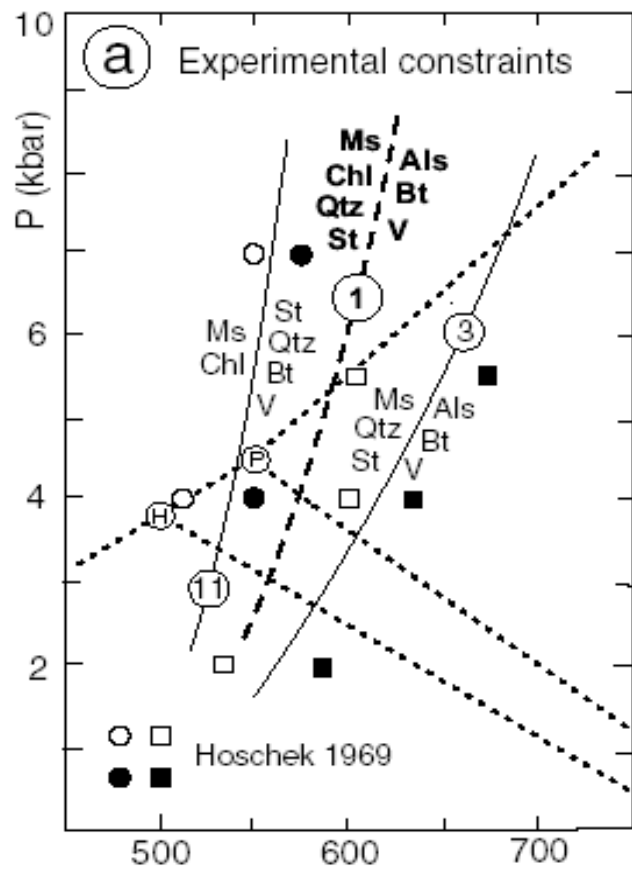
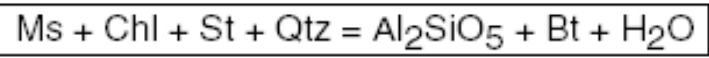


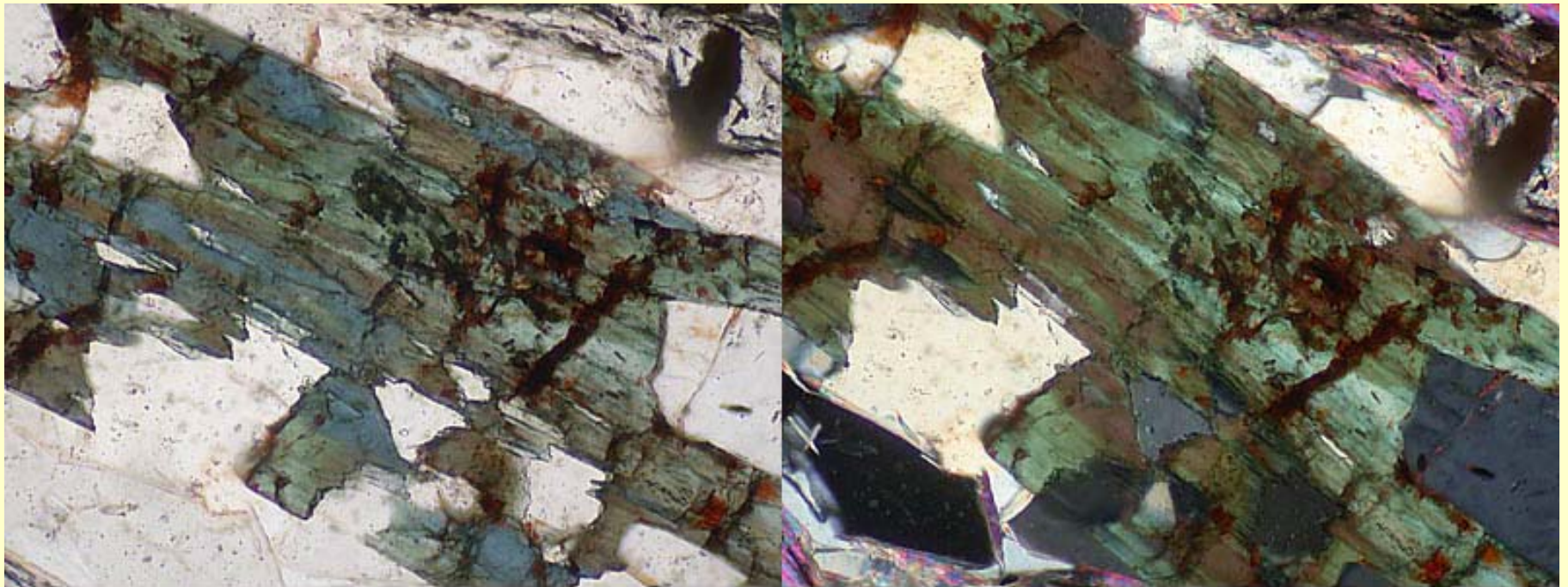
FIGURE 3. Experimental constraints (a) and thermodynamic constraints (b) on reaction 1, with the Al_2SiO_5 phase boundaries for reference. The reaction positions in (a) are sketched in by eye. The Spear, Pattison, and Cheney (2000, unpublished) data base is discussed in Pattison et al. (2002). H = triple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

Chloritoid

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

Vznik chloritoidu ($\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$): Fe-chlorit + pyrofyilit = Fe-chloritoid + křemen + H_2O

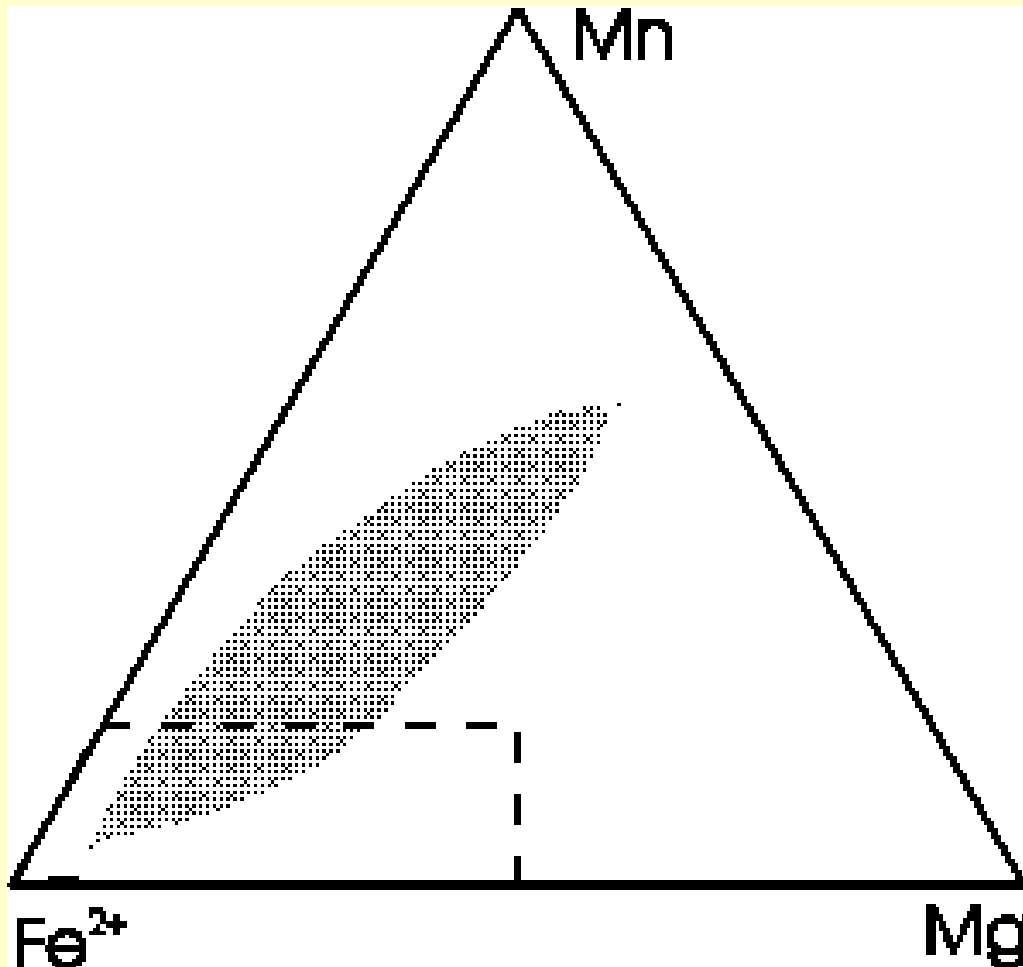
Reakce konzumující chloritoid ($\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$): chloritoid + biotit = granát + chlorit,
Fe-chloritoid = Fe-staurolit + almandin + H_2O a chloritoid = granát + chlorit + staurolit + H_2O



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

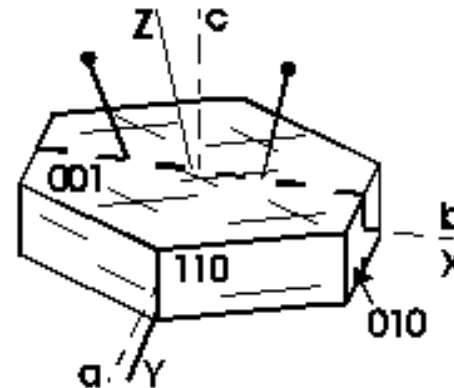
chloritoid bohatý železem a někdy také Mn je běžný v nížce metamorfovaných metapelitech (fylity) a to v asociaci chlorit, fengit a světlá slída bohatá na paragonitovou komponentou

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



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

Monoclinic or Triclinic (+) or (-)



α 1.705-1.730
 β 1.708-1.734
 γ 1.712-1.740

δ 0.005-0.022
 $2V_r$ 37-124°

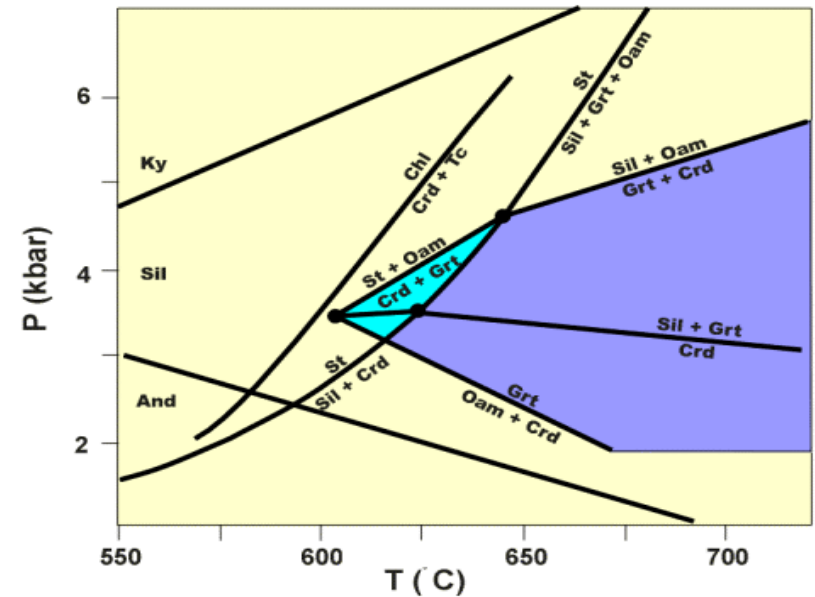
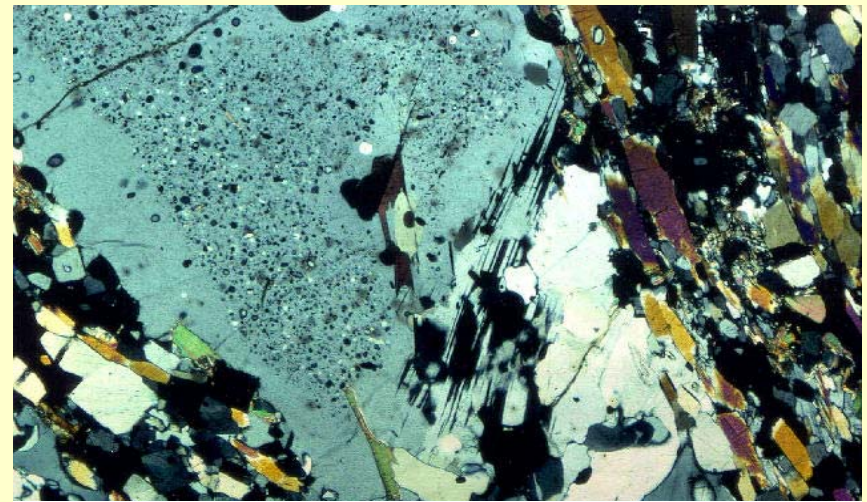
Pleochroism

α - pale gray green to green
 β - slaty blue to indigo
 γ - 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

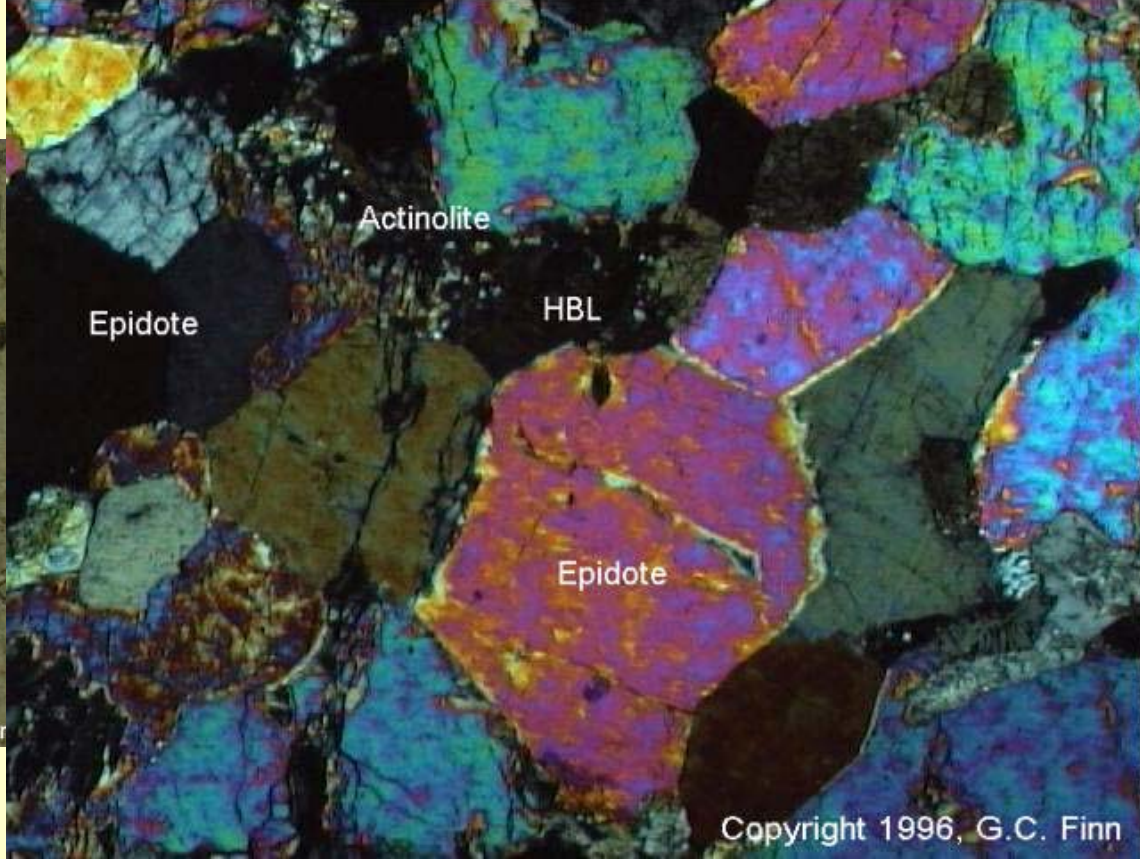
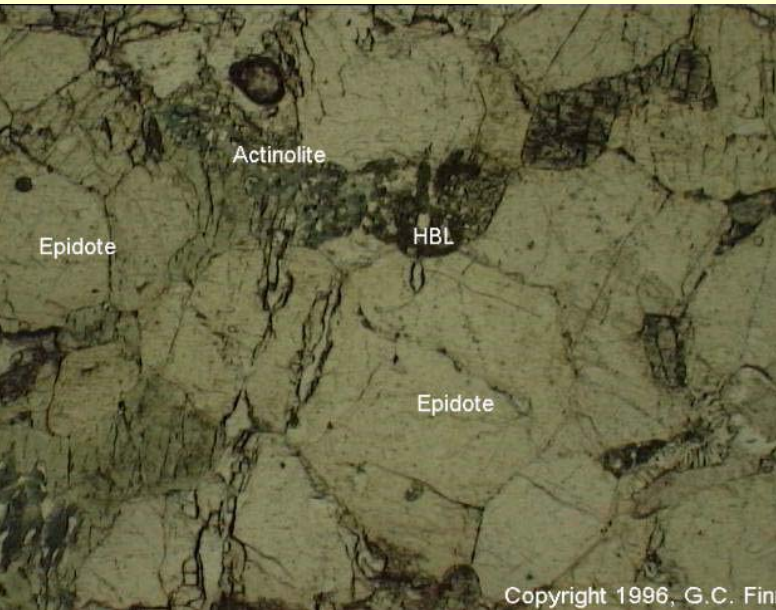
KMASH: flogopit + sillimanit = Mg-cordierit + muskovit

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

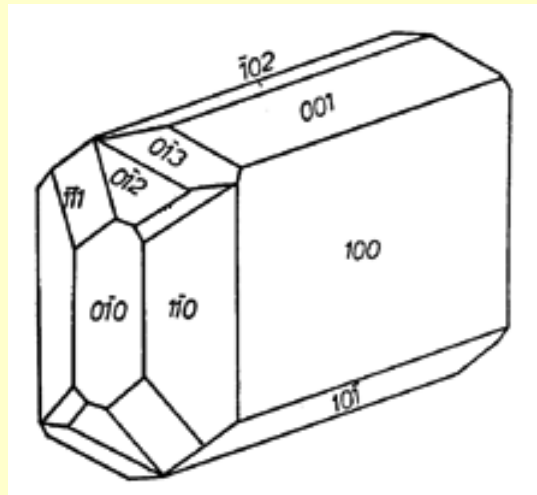
KFMASH: biotit + sillimanit = granát + cordierit + H_2O

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

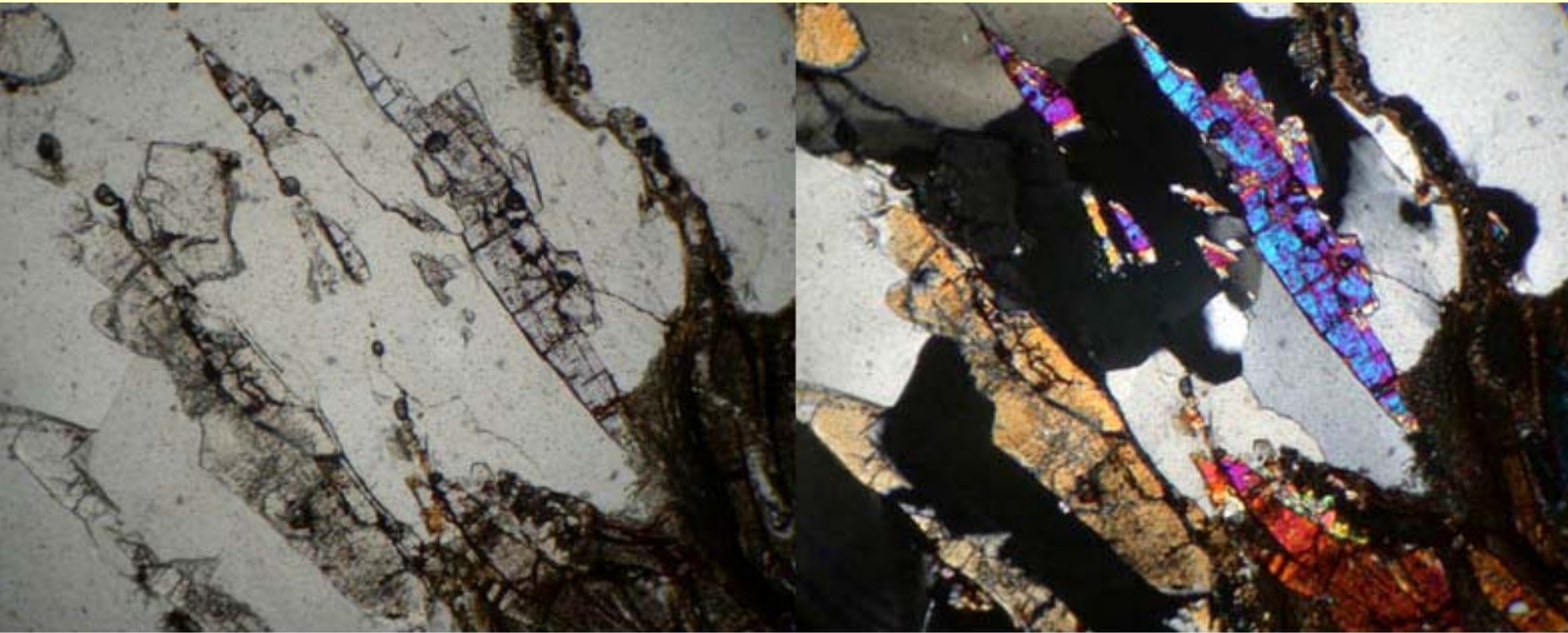
Skupina epidotu



- 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

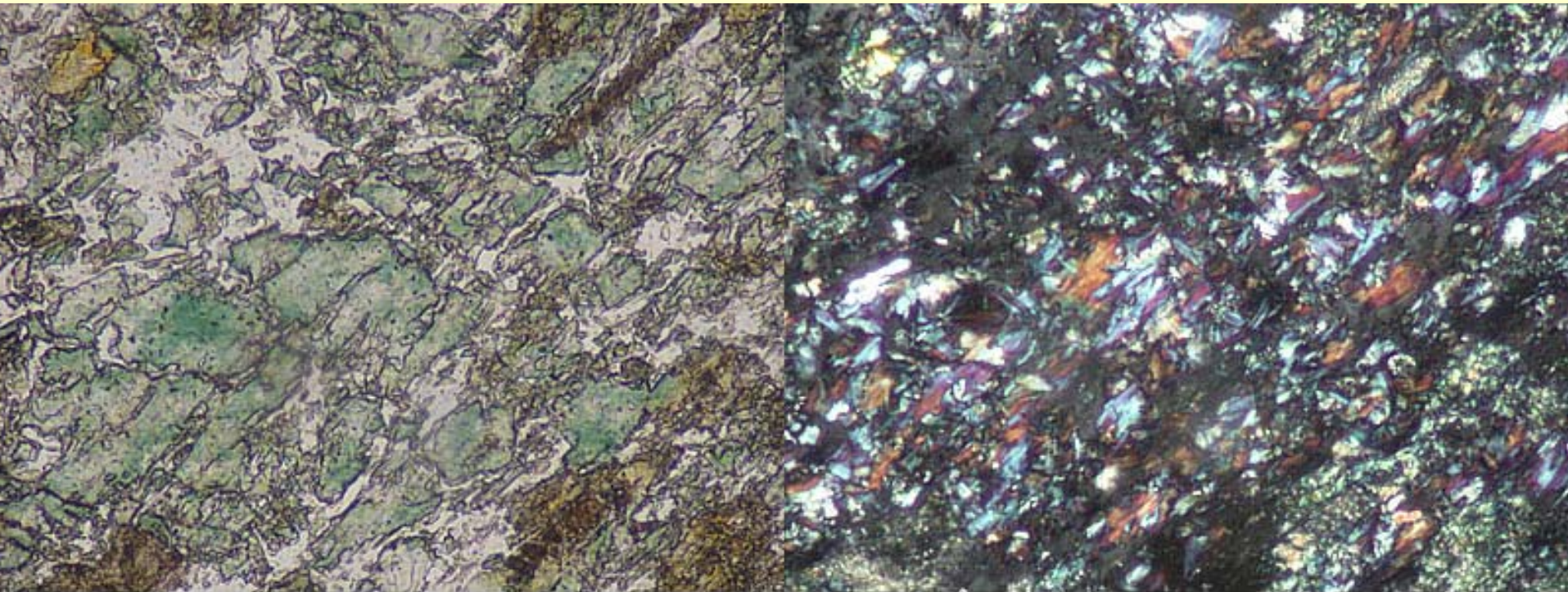


- **Lawsonit**
- Sorosilikát
- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$
- Výskyt: metabazity



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 a metabasalt.

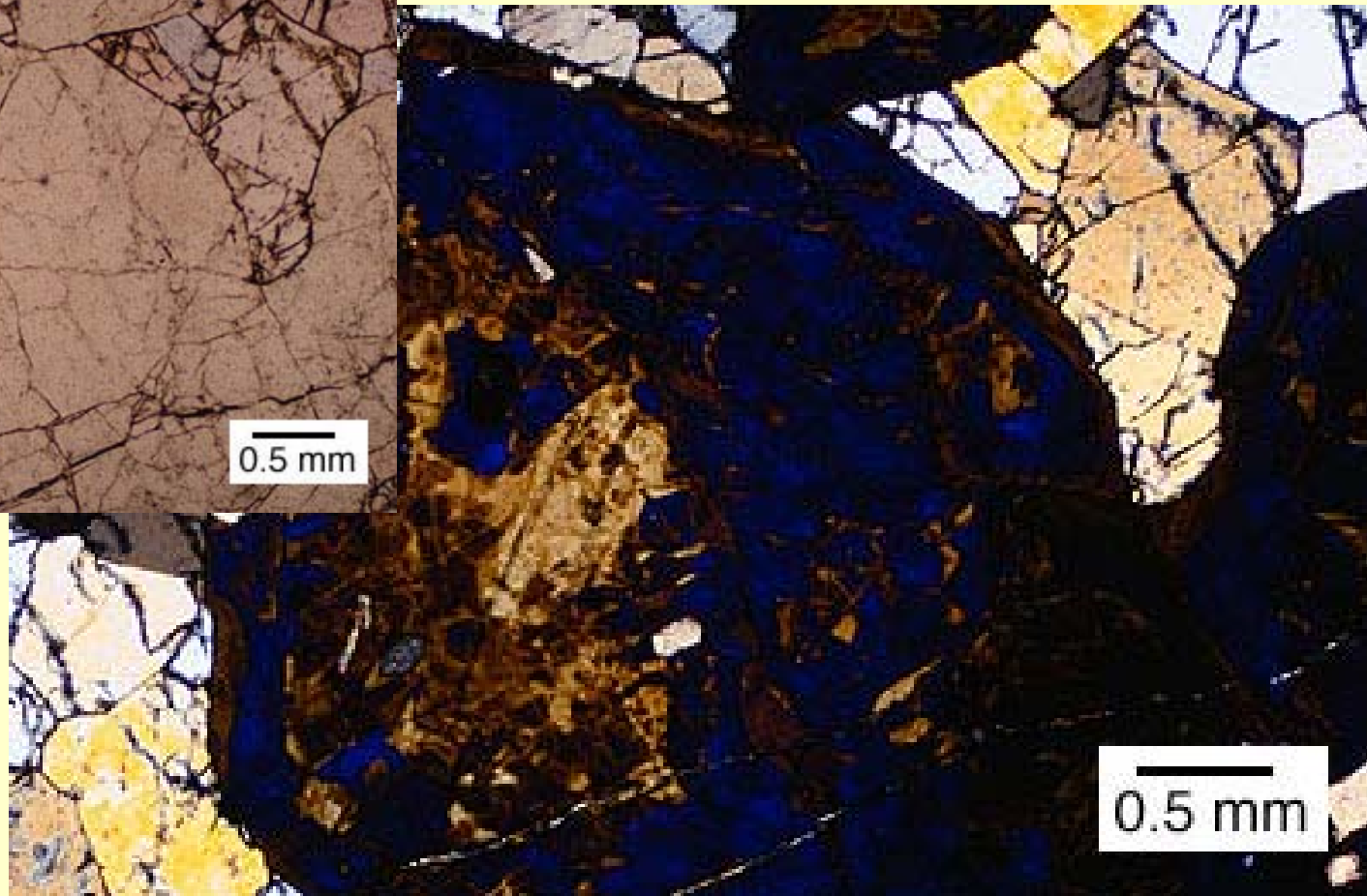
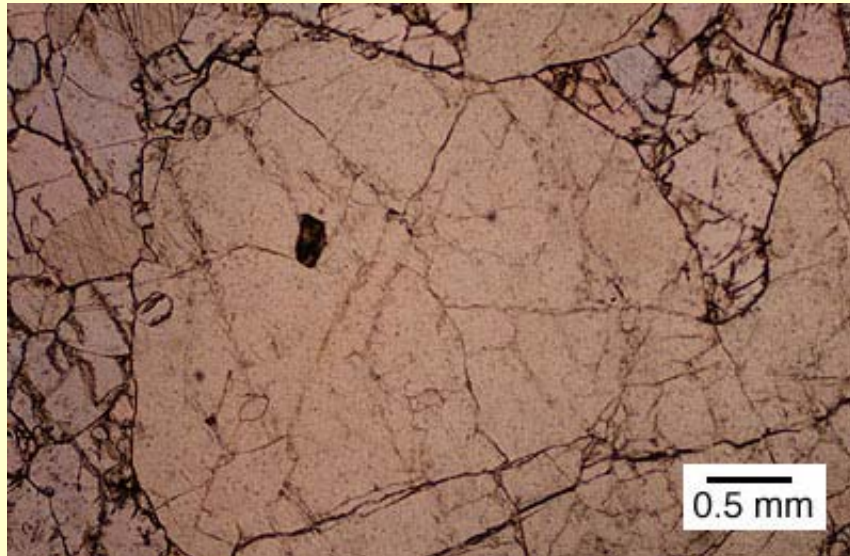
- **Prehnit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Výskyt: metabazity



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 CaMgSiO_4

Ca → M2 (velký ion)

ve vysoce metamorfovaných karbonátech s příměsí silikátů.

M_2TO_4

8-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		Tephrolite		
Ca Mg		Monticellite	Mn^{2+}	
Ca Fe		Kirschsteinite		
Ca Mn		Glaucochroite	Ca^{2+}	

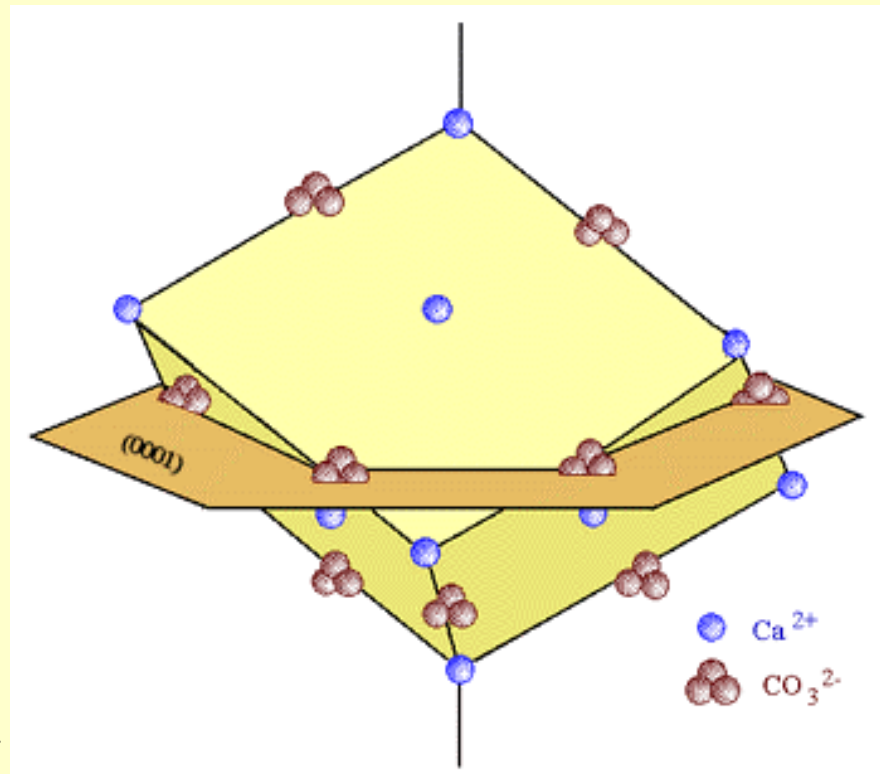
UHLIČITANY

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

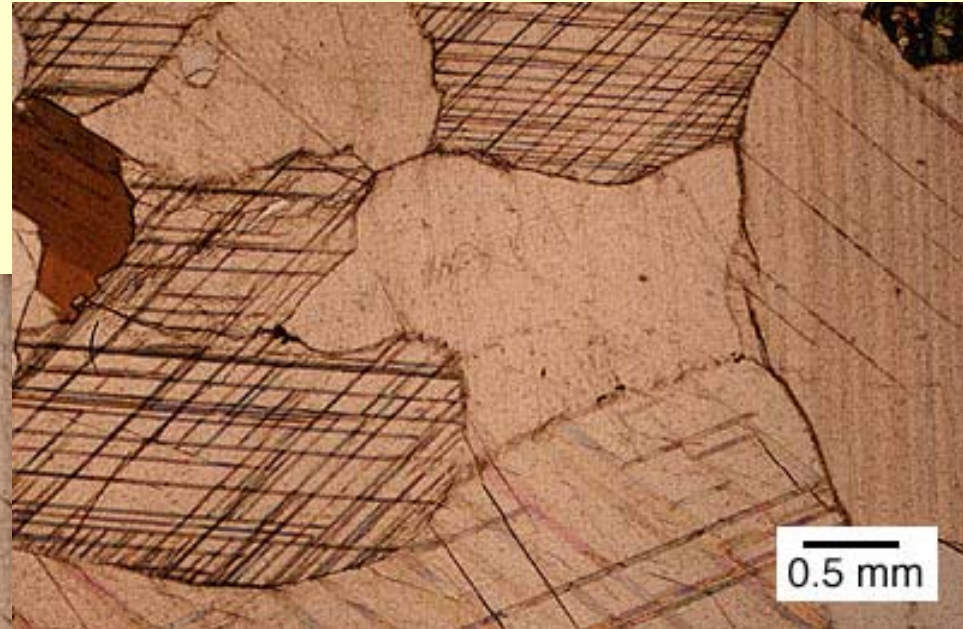
Chemicky je to podvojný uhličitán ve kterém se poměr mezi atomi Ca a Mg pohybuje kolem hodnoty 1:1.

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



Obr. Struktura kalcitu

- **SIDERIT** 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 míšivost.
- 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 Fe_3O_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 $ZnFe_2O_4$**
- **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

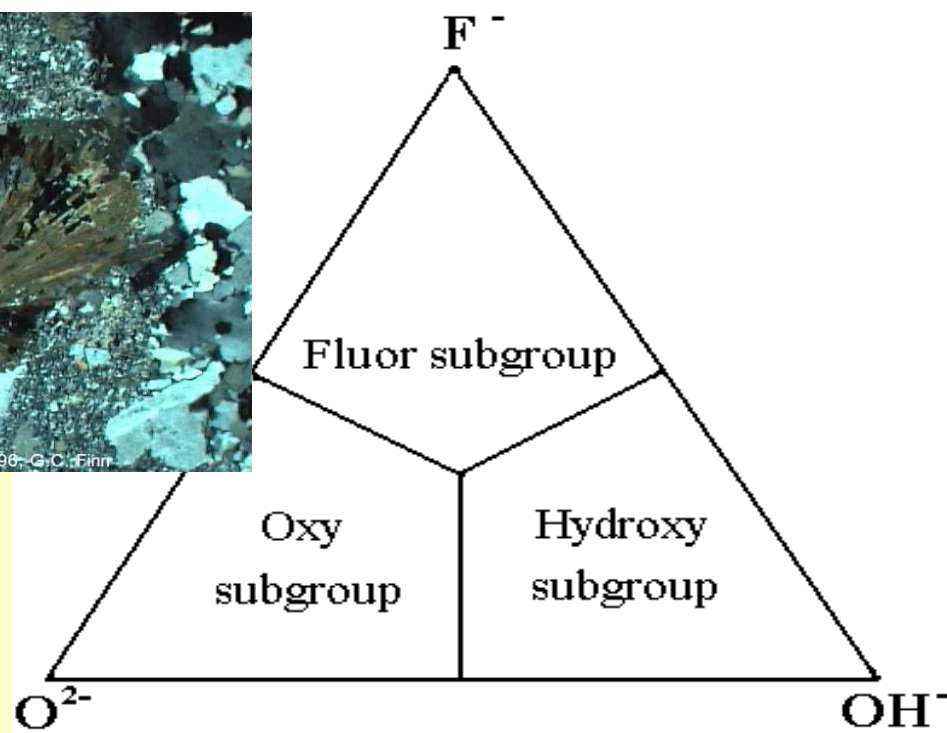
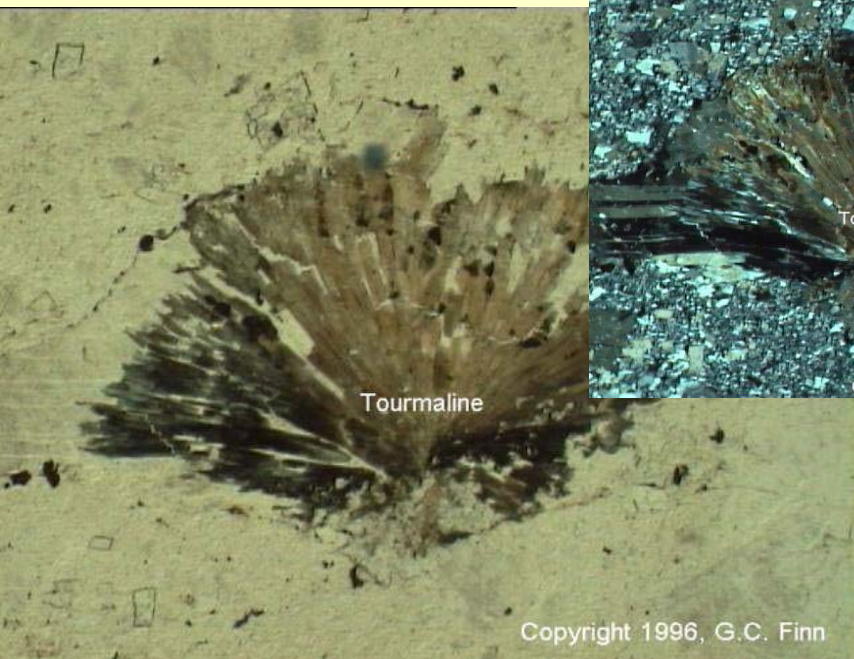
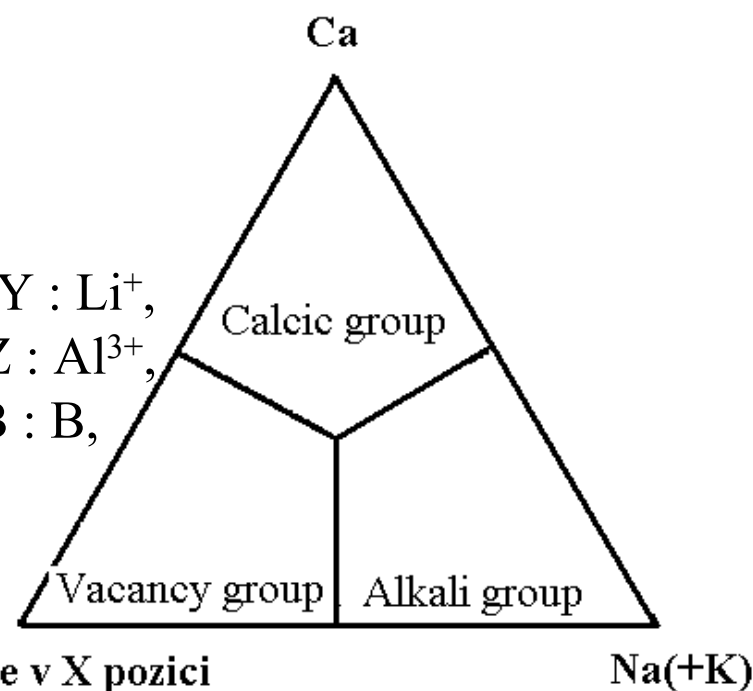
•Chemický vzorec $X Y_3 Z_6 [T_6 O_{18}] [BO_3]_3 V_3 W$

•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

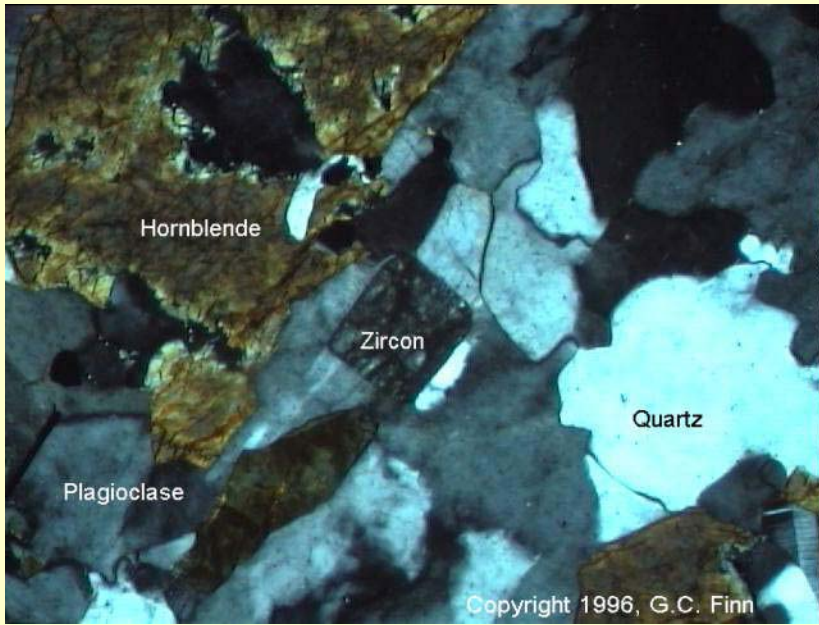
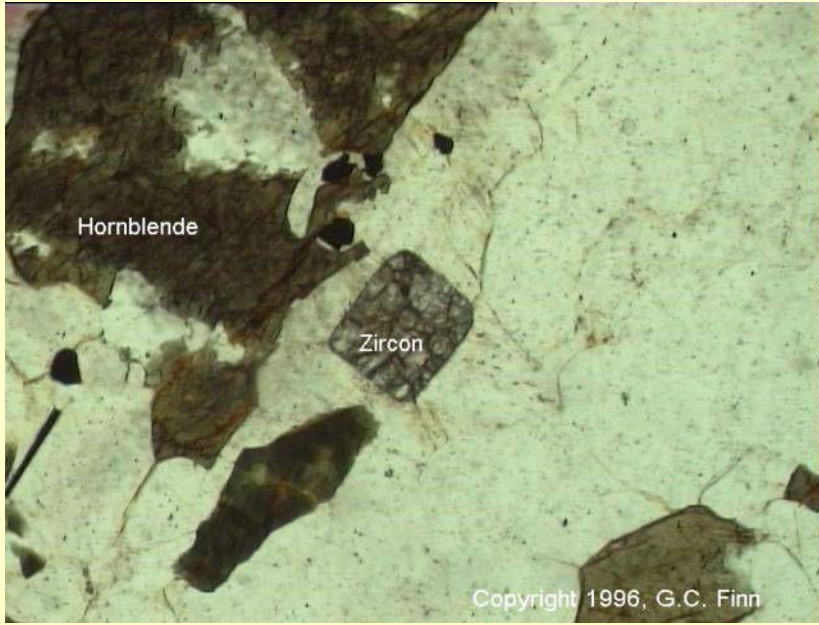
•Soustava: trigonální

•Cyklosilikáty s šestičetným kruhem

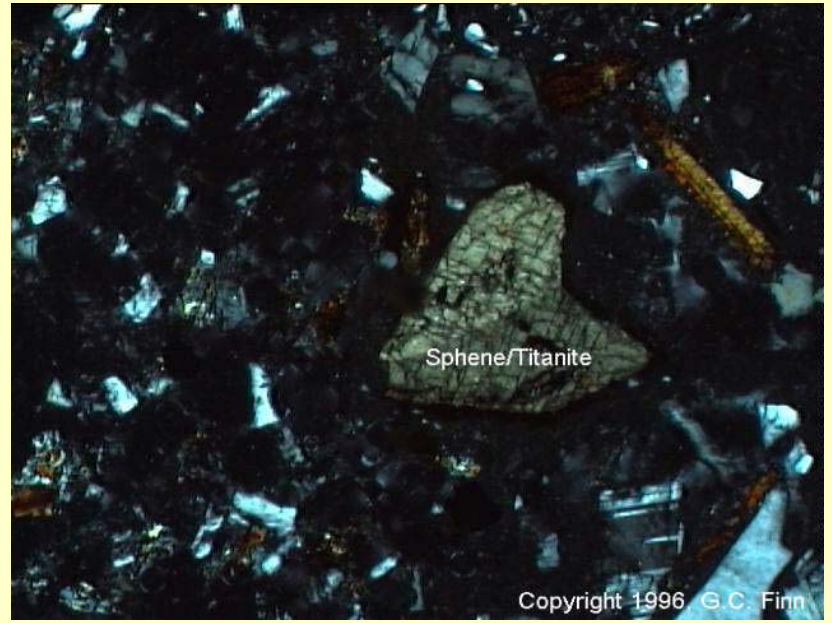
•Metapelity, metagranity



• **Zirkon $Zr(SiO_4)$**



Titanit $CaTi(O/SiO_4)$



C) Fosfáty

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

A = Apatite



Copyright 1996, G.C. Finn

Monazit, xenotim

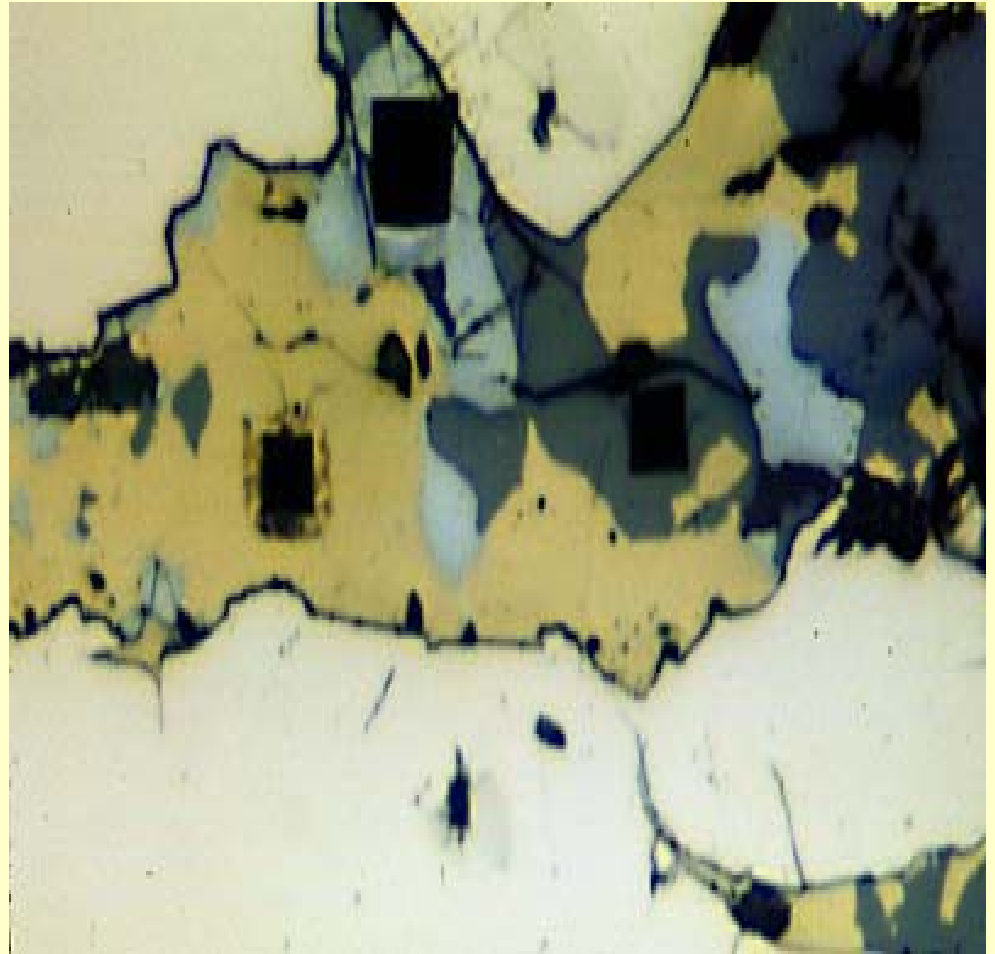
A = Apatite



Copyright 1996, G.C. Finn

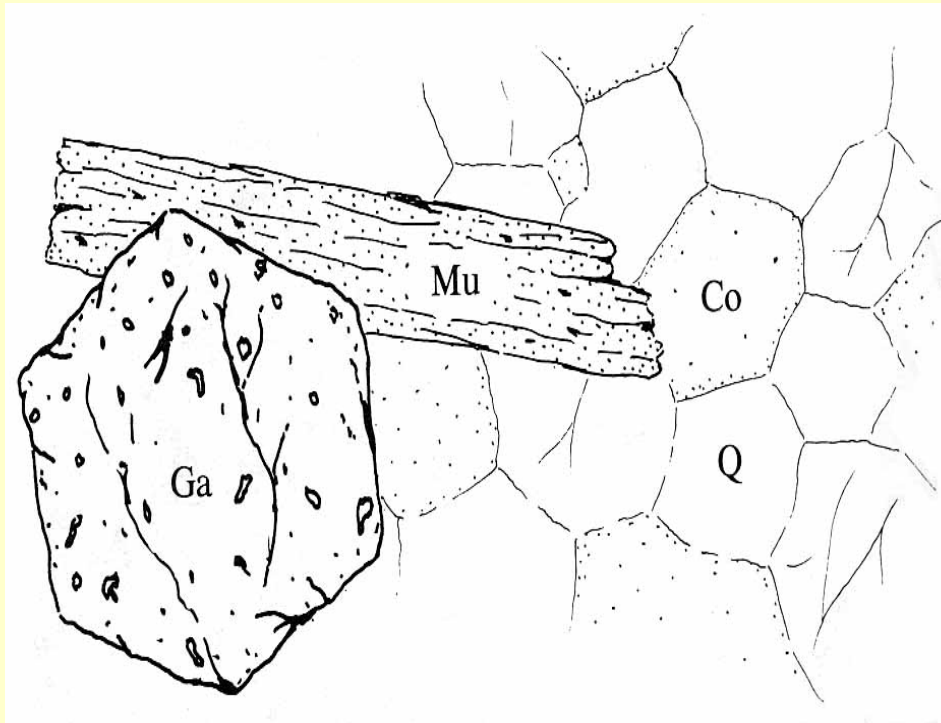
D) Sulfidy

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



Pyrit , chalkopyrite, sfalerite a galenit

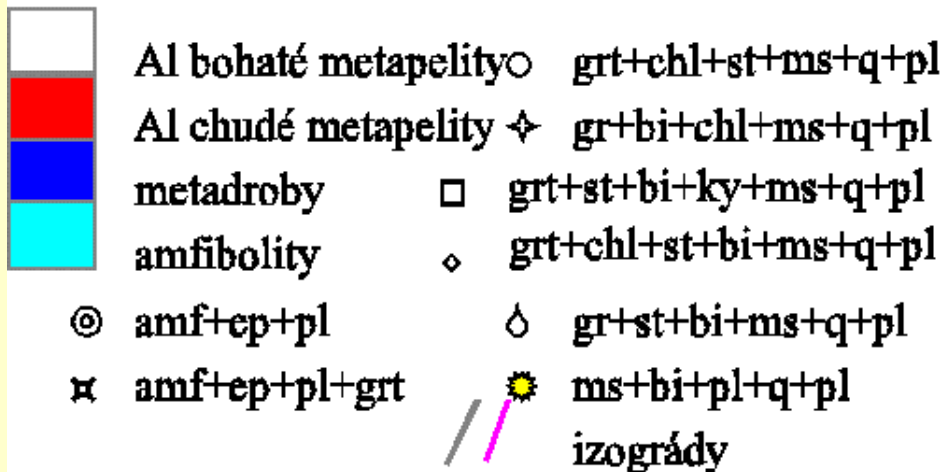
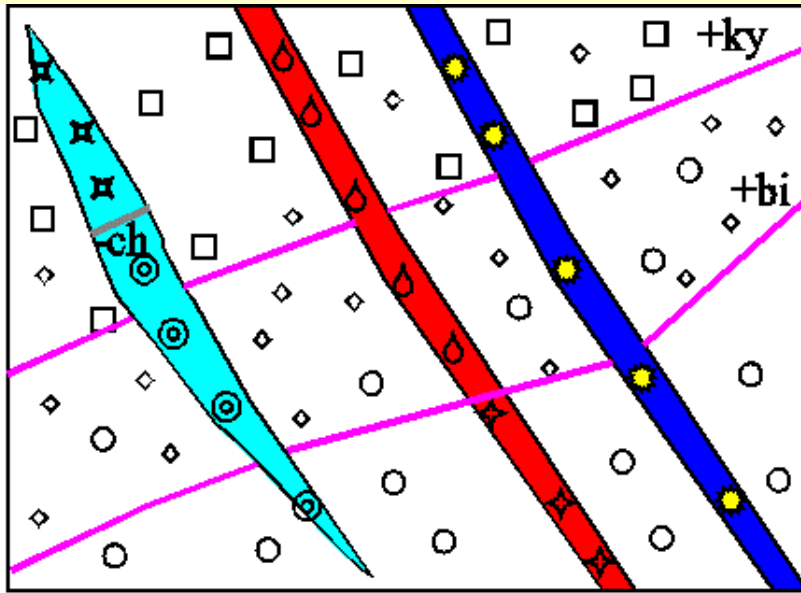
Krystalizační síla



- *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

Metamorfnní zóny



- Vyčleňování metamorfnních zón je založeno na sledování výskytu indexových minerálů v terénu.
- Spodní hranice metamorfnní zóny je na mapě znázorněna spojnici 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. – Klápová H. – Schulmann K. (1998): Metamorfnní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfnní petrologii