

Mineralogie II

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Mineralogický systém - silikáty

Osnova přednášky:

- 1. Strukturní a chemický základ pro klasifikaci silikátů**
- 2. Nesosilikáty**
- 3. Sorosilikáty**
- 4. Shrnutí**

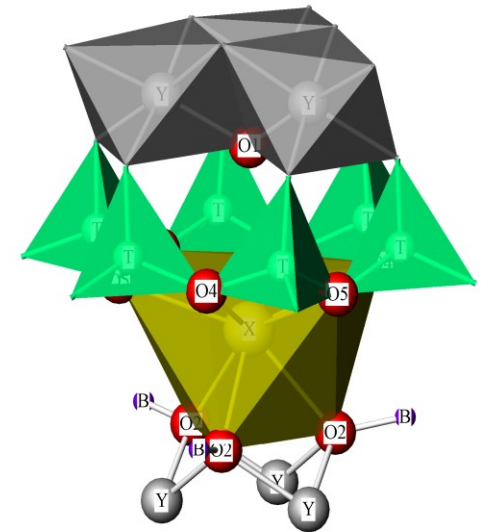
1. Silikáty - úvod

- Největší a nejdůležitější skupina minerálů v mineralogickém systému. Zahrnuje většinu horninotvorných minerálů. Podle uspořádání SiO_4 tetraedrů, které jsou hlavním stavebním prvkem těchto minerálů, je dělíme do několika skupin.

Silikáty se skládají z:

- tetraedrů SiO_4^{4-}
- kationtů kovů (např. Ca, Fe, Mg, Na, Al), které jsou ve středech různých polyedrů např. BO_3 , AlO_6 , MgO_6 , NaO_8

tetraedry a jiné polyedry se spojují (mají společný kyslík) – tak se zmenšuje počet volných vazeb tak, aby byl minerál elektroneutrální
 Si^{4+} je v tetraedru často nahrazen Al^{3+}
vedle kyslíku se objevují i jiné anionty OH^- , F^-



1. Silikáty - klasifikace

Nesosilikáty – tetraedry izolované

- olivín, granáty, Al_2SiO_5

Sorosilikáty – 2 spojené tetraedry

- epidot

Cyklosilikáty – tetraedry spojené do cyklů

- cordierit, turmalín, beryl

Inosilikáty – tetraedry spojené do řetězců

- jednoduché - pyroxeny, - dvojité - amfiboly

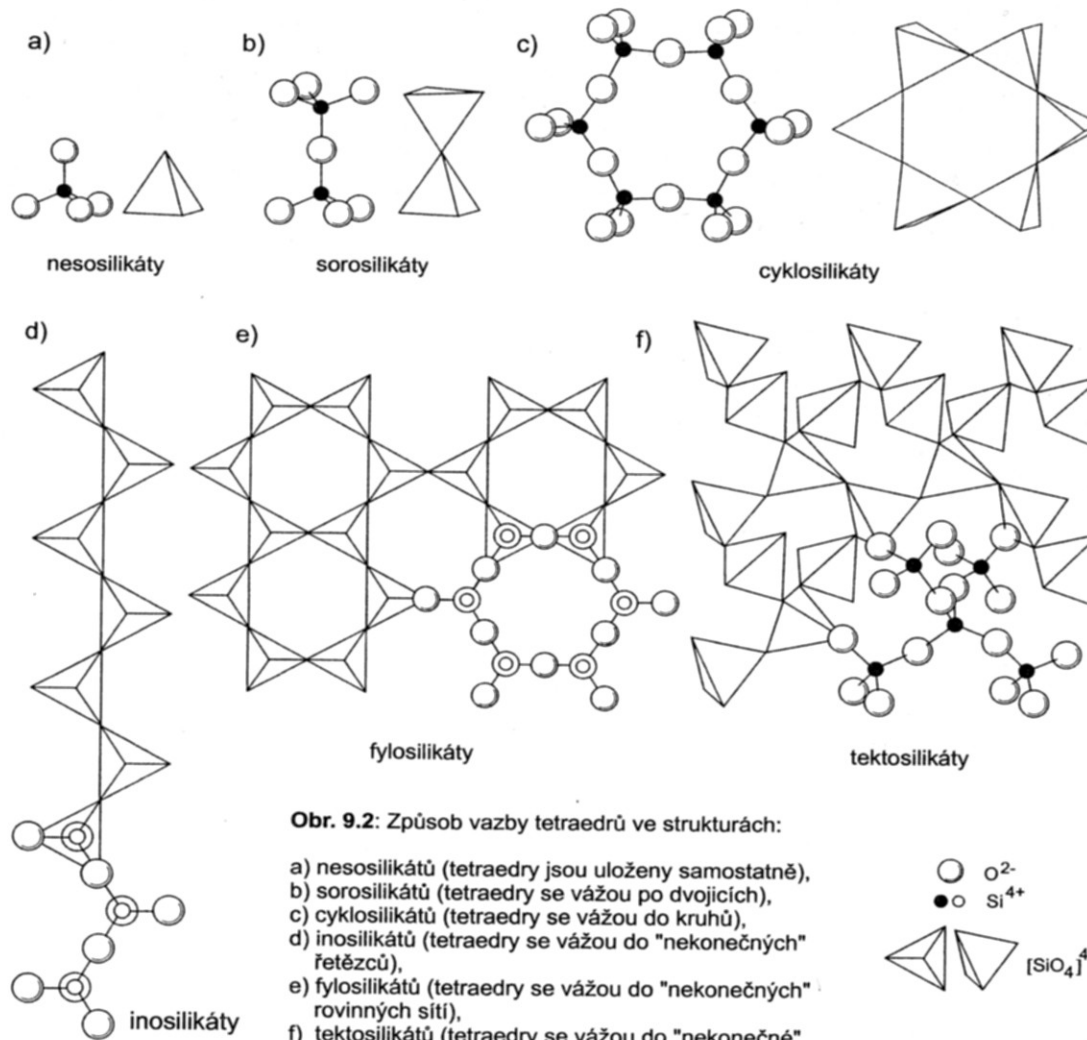
Fylosilikáty – tetraedry propojené v ploše

- slídy, jílové minerály

Tektosilikáty – tetraedry tvořící prostorovou kostru

- živce, foidy, zeolity, také křemen

1. Silikáty - klasifikace

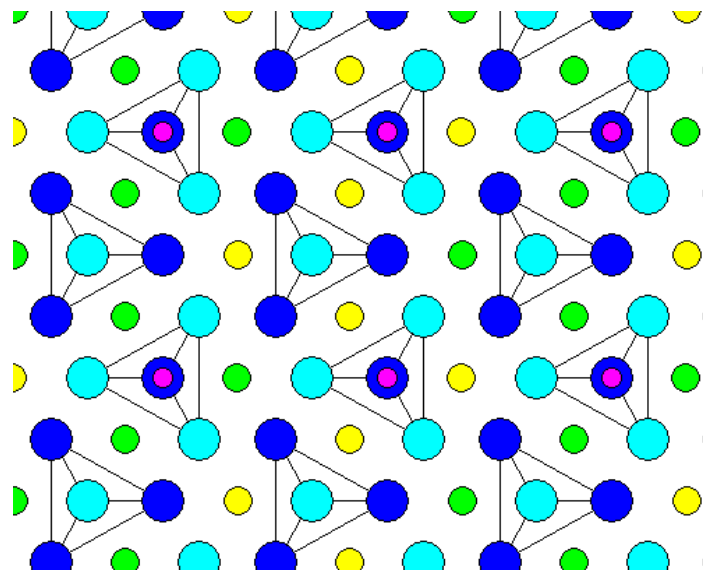


Obr. 9.2: Způsob vazby tetraedrů ve strukturách:

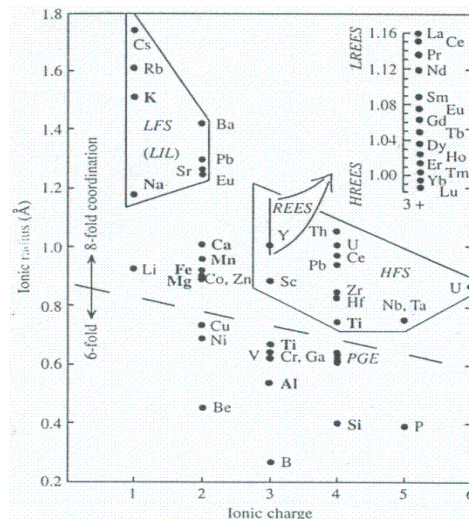
- a) nesilikátů (tetraedry jsou uloženy samostatně),
- b) sorosilikátů (tetraedry se vážou po dvojicích),
- c) cyklosilikátů (tetraedry se vážou do kruhů),
- d) inosilikátů (tetraedry se vážou do "nekonečných" řetězců),
- e) fylosilikátů (tetraedry se vážou do "nekonečných" rovinných sítí),
- f) tektosilikátů (tetraedry se vážou do "nekonečné" prostorové sítě).

2. Nesosilikáty - skupina olivínu

- Rombická
- Obecný vzorec M_2SiO_4
 $M = Mg, Fe^{2+}, Mn$
- Forsterit Mg_2SiO_4
- Fayalit Fe_2SiO_4
- Tefroit Mn_2SiO_4
- Olivín – termín užívaný v petrologii
- Ideálně mísitelné,
 hlavní substituce Mg-Fe Fe-Mn
- Vedlejší až stopové prvky: Ca, Zn, Ni



- Vlastnosti:
 Barva: světle žlutozelená, nažloutlý (forsterit), černý (fayalit), lesk skelný, neštěpný, $T = 6-7$, $h = 3,2-4,3$.



2. Nesosilikáty - skupina olivínu

Výskyty:

- **Forsterit (olivín)**
Horniny bohaté Mg a chudé Si
- hojný ve svrchním plášti
- ultrabazické magmatické (Smrčí, Kozákov) a metamorfované horniny např. -
- dolomitické mramory (Studnice)
- **Fayalit**
pegmatity (Strzegom) a alkalické granity
Fe-bohaté metamorfované horniny
- Olivín lehce podléhá hydrotermálním alteracím a vzniká serpentin.
- **Využití:** jako drahý kámen, důležitý v řešení problémů zemského pláště, PT podmínky.

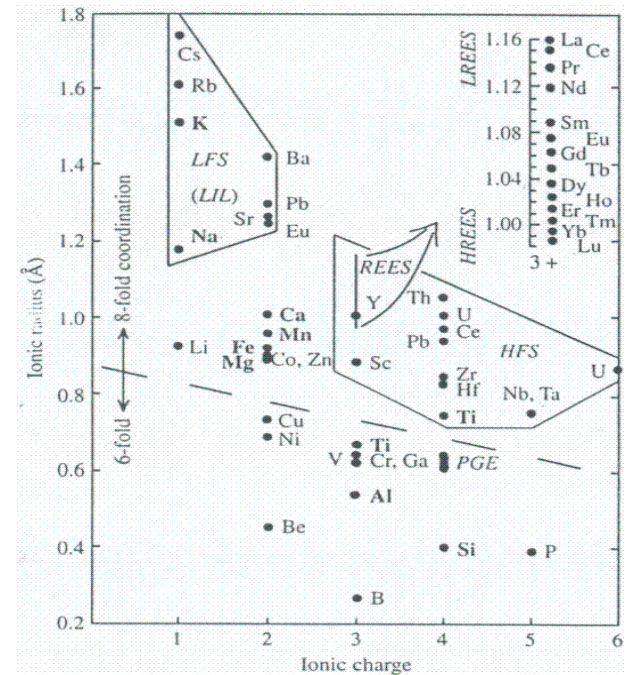


2. Nesosilikáty- skupina granátu

- Kubický
- Obecný vzorec $A_3B_2(SiO_4)_3$
 $A = Fe^{2+}, Mn, Ca, Mg$
 $B = Al, Fe^{3+}$
- Vedlejší a méně časté prvky: V, Cr, Y, P

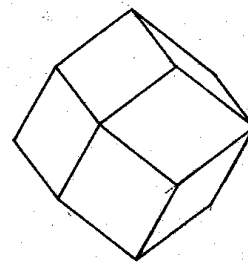
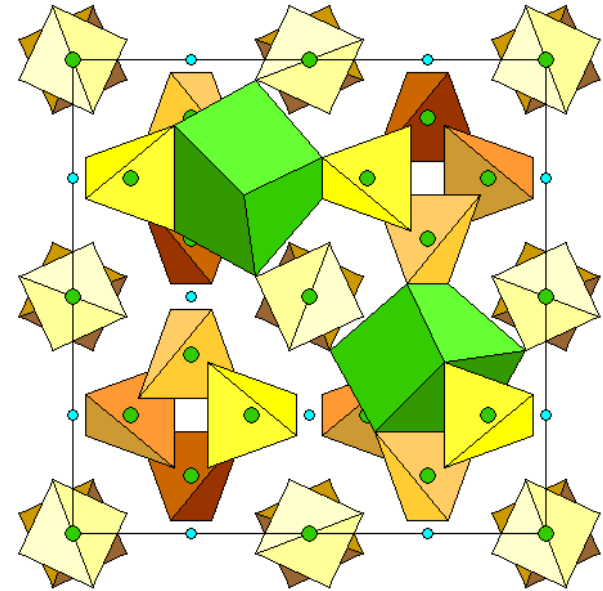
		a_0 (Å)
Pyrop	$Mg_3 Al_2 Si_3 O_{12}$	11,46
Almandin	$Fe_3 Al_2 Si_3 O_{12}$	11,53
Spessartin	$Mn_3 Al_2 Si_3 O_{12}$	11,62
Grossular	$Ca_3 Al_2 Si_3 O_{12}$	11,85
Andradit	$Ca_3 Fe_2 Si_3 O_{12}$	12,06

- Typické substituce Mn- Fe^{2+} -Ca-Mg, Al- Fe^{3+}
- Mísitelnost mezi jednotlivými členy granátu je různá, neomezená v případě, že je velikost zastupovaných kationtů blízká, menší, je-li rozdíl větší. Závisí i na PT podmínkách.

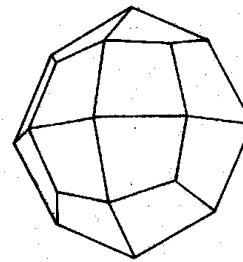


2. Nesosilikáty- skupina granátu

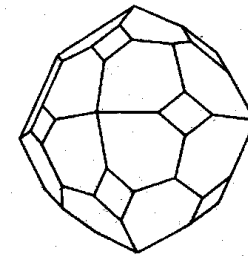
- Izolované tetraedry SiO_4 sdílejí apikální kyslíky s deformovanými oktaedry (Al a Fe^{3+}) a s deformovanými hexaedry (Mg, Fe^{2+} , Mn, Ca).
- Vlastnosti:
Barva: červená a její odstíny, méně často zelená, žlutá, bezbarvý (grossular), granát není nikdy modrý.
neštěpný, $T = 7-7,5$, $h = 3,6-4,2$.
- Ve výbruse je izotropní.



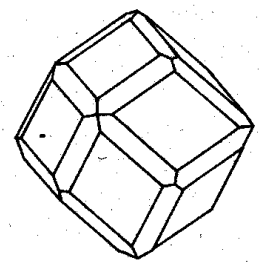
*dvanáctistěn
kosočtverečný*



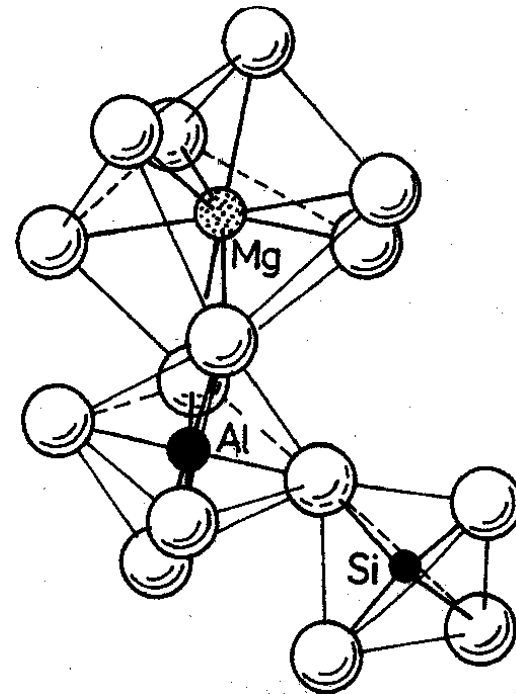
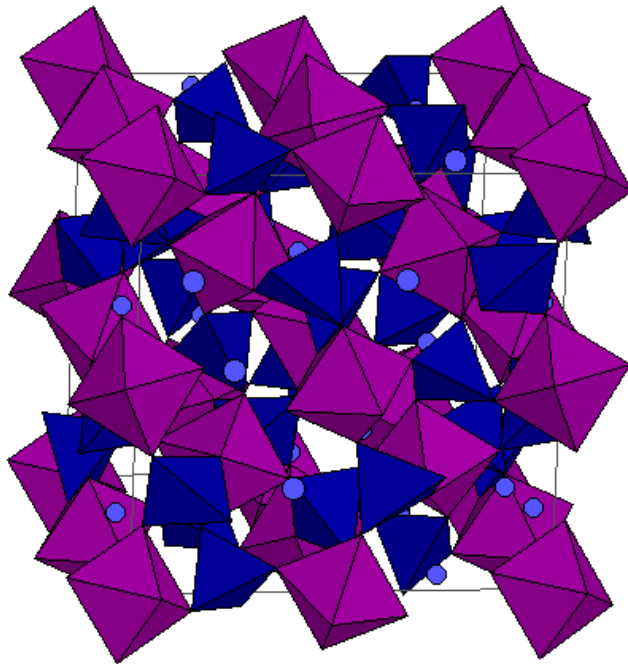
*čtyřiadvacetistěn
deltoidový*



kombinace obou tvarů



2. Nesosilikáty- skupina granátu



Krystalová struktura granátu

2. Nesosilikáty- skupina granátu

Výskyty:

- **Almandin**
 - metamorfované pelity (svor, rula – Petrov nad Desnou), pegmatity (Dolní Bory), granity (Přibyslavice)
- **Pyrop (český granát)**
 - ultrabazické horniny (dunity, serpentinity - Drahonín, eklogity - Biskupice)
- **Spessartin** – pegmatity (Bližná), Mn-bohaté metamorfované horniny (Chvaletice)
- **Grossular (varieta hessonit)** – skarny (Žulová)
- **Andradit** – skarny (Vlastějovice)

- **Granáty jsou většinou velmi odolné vůči hydrotermálním alteracím a zvětrávání, proto jsou běžné jako těžký podíl v sedimentárních horninách**

- **Využití: drahý kámen, abrazivo, v metamorfní petrologii pro odhad PT podmínek, pro odvození provenience sedimentů.**

2. Nesosilikáty- skupina granátu



Grossular ve skarnu - Žulová



Almandin-spessartin

2. Nesosilikáty- skupina granátu

Grossular



Andradit

uvarovit

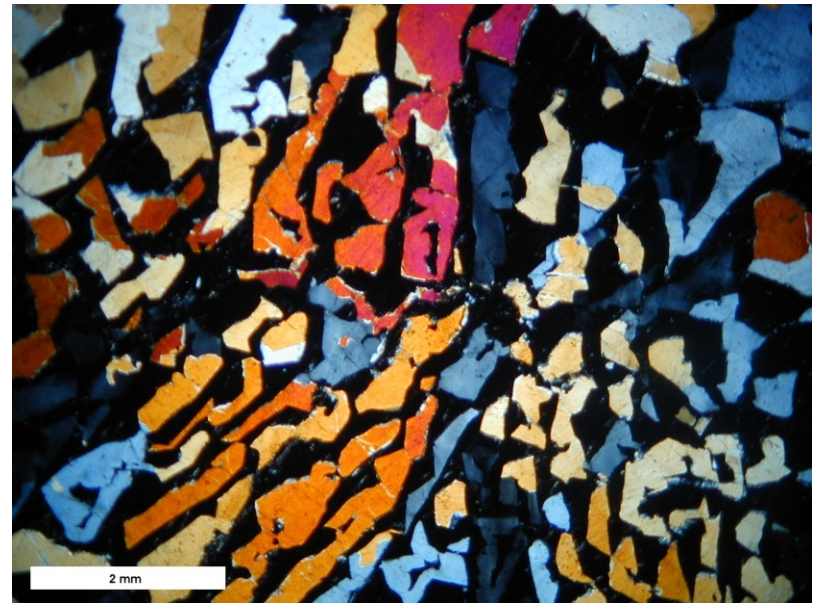


2. Nesosilikáty- skupina granátu

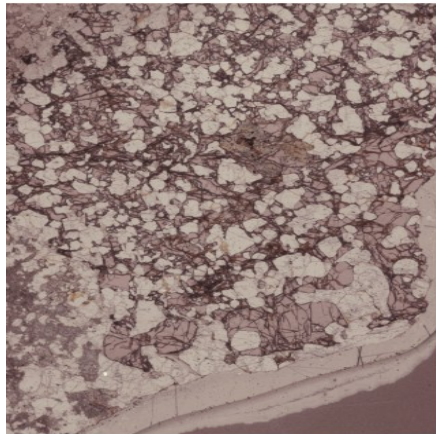


Orientovaný grafický srůst granátu (černý - izotropní) a křemene (barevný), Bližná výbrus

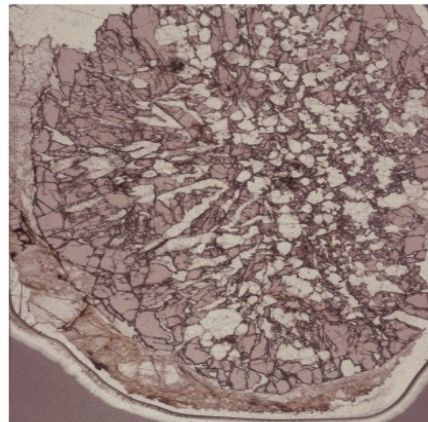
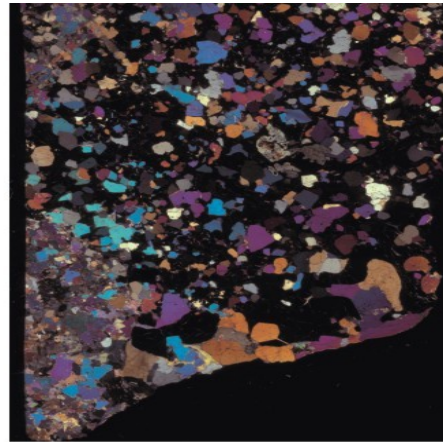
Pyrop v ultrabazické hornině



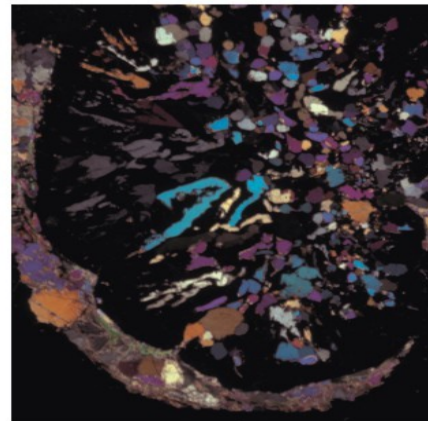
2. Nesosilikáty- skupina granátu



3674 Garnet-quartz nodule in orthogneiss. Irregular aggregate of individual quartz grains cemented with garnet

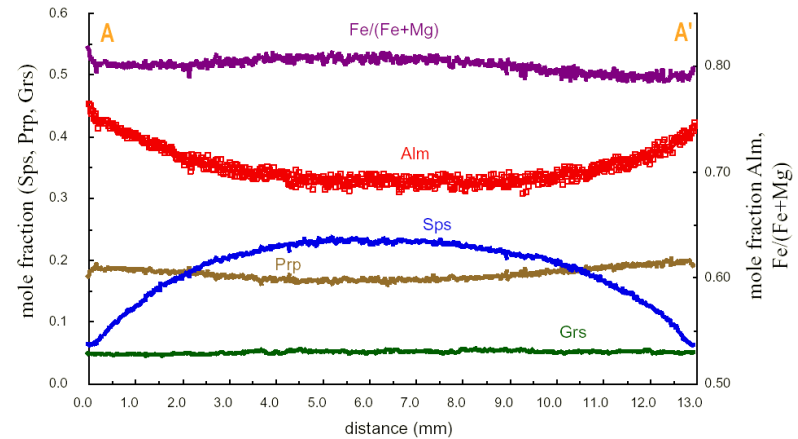
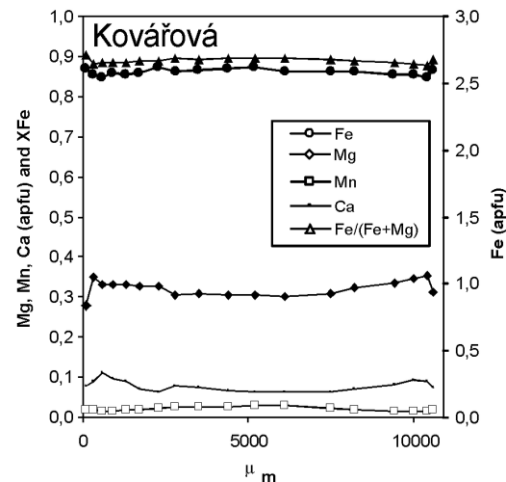
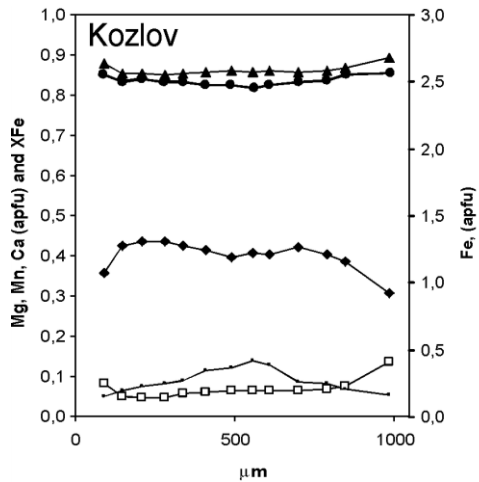
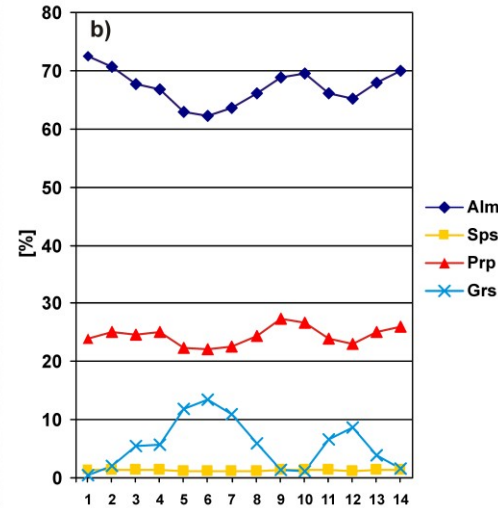
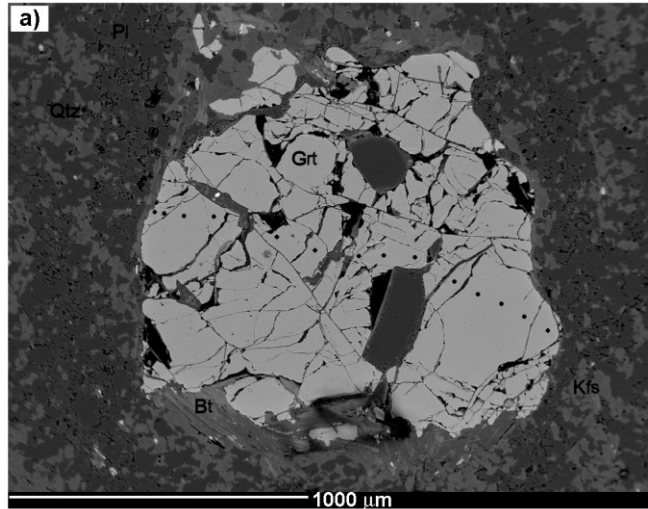


3677 Garnet-quartz nodule in aplopegmatite. Radial aggregate of quartz grains, in some parts graphic-like intergrowths. Nodule is limited with crystal planes.



Almandin srůstající s křemenem - Příbyslavice

2. Nesosilikáty- skupina granátu



2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5

- Minerály Al_2SiO_5

Sillimanit	$\text{Al}^6 \text{Al}^4 \text{O SiO}_4$	rombický
Andalusit	$\text{Al}^6 \text{Al}^5 \text{O SiO}_4$	rombický
Kyanit	$\text{Al}^6 \text{Al}^6 \text{O SiO}_4$	triklinický

Chemické složení je většinou velmi blízké ideálnímu složení.

minoritní a stopové prvky

Sillimanit	B^{3+} , Mg, Fe^{3+}
Andalusit	Mn^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}
Kyanit	Cr^{3+} , V^{3+} , Fe^{3+}

Variety:

fibrolit – jehlicovitý sillimanit

chiasolit – andalusit se sektoriální

zonálností z kontaktních rohovců,

viridin – zelený Mn-andalusit

2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5



Andalusit, Dolní Bory



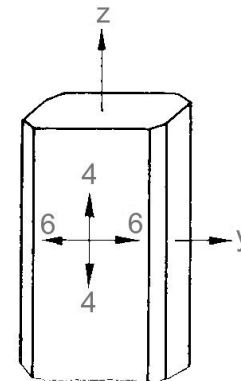
Kyanit, Frymburk



Sillimanit, Náchov

2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5

- **Vlastnosti:**
- **Sillimanit** – jehlicovité až vláknité, méně často i drobně až hrubě zrnité agregáty nebo sloupcovité krystaly, velikost až do několik dm
šedá, bílá, žlutá, hnědá, bezbarvý
štěpný
- **Andalusit** - sloupcovité krystaly, jehlicovité, drobně až hrubě zrnité agregáty, velikost až do velikosti 1 m
růžová, červenohnědá, bílá šedá, zelená, modrá, někdy je pleochroický (v různé orientaci má různou barvu)
nedokonale štěpný
- **Kyanit** - sloupcovité až tabulkovité krystaly, drobně až hrubě zrnité agregáty, velikost až několik dm
modrá, šedá, bezbarvý, vysoký index lomu
výborně štěpný
- Tvrdost 6-7, u kyanitu 7-5,
- $h = 3,2-3,6$ (kyanit).

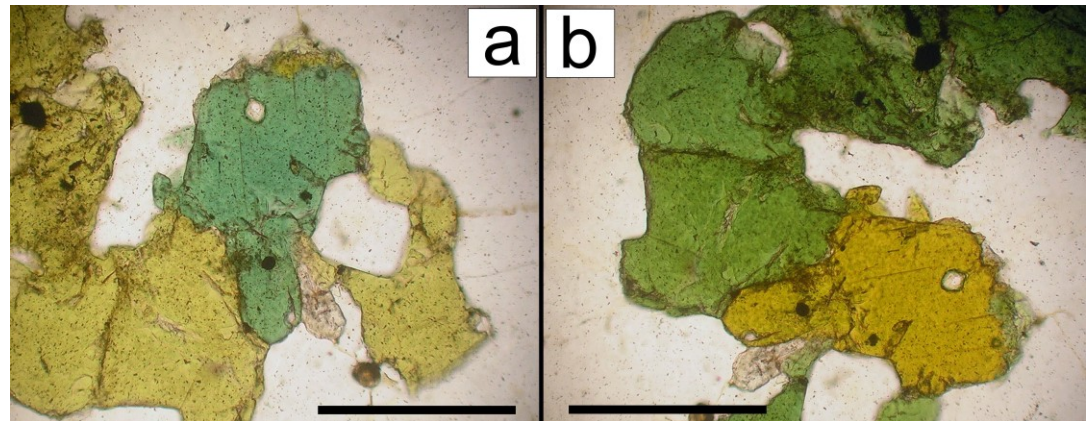


2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5



Andalusit v kontaktní
břidlici, s. Portugalsko

Pleochroismus u Mn-andalusitu



2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5

- **Výskyty:**
 - **Horniny bohaté Al**
 - **Sillimanit** – regionálně metamorfované horniny středního až vyššího stupně, migmatity
 - **Andalusit** – kontaktně i regionálně metamorfované horniny (Branná), granity, pegmatity (Dolní Bory)
 - **Kyanit** – regionálně metamorfované horniny středního až vyššího stupně (Frymburk), granulity
- Z obrázku je zřejmé, že pozice trojného bodu zůstává stále diskutabilní. Především pozice univariantní křivky reakce andalusit=sillimanit je nejistá.
- **Odolnost Al_2SiO_5 je proti alteracím je střední až vysoká, proti zvětrávání je vysoká, proto jsou běžné v sedimentech.**
 - **Využití: Velmi důležité minerály pro odhad podmínek vzniku hornin.**

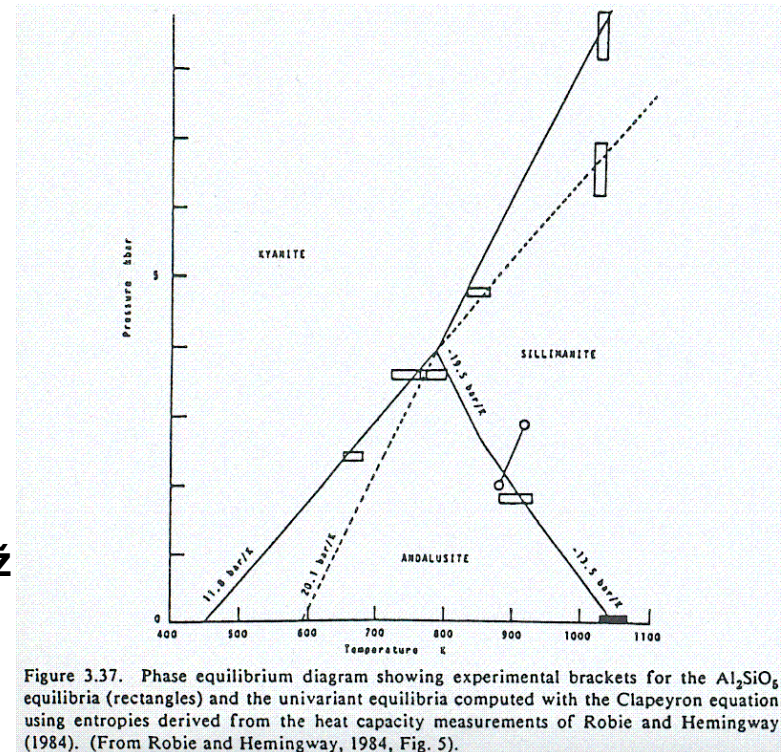
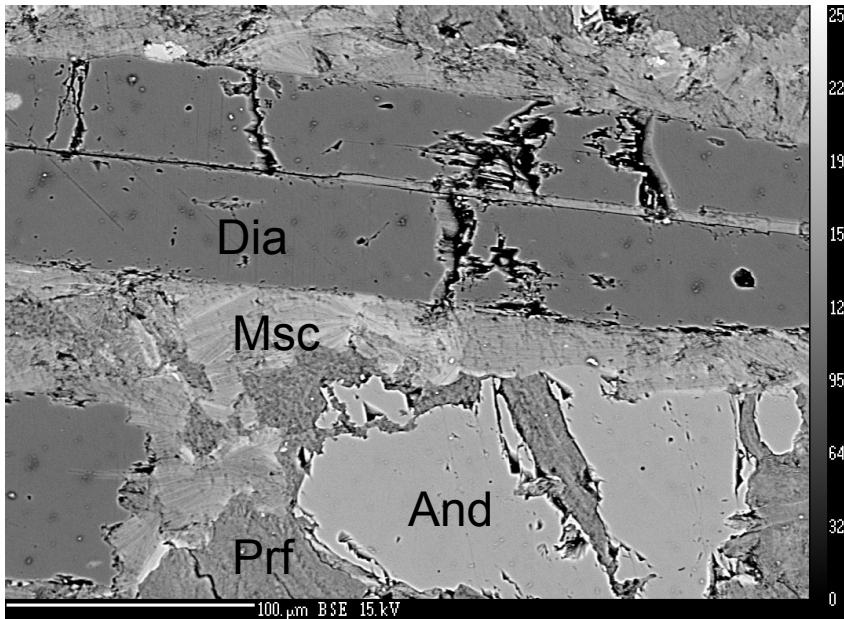


Figure 3.37. Phase equilibrium diagram showing experimental brackets for the Al_2SiO_5 equilibria (rectangles) and the univariant equilibria computed with the Clapeyron equation using entropies derived from the heat capacity measurements of Robie and Hemingway (1984). (From Robie and Hemingway, 1984, Fig. 5).

2. Nesosilikáty - Skupina Al_2SiO_5



Alterace andalusitu pyrofylytem a muskovitem (Dolní Bory)

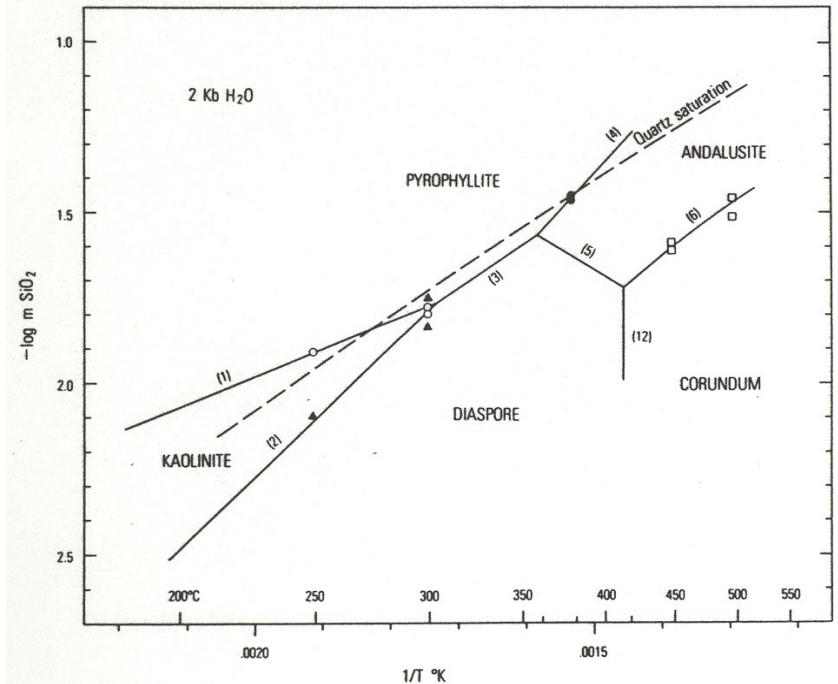


Diagram stability andalusitu za nízkých teplot

2. Nesosilikáty – další minerály

- **Staurolit**
 $\text{Fe}_2 \text{Al}_9 \text{O}_6 (\text{SiO}_4)_4 (\text{O}, \text{OH})_2$
 Vedlejší prvky: Zn, Li, Mn, Co
 Monoklinický (pseudorombický)
- **Vlastnosti:** hnědý v různých odstínech, nedokonale štěpný, $t = 7-7,5$, $h = 3,6-3,8$
- **Výskyty:**
 Horniny bohaté Al
 Typický horninotvorný minerál svorů a rul (Keprník), typický těžký minerál vzhledem ke svojí mechanické a chemické odolnosti a hustotě.
- **Důležitý pro odhad PT podmínek v metamorfovaných horninách.**

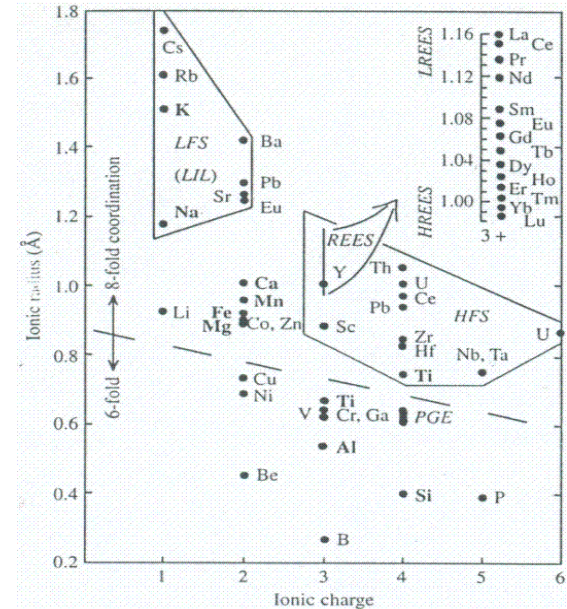


Staurolit

TABLE 13. END MEMBERS AND IMPORTANT EXCHANGE-VECTORS IN STAURILITE

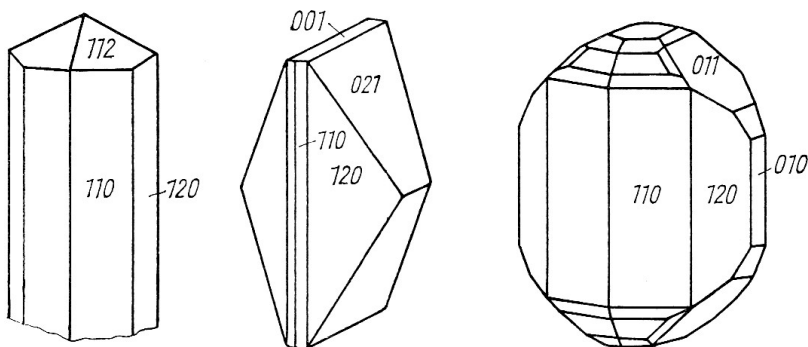
		End member		exchange vector		
Heterovalent exchanges involving hydrogen						
(1)	\square_2	Fe_2^{2+}	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4$ Additive component
(2)	$(\square_2 \text{Fe}_2^{2+})$	\square_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_2 \text{Fe} \square_2 (\text{OH})_2 (\square \text{Fe}_2 \text{O}_2)_{-1}$
(3)	\square_2	Fe_2^{2+}	Al_{18}	$(\square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_2 \square (\text{OH})_2 (\text{AlO}_2)_{-1}$
(4)	\square_2	Fe_2^{2+}	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	$(\text{Si}_2 \text{Al}_2)$	$0_{60} (\text{OH})_2 0_2 \text{AlOH} (\text{SiO})_{-1}$
(5)	\square_2	Fe_2^{2+}	$(\text{Al}_{12} \text{Mg}_6)$	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_2 \text{MgOH} (\text{AlO})_{-1}$
(6)	\square_2	Li_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_2 \text{LiOH} (\text{FeO})_{-1}$
Heterovalent exchanges involving *Al						
* (7)	\square_2	Al_2	Al_{18}	$(\text{Al}_{6,40} \square_{2,22})$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{Al}_2 \square_{1,22} (\text{Fe}, \text{Al}_{1,22})_{-1}$
(8)	\square_2	Al_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	$(\text{Si}_2 \text{Al}_2)$	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{AlAl} (\text{FeSi})_{-1}$
(9)	\square_2	Al_2	$(\text{Al}_{12} \text{Mg}_6)$	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{AlMg} (\text{FeAl})_{-1}$
Homovalent exchanges						
(1)	\square_2	Zn_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{FeZn}_2$
(2)	\square_2	Co_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{FeCo}_2$
(3)	\square_2	Mg_2	Al_{18}	$(\text{Al}_2 \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{FeMg}_2$
(4)	\square_2	Fe_2^{2+}	Fe_{18}^{2+}	$(\text{Fe}_2^{2+} \square)_2$	Si_8	$0_{60} (\text{OH})_2 0_4 \text{AlFe}_2$

* note that the end member could be simplified to $\square_2 \text{Al}_2 \text{Al}_{16} \square_2 \text{Si}_8 \text{O}_{60} [(\text{OH})_2 \text{O}_4]$ at the expense of complicating the exchange vector: $\text{Al}_2 \square_2 (\text{OH})_2 (\text{Fe}_2^{2+} \text{Al}_2 \text{O}_2)_{-1}$.



2. Nesosilikáty – další minerály

- **Topaz**
 $\text{Al}_2\text{SiO}_4 (\text{F},\text{OH})_2$
rombický
- **Vlastnosti:** bezbarvý, modrý, žlutý,
dokonale štěpný, $t = 8$, $h = 3,6-3,8$
- **Výskyty:**
Typický minerál greisenů, pegmatitů,
těžký minerál.



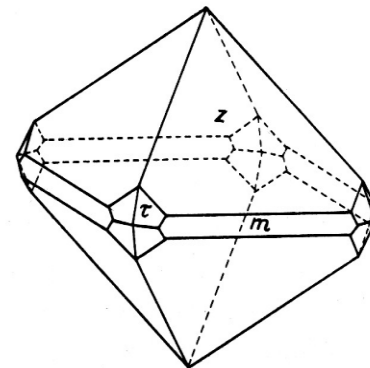
2. Nesosilikáty – další minerály

- **Chloritoid**
 $(\text{Fe, Mg})_2 \text{Al}_4 \text{O}_2 (\text{SiO}_4)_2 (\text{OH})_2$
Vedlejší prvky: Mn
Monoklinický a triklinický
strukturně a geneticky příbuzný staurolitu
- **Vlastnosti:** tmavozelený až černý, výborně štěpný, $t = 5-6$, $h = 3,4-3,6$
- **Výskyty:**
v metamorfovaných horninách (při nižší metamorfóze, než aby vznikl staurolit) – chloritoidových břidlicích
- **Důležitý pro odhad PT podmínek v metamorfovaných horninách.**

- **Titanit**
 $\text{Ca Ti} (\text{SiO}_4/\text{O})$
Vedlejší prvky: Sn, Al, Nb, Ta, F, Y, REE
Monoklinický
- **Vlastnosti:** hnědý, žlutý, zelený, nedokonale štěpný, $t = 5-5,5$ $h = 3,4-3,6$
- **Výskyty:**
Hojný akcesorický minerál v různých typech metamorfovaných a magmatických hornin, vyžaduje zvýšenou aktivitu Ca.
- **Středně odolný vůči alteracím.**

2. Nesosilikáty – další minerály

- **Zirkon**
 Zr SiO_4
Vedlejší prvky: Hf, U, Th, Y, Sc, P
- **Tetragonální**
- **Vlastnosti:** hnědý, žlutý, nedokonale štěpný, $t = 7-7,5$
 $h = 4,6-4,7$
- **Výskyty:**
Akcesorický minerál v různých typech hornin,
jediný relativně hojný minerál Zr.
- **Velmi odolný proti alteracím, používá se k radiometrickému datování.**
Často je ale metamiktní (rozpad struktury působením radioaktivního záření)



2. Nesosilikáty – další minerály

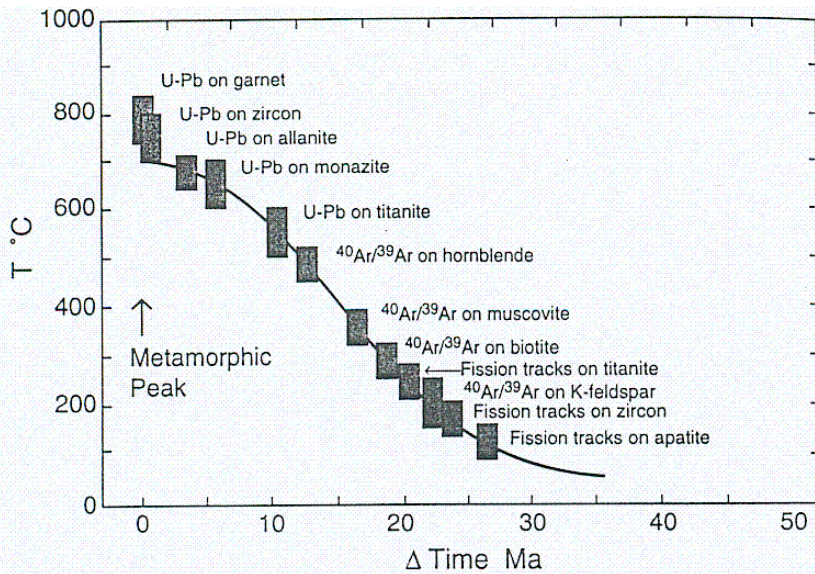


Figure 20-12. A hypothetical temperature-time plot showing the array of different thermochronometers that may be used to constrain the T-t history of an area.

3. Sorosilikáty – skupina epidotu

- Málo významná skupina, mají nízký stupeň polymerizace, dva spojené tetraedry Si_2O_7 , někdy jsou ve struktuře přítomny SiO_4 i Si_2O_7 .

- Skupina epidotu

Obecný vzorec $\text{A}_2\text{B}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$ nebo $\text{A}_2\text{B}_3 \text{Si}_3\text{O}_{11} (\text{OH},\text{F})_2$

A = Ca, Ce

B = Al, Fe^{3+} , Mn^{3+}

Vedlejší prvky: Mg, Sr, Y

Epidot $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+} (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

Klinozoisit $\text{Ca}_2\text{Al}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

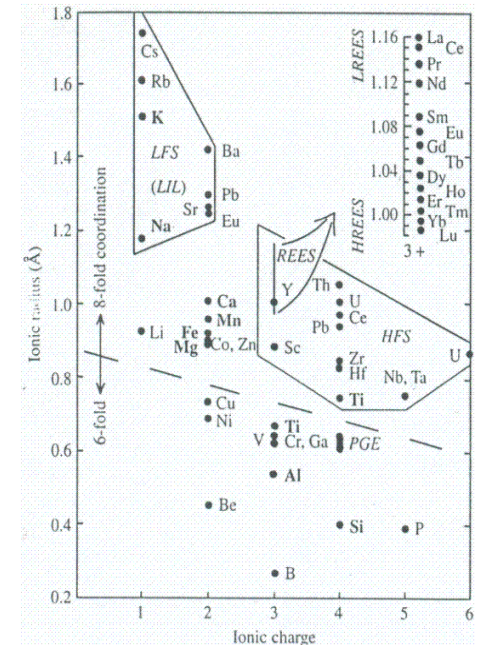
Zoisit $\text{Ca}_2\text{Al}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

Allanit-(Ce) $\text{Ce Ca Al}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

Substituce Al- Fe^{3+} , Al- Mn^{3+} ,

Monoklinické, rombické

- Vlastnosti: zelený v různých odstínech, černý (allanit), dokonale štěpný, $t = 6,5$, $h = 3,1-3,5$



3. Sorosilikáty – skupina epidotu



Epidot, Vlastějovice

- **Výskyty:**
Hydrotermální alpské žíly (Sobotín), pegmatity, skarny, metamorfované horniny bohaté Ca (Žulová).
- **Středně až málo odolné vůči alteracím (hlavně allanit).**
- **Využití:** indikátor vyšší aktivity O_2 a je často produktem hydrotermálních alterací jiných minerálů.



Allanit, Žulová

4. Shrnutí 1

1. Tato přednáška zahrnuje jen základní přehled hlavních minerálů ze skupiny nesosilikátů a sorosilikátů, ve skutečnosti je v této skupině několik set minerálů.
2. Většina minerálů má většinou poměrně vysokou tvrdost 6-7, hustotu větší než 3, a většina má nedokonale vyvinutou štěpnost.
3. Barva kolísá podle obsahu Fe (Mn), minerály s výraznou převahou Mg nad Fe (Mn) jsou bezbarvé, světle žluté nebo světle zelené, minerály bez Mg a Fe mají různé ale většinou světlé barvy. Minerály s vysokým obsahem Fe jsou tmavé – černé, červenofialové nebo hnědé.
4. Většina minerálů ze skupiny nesosilikátů a sorosilikátů má nízký nebo nulový obsah H₂O.
5. Většina minerálů vzniká za relativně vyšších teplot a tlaků v magmatických a metamorfovaných horninách.
6. U většiny z nich je nutné znát chemické vzorce (olivín, granáty, Al₂SiO₅ modifikace, zirkon).

4. Shrnutí 2

7. **Minerály dobře odolné hydrotermálním alteracím:
zirkon, staurolit, granáty, sillimanit**
**Minerály špatně odolné hydrotermálním alteracím:
olivín, andalusit, allanit**
8. **Minerály vznikající za velmi vysokých tlaků a teplot v podmínkách zemského pláště:
pyrop, olivín, kyanit**
**Minerály vznikající za nízkých tlaků v podmínkách svrchních částí zemské kůry:
andalusit, andradit, topaz, epidot**
9. **Důležité akcesorické minerály:
zirkon, titanit**