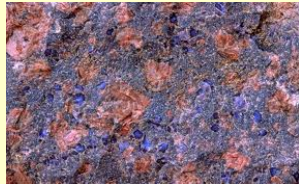


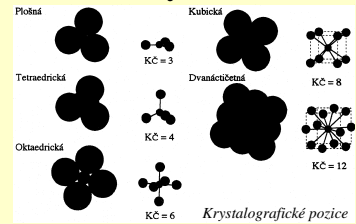
Petrologie G3021

3. Minerály metamorfovaných hornin a termobarometrie



Krystalochemie horninotvorných minerálů

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



↓ Důležité substituce

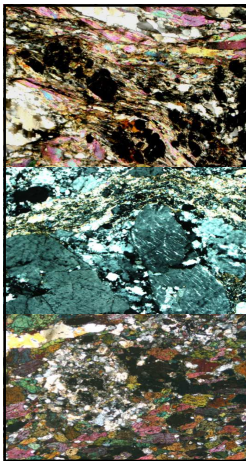
Fe ²⁺ Mg ₁ (olivín, pyroxeny, amfiboly, AFM minerály)	Fe ³⁺ Al ₁ (oxidy, epidot, Al ₂ SiO ₅)
Fe ²⁺ Mn ₁ (karbonáty, granát, cordierit, chloritoid)	Cr ³⁺ Al ₁ (spiny, pyroxeny, chlorit, amfiboly)
FOH ₁ (slídy, amfiboly)	CaMg ₁ (pyroxeny, amfiboly, granát, olivín, ...)
SiH ₁ (granát, olivín, jiné ortosilikáty)	KNa ₁ (slídy, živce, foidy)
MgSiAl ₂ (pyroxeny, amfiboly, slídy, chlorit, ...)	NaSiCa ₁ Al ₁ (plagioklas, pyroxeny, amfiboly, ...)
	SiNa ₁ Al ₁ (nefelín, amfiboly)
	CaMgNa ₁ Al ₁ (pyroxeny, amfiboly)

min.	koncové členy	substituční vektory
olivín	forsterit Mg ₂ SiO ₄ <-> fayalit Fe ₂ SiO ₄	Fe ²⁺ <-> Mg ²⁺
plag.	albit NaAlSi ₃ O ₈ <-> anorthit CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Na ⁺ Si ⁴⁺ <-> Ca ²⁺ Al ³⁺
amf.	tremolit Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ <-> tschermakit Ca ₂ (Mg ₃ Al ₂)(Al ₂ Si ₆)O ₂₂ (OH) ₂	^{VI} Mg ²⁺ <-> ^{IV} Si ⁴⁺ <-> ^{VI} Al ³⁺ <-> ^{IV} Al ³⁺ (tschermakitová substituce)
slídy	muskovit KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂ <-> fengit KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	^{VI} Al ³⁺ <-> ^{IV} Al ³⁺ <-> ^{VI} Mg ²⁺ <-> ^{IV} Si ⁴⁺

Act actinolite	Bn bornite	Dum dumortierite	Hs hastingsite
Ac acgirine	Bk brookite	Eck eckermannite	Hyn haiyue
Ak akermanite	Brc brucite	Ed edentite	Hd hedenbergite
Ab abite	Bst bustamite	Etb etbaitite	Hlv havelbergite
Aln allanite	Cpx Ca clinopyroxene	En enstatite	Hem hematite
Alm almandine	Cal calcite	Ep epidote	He hercynite
Amf amphibole	Ccn cancrinite	Fa fayaite	Hed hedenbergite
Anl anslerite	Cer cerussite	Fae ferroactinolite	Hul heulandite
Ant anatase	Cis celestite	Fcl ferroclinochlore	Hrb hornblende
And andalusite	Cbz chabazite	Fed ferroedenite	Hu humite
Andr andradite	Cc chalcocite	Ffs ferrofayalite	Ill illite*
Anh anhydrite	Ccp chalcopyrite	Fin ferrosilicite	Ilm ilmenite
Ank ankerite	Chl chlorite*	Ffs ferroschermakite	Jd jadeite
Ann annite	Chl chloritoid	Fl fluorite	Jh johannsenite
Ano anorthite	Chn chondrodite	Fo forsterite	Jsv johanssenite
Ant antigorite	Chr chromite	Gn galena	Kfs kaersulite
Ath anthophyllite	Ccl chrysocolla	Grt garnet*	Kls kalsite
Ap apatite	Cil chrysotile	Ged gedrite	Kln kaolinite
Apo apophyllite	Chu clinohumite	Gh gehlenite	Ktp kataphorite
Arg aragonite	Cpx clinopyroxene*	Gbs gibbsite	Kfs K-feldspar*
Arf arvedsonite	Cao clinzoisite	Gln glaucophane	Krn kornetipine
Apy arsenopyrite	Coe coesite	Gln glaucophane	Ky kyanite
Asp aspidolite	Crd cordierite	Gt goethite	Ltp latrapite
Aug augite	Cri crinoid	Gt grafit	Lmt laumontite
Brt barite	Cv covellite	Gdd grandisierite	Lws lawsonite
Bet betafite	Cs cristobalite	Gr graphite	Lpd lepidolite*
Brl beryl	Cum cummingtonite	Gre grealite	Leu leucite
Bry beryllonite	Dsp diaspor	Grs grossular	Lz lizardite
Beu beusite	Dg digenite	Gru grunerite	Lol lollingite
Bt biotite*	Di diopside	Gp gypsum	Lop loparite
Bhm bohémite	Dol dolomite	Hl halite	Lue lueshite
Bor borasilite	Drv dravite	Ham hambergite	Mch moscovite

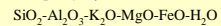
Mkt magnesiokataphorit	Opx orthopyroxene*	Rdn rhodonite	Tlc talc
Mrb magnesianbeckite	Osm osumilite	Rt rutile	Tap tapiolite
Mgs magnesite	Pg paragonite	Sa sanidine	Tep tephroite
Mgt magnetite	Prg paragasite	Spr sapphirine	Thm thomsonite
Mcl manganocolumbite	Pct pectolite	Sar sarcopside	Ttn titanite
Mtn manganotantalite	Pn pentlandite	Scp scapolite*	Toz topaz
Mrg margarite	Per perovskite	Srl schorl	Tur tourmaline*
Mel melilite	Phk phenakite	Srn sekaniinite	Tr tremolite
Mic microcline	Phl phlogopite	Srp serpentine*	Trd tridymite
Mn microcline	Phl phlogopite	Sd siderite	Trp triphylite
Mn minnesotaite	Pgt pigeonite	Sil sillimanite	Tro troilite
Mb 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 prismatic	Spd spodumene	Ves vesuvianite
Ms muscovite	Pmp pumpellyite	St staurolite	Vit vitianemite
Ntr natrolite	Py pyrite	Stl stellerite	Wai wairakite
Ne nepheline	Prp pyrope	Sib stibiobetafite	Wrd wendurite
Nrb norbergite	Pri pyrophyllite	Sib stibiomicrocline	Wth witherite
Nsn nosean	Po pyrrhotite	Sib stibite	Wo wollastonite
Oi olivine*	Qtz quartz	Sst stilpnomelane	Wus wüstite
Omp omphacite	Rbk riebeckite	Sst stilpnomelane	Zrn zircon
Or orthoclase	Rds rhodochrosite	Str strontianite	Zo zoisite

- Důležité horninotvorné minerály metamorfovaných hornin
- Křemen a další polymorfy SiO₂
- Živce (plagioklas - albit, anortit, ortoklas, sanidin) CaAl₂Si₂O₈-NaAl₃Si₃O₈
- Biopyryly = pyroxeny (enstatit, ferosilit, diopsid, hedenbergit, jadeit, omfacit) amfiboly (aktinolit, tremolit, obecný amfibol, glaukofan) slídy (muskovit, biotit, paragonit, flogopit, mastek, pyrofylyt)
- Skupina olivínu (olivín, forsterit) Mg₂SiO₄
- Granáty (almandin, pyrop, grossular) X^{II}₃Y^{III}₂(SiO₄)₃
- Epidotová skupina (epidot, zoisit, klinozoisit, pumpellyit)
- Alumosilikáty (sillimanit, andalusit, kyanit)
- Al-bohaté minerály (staurolit, chloritoid, diaspor)
- Jiné silikáty (cordierit, chlorit, wollastonit, lawsonit, prehnit)
- Zeolity (analcim, heulandit, laumontit, stilbit)
- Karbonáty (kalcit, dolomit)



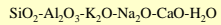
Minerály metapelitů a ortorul

Metapelity (fylit, svor, rula)



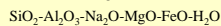
Minerály: křemen, plagioklas, muskovit, (draselný živec), biotit, Al_2SiO_5 , chloritoid, chlorit, staurolit, cordierit, granát.

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

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

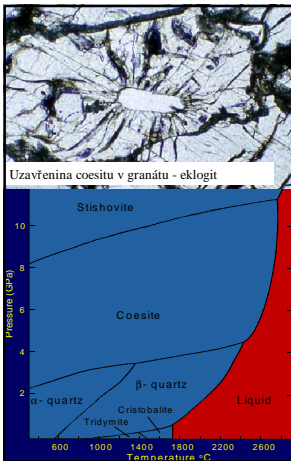
Křemité dolomity $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

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

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

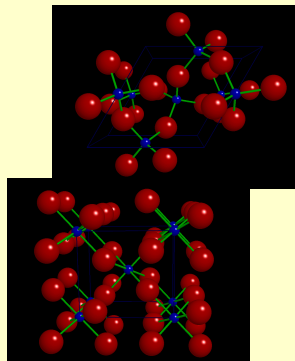
ultramafity – serpentinit, mastková břidlice, chloritická břidlice

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



Křemen (SiO_2)

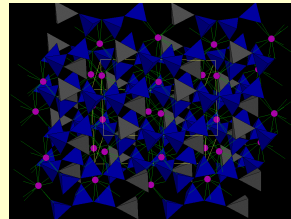
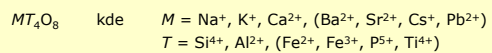
Nižší křemen Si^{IV}



Stishovit Si^{VI}

Živce

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

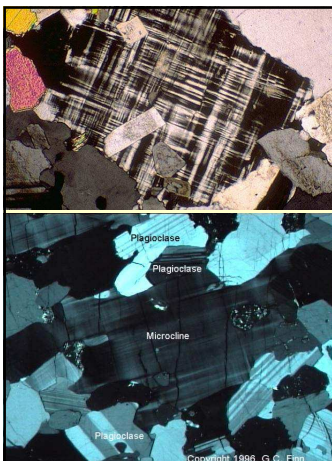


Albit: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

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

Pokud jsou ve struktuře nahrazeny 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** ($\text{K,Na}(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$)
- **Draselný živec** - KAlSi_3O_8

(ortoklas, mikroklin a albit do 5% An)

• Kromě Na, Ca a K mohou živce obsahovat Ba, Sr, Rb.

alkalické živce

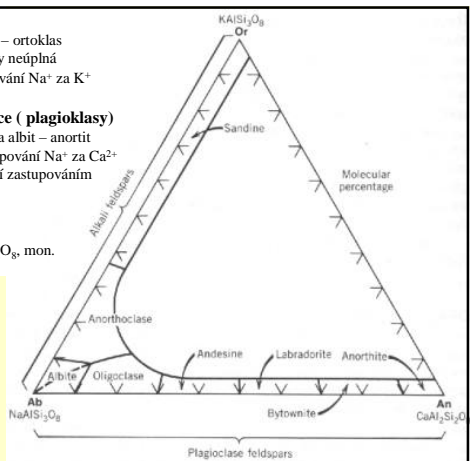
- izomorfni řada albit – ortoklas
- za povrchové teploty neúplná
- izovalentní zastupování Na^+ za K^+

sodnovápenaté živce (plagioklas)

- úplná izomorfni 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.

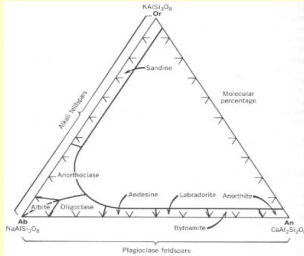


Alkalické živce

Výskyt: ortoruly, granuly, vysokoteplotní kontaktní rohovec (sanidín)

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

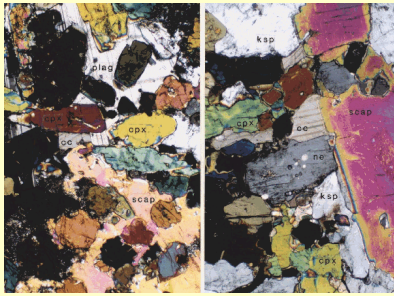
- využití v termometrii: barometry (např. GASP) a termometr pomocí solvu
- živce podléhají přeměnám na jiné minerály
- bývají postiženy celé krystaly, jednotlivé růstové zóny nebo systémy dvojčatných lamel

Přeměny:

- **myrmekitizace:** orientovaný srůst draselného živce a vápenatého plagioklasu,
 - zatačování 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. sericit)
 - často je sericit doprovázen albitem
 - vzniká působením hydrotermálních roztoků na alkalické živce
- **kaolinitizace:** přeměna alkalických živců na kaolinit
 - probíhá při zvětvávání 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 vyšších hornině ovjvinné asimilací: minerální složení augit (cpx), plagioklas (plag), skapolit (scap), kalcite (cc) nefeline (ne) draselný živce (ksp)

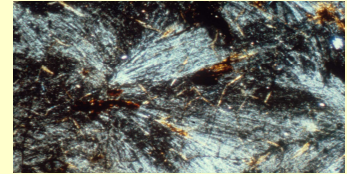
Skupina zeolitů

- skupina hydratovaných tektosilosilikátů
- velké (obvykle 0,3–0,8 nm) dutiny a kanály ve struktuře
- v dutinách jsou nepřítis 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+}).

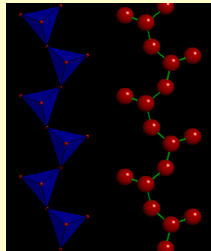
obecný vzorec skupiny lze napsat: $\text{M}_x\text{D}_y[\text{Al}_{x+2y}\text{Si}_{n-(x+2y)}\text{O}_{2n}] \cdot m\text{H}_2\text{O}$

kde: $\text{M} = \text{Na}^+$, K^+ , Li^+ a $\text{D} = \text{Ca}^{2+}$, 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
- **$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**
- **Natrolit** - kosočtverečný
- **$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$**
- **Chabazit** - trigonální
- **$\text{CaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$**

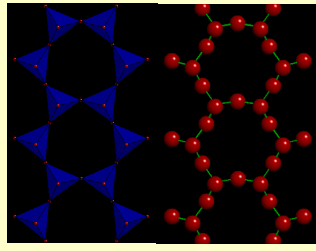


Inosilikáty



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

pyroxeny

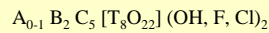


Inosilikáty $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{4-}$ dvojité řetězce

amfiboly

Chemické složení amfibolů

Obecný vzorec:



- A = Na K
- B = Ca Na Mg Fe^{2+} (Mn Li)
- C = Mg Fe^{2+} Mn Al Fe^{3+} Ti
- T = Si Al

- strukturu amfibolů tvoří dvojité řetězce tetraedrů $[\text{SiO}_4]^{4-}$, uložené vzájemně rovnoběžně ve směru vertikály
- ve směru protažení se opakuje skupina čtyř tetraedrů $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ (dvojčlánkový řetězec) část Si^{4+} v tetraedrech může být nahrazena Al^{3+} mezi řetězci jsou uloženy kationty W, X, Y

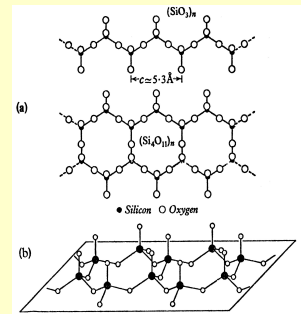
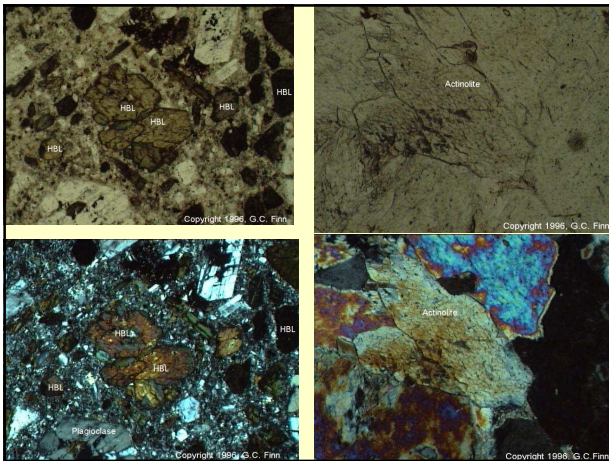


FIG. 53. (a) Comparison of amphibole band $(\text{Si}_4\text{O}_{11})_6^{6-}$ and pyroxene chain $(\text{SiO}_3)_2^{2-}$. (b) Perspective view of the double chain, or band, which occurs in the structures of all amphiboles (after Jong, 1959).



Klasifikace amfibolů

- dnes se používá klasifikace (Leake et al., 1997; *Amer. Mineral.* v82, 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 $\square Ca_2 Mg_8 Si_4 O_{22} (OH)_2$

Substitution mechanism		End member
$[Al]_{C1} + [H]_{Si} = [Al]_{Na} + [H]_{Al}$	Edenite	$NaCa_2 Mg_8 Si_7 AlO_{22} (OH)_2$
$2[Al]_{Si} + 2[Mg]_{Mg} = 2[Al]_{Al} + 2[Mg]_{Al}$	Al-Tschermakite	$\square Ca_2 (Mg_2 Al_2) Si_6 Al_2 O_{22} (OH)_2$
$2[Al]_{Si} + 2[Mg]_{Mg} = 2[Al]_{Al} + 2[Fe^{3+}]_{C2}$	Fe-Tschermakite	$\square Ca_2 (Mg_3 Fe^{3+}) Si_6 Al_2 O_{22} (OH)_2$
$2[Al]_{Si} + [Mg]_{Mg} = 2[Al]_{Al} + [Ti]_{C1}$	Ti-Tschermakite	$\square Ca_2 (Mg_4 Ti) Si_6 Al_2 O_{22} (OH)_2$
$[Al]_{C1} + [Mg]_{Ca} = [Al]_{Na} + [Mg]_{Na}$	Richterite	$Na(CaNa) Mg_6 Si_4 O_{22} (OH)_2$
$2[Mg]_{Ca} + 2[Al]_{Mg} = 2[Mg]_{Na} + 2[Al]_{Fe^{3+}}$	Riebeckite	$\square Na_2 (Fe^{3+}_2) Si_4 O_{22} (OH)_2$
$2[Mg]_{Ca} + 2[Al]_{Mg} = 2[Mg]_{Na} + 2[Al]_{Al}$	Glaucophane	$\square Na_2 (Mg_2 Al_2) Si_4 O_{22} (OH)_2$
$[Al]_{C1} + [Mg]_{Mg} + 2[Al]_{Si} = [Al]_{Na} + 2[Al]_{Al} + [H]_{Al}$	Hastingsite	$NaCa_2 (Fe^{3+}_4) Si_4 Al_2 O_{22} (OH)_2$
$[Al]_{C1} + [Mg]_{Mg} + 2[Al]_{Si} = [Al]_{Na} + 2[Al]_{Al} + [Fe^{3+}]_{C2}$	Pargasite	$NaCa_2 (Mg_4 Al) Si_4 Al_2 O_{22} (OH)_2$

amfiboly jsou monoklinické a romboické
 je popsáno cca 75 koncových členů (široká izomorfnií míšivost)
 amfiboly můžeme rozdělit na :
 (a) Mg-Fe amfiboly,
 (b) Ca-amfiboly,
 (c) alkalické amfiboly

Využití amfibolů v petrologii

- Substituce v amfibolitech umožňují využít tento minerál pro určení tlaku, teploty a fugacity kyslíku.
- Chemické složení amfibolů je také výrazně závislé na složení celé horniny
 - Mg# ($Mg/(Mg+Fe^{2+})$) závisí výrazně na složení systému a daleko méně na teplotě.
 - Tschermakitová substituce $[X^{2+}]_C + [Si]_T = [Al]_C + [Al]_T$ ($^{VI}Mg^{2+} + ^{IV}Si^{4+} \leftrightarrow ^{VI}Al^{3+} + ^{IV}Al^{3+}$) stoupá s nárůstem tlaku (amfiboly se s nárůstem tlaku stávají bohatší Al naopak).
 - Edenitová substituce $[VAC]_A + [Si]_T = [Na]_A + [Al]_T$ stoupá s nárůstem teploty (obsah sodíku a hliníku v amfibolu roste s nárůstem teploty)
 - Substituce trojmocného železa za hliník v C pozici roste s fugací kyslíku
 - 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.
 - Při nízkém stupni metamorfózy (tremolit-aktinolit) je nulový a stoupá s nárůstem metamorfózy k obsahům typickým u hornblendu (kolem 0,5 atomů $Na+K$, 2,5 atomů Al).
 - 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.

$$Ed + 4 Qtz = Tr + Ab$$

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

for $X_{Ab}^{PI} > 0.5$: $Y_{Ab} = 0$
 for $X_{Ab}^{PI} \leq 0.5$: $Y_{Ab} = 12(1 - X_{Ab}^{PI})^2 - 3$

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

$$Ed + Ab = Richt + An$$

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

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

Chemizmus Pyroxenů

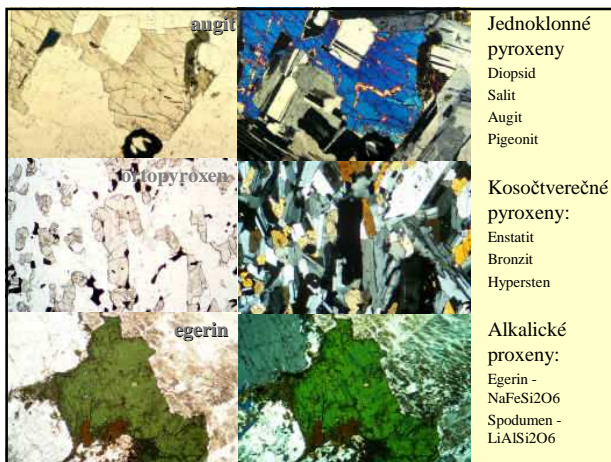
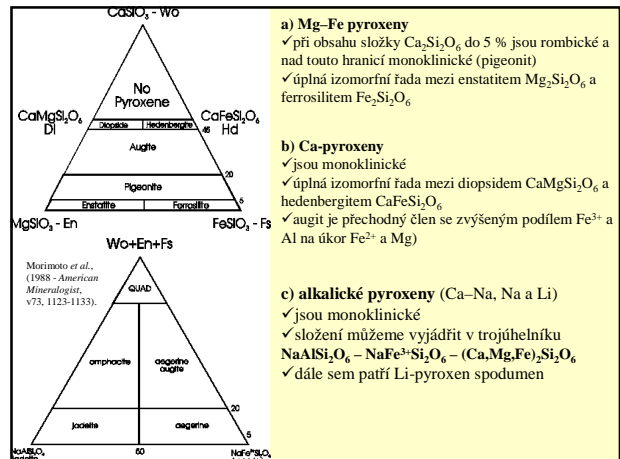
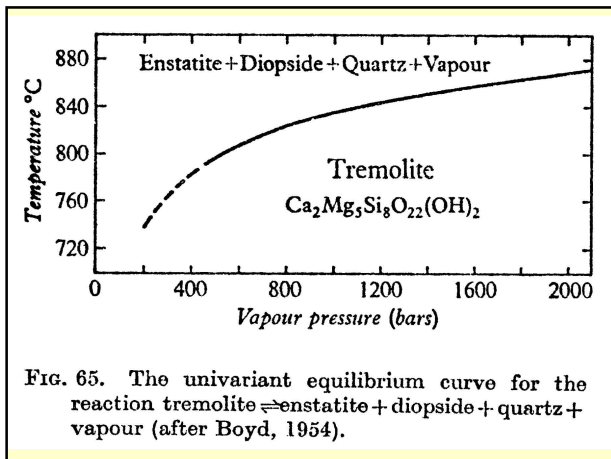
Obecný vzorec pyroxenů:
 $W_{1-P} (X,Y)_{1+P} Z_2 O_6$

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

M2	M1	T ₂	O ₄	
Mg	Mg	Si		Orthorhombic
Fe ³⁺	Fe ³⁺			
Ca	Mg			Monoclinic
Ca	Fe ³⁺			
Ca	Mn			
Na	Al			
Na	Fe ³⁺			
Ca	Al	Al/Si		
Mg	Al	Al/Si		

Pyroxene End-Members with site-occupancies and symmetries

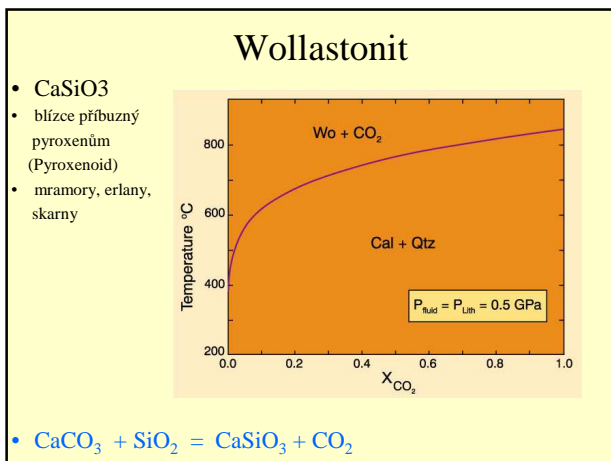
- pyroxeny mají monoklinickou (klinopyroxeny, cpx.) a romboickou (ortopyroxeny, opx.) symetrii
- jsou to bezvodé minerály, které za přítomnosti vody a při působení vysokých teplot a přechází na amfiboly
- za nižších PT podmínek snadno podléhají přeměně: enstatit na serpentinitové minerály, augit na chlority, cpx a opx na amfiboly (uralitizace)



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 + 3Al₂Mg₁Si₁**
- P-T rozsah barometru 6 - 40 kbar, 400 - 900°C
- $P(\text{kbar}) = 28.05 + 0.02044T - 0.0029957 \cdot \ln K$
- T = teplota v kelvinech

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


Skupina slíd

- Skupina významných horninotvorných minerálů, trojvrstevných fylsilikátů s obecným vzorcem: $\text{IM}_{2-3}\text{T}_4\text{O}_{10}\text{A}_2$
- kde:
- I = K⁺, Na⁺, ... (mezivrstevní kationty)
- M = Li⁺, Al³⁺, Fe³⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, ... (ve středech oktaedrů)
- T = Si, Al, Fe³⁺, ... (ve středech tetraedrů)
- A = OH⁻, F⁻, ...

• SiO_4 tetrahedry jsou spojeny do vrstev $[\text{Si}_2\text{O}_5]$ a kyslík v jednom z vrcholů je volný pro spojení s dalším kationtem

Koncové členy muskovitu a biotitu

Biotit

- $\text{KMg}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: flogopit
- $\text{KFe}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: annit
- $\text{K}[\text{Mg}_2\text{Al}][\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: eastonit
- $\text{NaMg}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: Na-flogopit

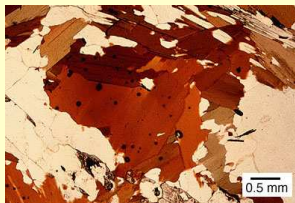
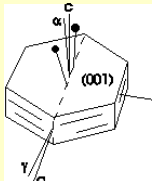
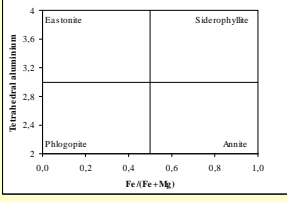
Muskovit

- $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: muskovit
- $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: paragonit
- $\text{CaAl}_2[\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: margarit
- $\text{K}[\text{MgAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: Mg-Al-celadonit
- $\text{K}[\text{FeAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$: Fe-Al-celadonit

Biotit

Phlogopite-Anthite
Monoclinic (-)

α 1.530-1.625
 β 1.557-1.625
 γ 1.558-1.696
 δ 0.028-0.080
2V 25-0°

0.5 mm

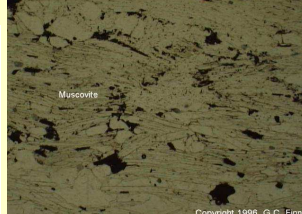
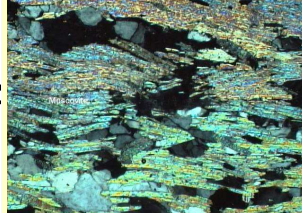
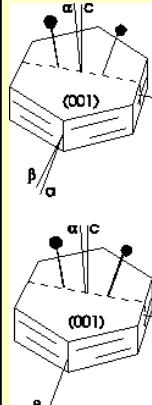
Muskovit a paragonit

Muscovite
Monoclinic (-)

α 1.552-1.576
 β 1.582-1.615
 γ 1.587-1.618
 δ 0.036-0.049
2V 28-47°

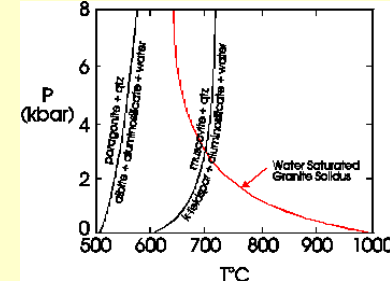
Paragonite
Monoclinic (-)

α 1.564-1.580
 β 1.594-1.109
 γ 1.600-1.609
 δ 0.028-0.038
2V 0-40°

0.5 mm

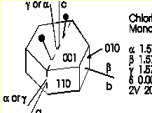
- muskovit a biotit se objevují v metamorfovaných pelitech, psamitech a kyselých magmatických horninách od facie zelených břidlic po facii amfibolitovou (muskovit) a granulitovou (biotit)
- paragonit se někdy vyskytují v níže a středně metamorfovaných metapelitech nebo metabazitech a stejně jako muskovit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



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

Skupina chloritů

- složení lze zjednodušeně vyjádřit obecným vzorcem:
 $(Mg_{6-x}Al_x)(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH,O)_8$
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 trojvrstvňích komplexech, s nimiž se pravidelně střídají oktaedrové vrstvy tvořené dvojmocnými kationty a hydroxylovými skupinami (tzv. brucitové vrstvy)
- chlority patří k významným horninotvorných 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



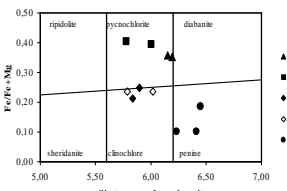


Chlorite
Monoclinic (-) or (-)

α 1.57-1.67
 β 1.57-1.69
 γ 1.57-1.69
 δ 0.020-0.022
2V 20°(-) to 40°(+)


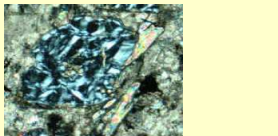
Pleochroismus
(-) $\alpha = \beta =$ green/pale green/brown green
 $\gamma =$ colorless
(+) $\beta = \gamma =$ pale green/green/olive green
 $\alpha =$ colorless

- nejdůležitější jsou:
- **klinochlor**
 $(Mg,Fe)_3Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
mon.
- **chamosit**
 $(Fe^{2+},Mg,Fe^{3+})_3Al(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
mon.

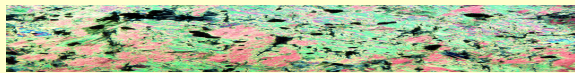
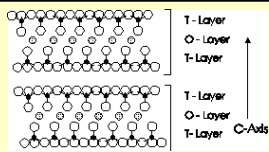
Minerály serpentínové skupiny

- $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$
- **Lizardit:** nejčastější je trigonální polytyp (může být také hexagonální), dokonale štěpný podle {001}. Tvoří celistvé, jemnozrné agregáty, méně často destičkovité a šupinkovité.
- **Antigorit:** monoklinický, dokonale štěpný podle {001}, tvoří nejčastěji celistvé a jemnozrné agregáty, méně často destičkovité a šupinkovité.
- **Chryzotil:** nejčastější monoklinický, charakteristické jsou paralelně vláknité agregáty tzv. hadcový azbest.
- **Výskyt:** Všechny tři formy vznikají hydrotermálním rozkladem olivínu a Mg-pyroxenů při přeměně peridotitu, dunitů a pyroxenitů na serpentinity (hadce), méně často obdobnými pochody v mramorech a erlanech.
- **Serpentinizace:** $2 Mg_2SiO_4 + 3 H_2O = Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + Mg(OH)_2$

Skupina mastku – pyrofylitu

- skupina trojvrstvých fylsilikátů
- hlavní zástupci:
 - trioktaedrický člen: mastek - $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
 - trikl.
 - dioktaedrický člen: pyrofylit - $Fe_2Si_4O_{10}(OH)_2$
 - 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 a regionální metamorfóze (dolomitové vápence, dolomity, magnезity).

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

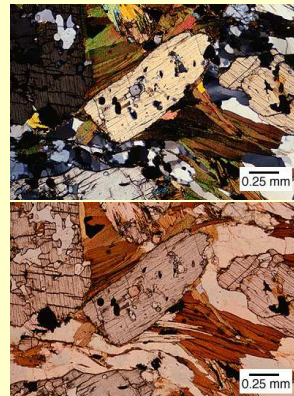
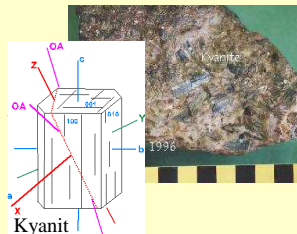
- při nižších teplotách vzniká ve stejném prostředí kaolinit, v alkalickém prostředí muskovit nebo montmorillonit
- bývá přítomen v níže metamorfovaných metapelitech

MINERÁLY SKUPINY Al_2SiO_5

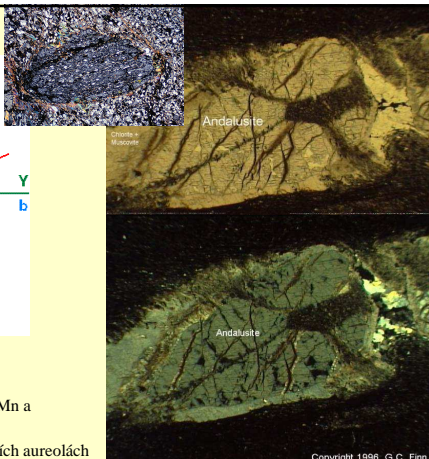
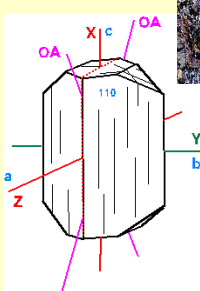
- Do skupiny Al_2SiO_5 patří tři minerály které se vyskytují v Al bohatých hornin:

Kyanit:

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



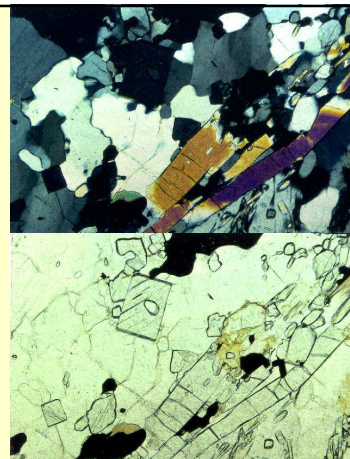
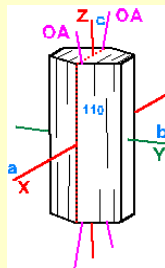
Andalusit



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

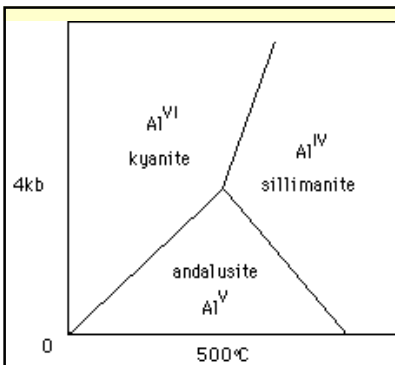
Sillimanit

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



– Význam pro petrologii

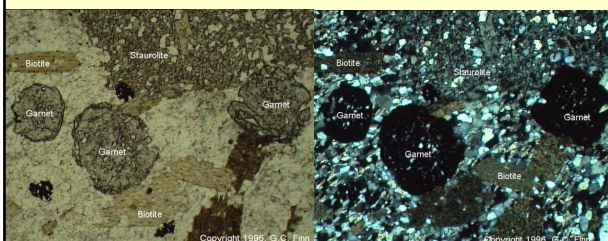
Indikují PT podmínky vzniku horniny. Ukazují že v hornině je dostatek Al aby zde mohli vznikat i jiné hliníkem bohaté indexové minerály.



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

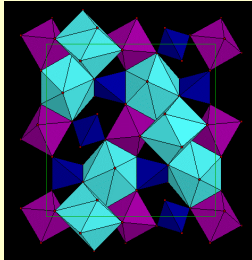
GRANÁTY

- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_2^{2+}B_3^{3+}[SiO_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmočné kationty jako Mg, Fe^{2+} , Mn, Ca
- Pozici B trojmočné kationty jako Al, Fe^{3+} , Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.



GRANÁTY

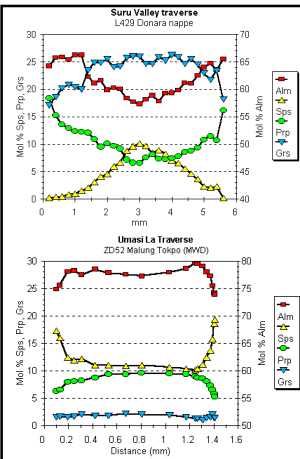
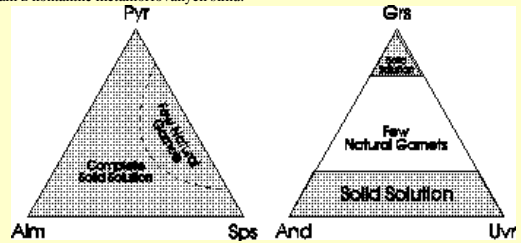
- Minerály této skupiny mají obecný vzorec $A_3^{2+}B_2^{3+}[\text{SiO}_4]_3$.
- Pozici A obsazují dvojmocné kationty jako Mg, Fe^{2+} , Mn, Ca
- Pozici B trojmocné kationty jako Al, Fe^{3+} , Cr, V.
- Křemík může být v malém množství nahrazen Al.
- Granáty jsou krychlové minerály bez štěpnosti.
- Skupinu granátů tvoří několik krajních členů mezi nimiž je velmi dobrá mísivost.
- Přírodní granáty proto obsahují vždy několik komponent :
- Pyrop $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Almandin $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Spessartin $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Grosulár $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Andradit $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$
- Uvarovit $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$



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 skupiny hydrogranátů je znám z kontaktně metamorfovaných slín.



Využití granátů v petrologii

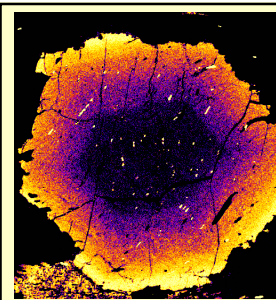
A) Zonálnost granátů

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

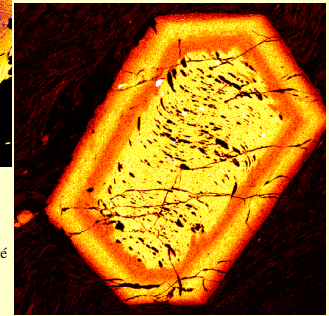
Zonálnost dělíme na:

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



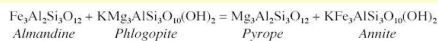
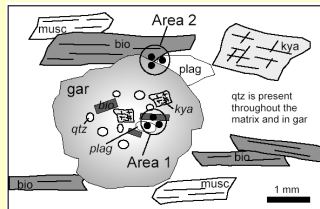
- 1) Mapa Ca-složky v automorfním prográdně rostoucím granátu.



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

B) Geotermometry a geobarometry

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



This distribution is described by the following equation:

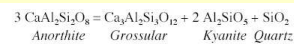
$$\ln K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{Gr-Bt}} = -\left(\frac{52,108}{3R}\right)\frac{1}{T} + \frac{19,51}{3R} - P\left(\frac{0,238}{3R}\right)\frac{1}{T}$$

where

$$K_{\text{Fe-Mg}}^{\text{Gr-Bt}} = \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{Gr}} / X_{\text{Mg}}^{\text{Bt}}}{X_{\text{Fe}}^{\text{Bt}} / X_{\text{Mg}}^{\text{Gr}}} = \left(\frac{\text{Fe}}{\text{Mg}}\right)_{\text{Gr}}^{\text{Bt}}$$

Use cation values, not oxides!!

GASP barometr



This distribution is described by the following equation:

$$\ln K_{\text{Ca}}^{\text{Gr-An}} = \left(\frac{55,865}{R}\right)\frac{1}{T} - \frac{153,59}{R} + P\left(\frac{6,608}{R}\right)\frac{1}{T}$$

where

$$K_{\text{Ca}}^{\text{Gr-An}} = \left(\frac{a_{\text{Gr}}^{\text{Ca}}}{a_{\text{An}}^{\text{Ca}}}\right)$$

$$a_{\text{Gr}}^{\text{Ca}} = \left(\frac{X_{\text{Ca}}^{\text{Gr}}}{X_{\text{Gr}}^{\text{Ca}}}\right)^3 = \left[1,03\left(\frac{\text{Ca}}{\text{Ca} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn}}\right)_{\text{Gr}}\right]^3$$

Use cation values!!

$$a_{\text{An}}^{\text{Ca}} = 1,35\left(\frac{X_{\text{Ca}}^{\text{An}}}{\text{Ca} + \text{Na} + \text{K}}\right)_{\text{An}}$$

$R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (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 γ values are themselves functions of composition and temperature.)

STAUROLIT

- monoklinický
- typický metamorfní minerál (hlavně metapelitey)
- $\text{Fe}_2\text{Al}_3\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- 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% substituíván 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)
 a 1.736-1.747
 b 1.740-1.754
 c 1.745-1.762
 β 0.0005-0.015
 $2V$ 80-90°
 α - colorless
 β = pale yellow
 γ = golden yellow

$\text{Ms} + \text{Chl} + \text{St} + \text{Qtz} = \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O}$

(a) Experimental constraints

(b) Thermodynamic predictions

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

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

Vznik chloritoidu (~ 400 °C): Fe-chlorit + pyrophylit = Fe-chloritoid + křemen + H_2O

Reakce konzumující chloritoid (~ 500 °C): chloritoid + biotit = granát + chlorit, Fe-chloritoid = Fe-staurolit + almandin + H_2O a chloritoid = granát + chlorit + staurolit + H_2O

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 (filyty) a to v asociaci chlorit, fengit a světlá slída bohatá na paragonitovou komponentou

ve svorech se chloritoid vyskytuje v asociaci $\text{St} + \text{Grt} + \text{Ms} + \text{Bt} + \text{Qtz}$

Chloritoid $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn})_2(\text{AlFe}^{3+})_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$

Monoclinic or Triclinic (+) or (-)

a 1.705-1.730
 b 1.708-1.734
 c 1.712-1.740
 β 0.0005-0.022
 $2V$ 37-124°

Pleochroism
 α - pale gray green to green
 β - silty 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

- $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2(\text{AlSi}_2\text{O}_{18})$
- rombický, pseudohexagonální
- štěpný podle {100}, odlučný podle {001}
- snadno mění v jemně šupinaté sedé 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)

Metapelitey (LP/HT)

Vznik cordieritu

KMASH: flogopit + sillimanit = Mg-cordierit + muskovit

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

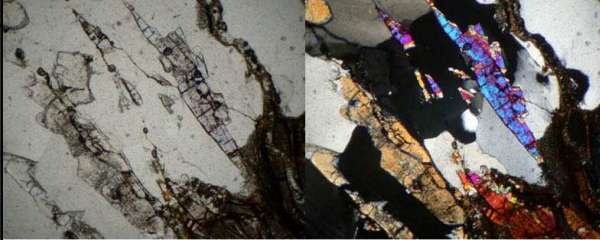
KFMASH: biotit + sillimanit = granát + cordierit + H_2O

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

Skupina epidotu

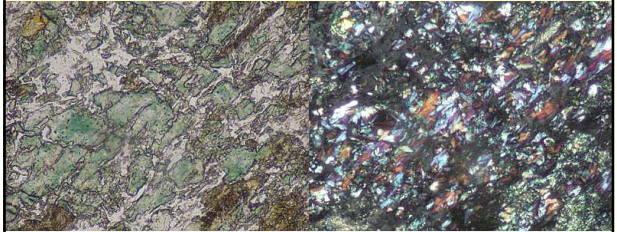
- Sorosilikáty
- monoklinické
- **epidot:** $\text{Ca}_2(\text{FeAl})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$
- **klinozoisit:** $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$
- kosočtverečný
- **zoisit:** $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$
- 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.

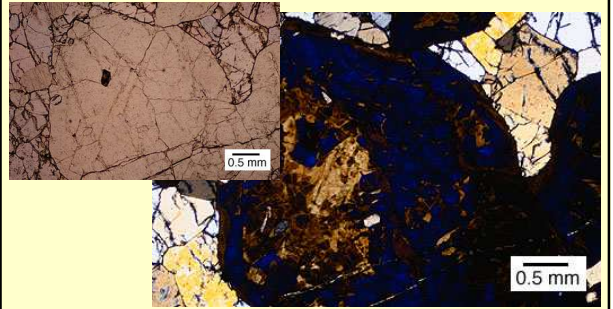
- **Prehnit**
- Sorosilikát
- $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Výskyt: metabazity



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

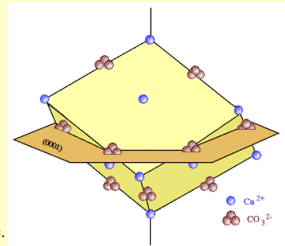
Monticellit CaMgSiO_4

Ca → M2 (velký ion)
ve vysoce metamorfovaných karbonátech s příměsí silikátů.

		M_2TO_4		
		6-fold Octahedral (O_6) Sites	4-fold Tetrahedral Site (T_4)	
M_2	T	NAME	Cation	r (Å)
Mg Mg	Si	Forsterite	Mg^{2+}	0.72
Fe Fe	↓	Fayalite	Fe^{2+}	0.78
Mn Mn		Tephroite		
Ca Mg	↓	Monticellite	Mn^{2+}	0.83
Ca Fe		Kirschsteinite		
Ca Mn		Glaucochroite		

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 klenče (1011).
- 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.



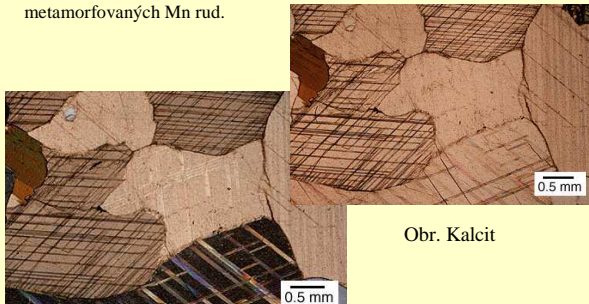
Obr. Struktura kalcitu

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

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

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

- **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 obsazenými 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 pojmut vyžít 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_3 : Vyskytuje se především v ultrabazických horninách.
- **Hercinit** FeAl_2O_4 : Vyskytuje se jako akcesorie v bazických horninách a v železných bohatých metasedimentech.
- **Ulvöspinel** TiFe_2O_4
- **Gahnit** ZnAl_2O_4
- **Franklinit** ZnFe_2O_4
- **Galaxit** MnAl_2O_4
- Využití: magnetit-ilmenitový termometr

Skupina korundu

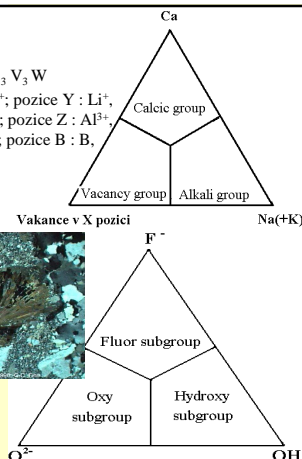
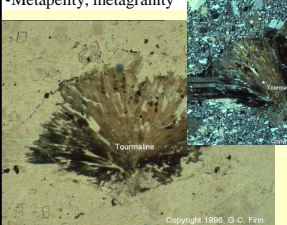
- Hexagonální minerály s podobnou strukturou
- **Korund** Al_2O_3 - akcesorie v Al bohatých metamorfitech
- **Hematit** Fe_2O_3 - součást metamorfovaných Fe-rud a jako akcesorie v bazických horninách
- **Ilmenit** FeTiO_3 - akcesorie hlavně v bazických horninách a metapelitech. Fe je často částečně zastupováno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

B) SILIKÁTY

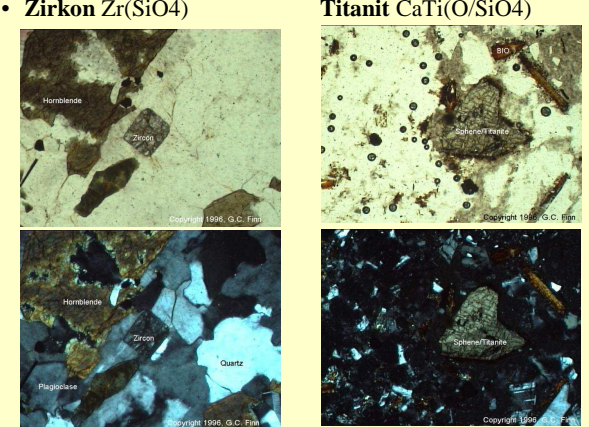
Skupina turmalínu

Chemický vzorec $\text{X Y}_3 \text{Z}_6 [\text{T}_6 \text{O}_{18}] [\text{BO}_3]_3 \text{V}_3 \text{W}$

- 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, () ; pozice V : OH, O; pozice W: OH, F, O
- Soustava: trigonální
- Cyklosilikáty s šestičetným kruhem
- Metapelite, metagranity

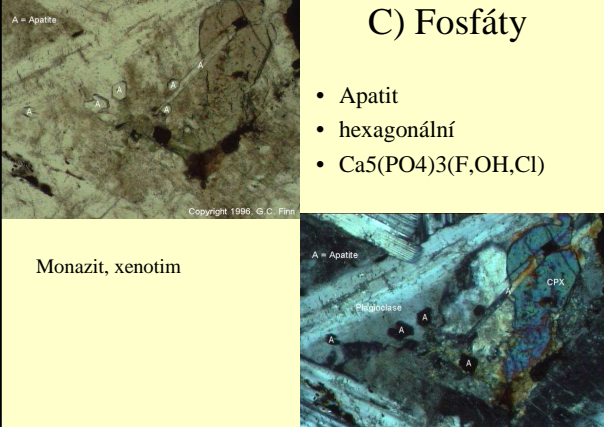



- **Zirkon** $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$
- **Titanit** $\text{CaTi}(\text{O/SiO}_4)$



C) Fosfáty

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



Monazit, xenotim

