

## *Mineralogie II*

*Milan Novák*

*Ústav geologických věd, PřF MU v Brně*

# SILIKÁTY

Největší skupina minerálů v mineralogickém systému. Zahrnuje většinu horninotvorných minerálů. Ze strukturního hlediska je nejvíce prozkoumaná a podle stupně polymerizace  $\text{SiO}_4$  tetraedrů je dělíme do několika skupin.

nesosilikáty  
sorosilikáty  
cyklosilikáty  
inosilikáty  
fylosilikáty  
tektosilikáty

Obr. Stupně polymerizace  $\text{SiO}_4$  tetraedrů.

## NESOSILIKÁTY

Tetraedry  $\text{SiO}_4$  jsou izolované od ostatních tetraedrů, ale sdílejí apikální kyslíky se dalšími typy polyedrů (oktaedry, hexaedry, dodekaedry) ve struktuře

Skupina olivínu

Rombické

Obecný vzorec  $\text{M}_2\text{SiO}_4$

$\text{M} = \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}$

Vedlejší prvky: Ca, Ni, B, OH

Struktura

izolované tetraedry  $\text{SiO}_4$ , sdílející apikální kyslíky s oktaedry, obsazenými dvojhvalentními kationty ( $\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}$ )

Minerály

Forsterit  $\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$

Fayalit  $\text{Fe}_2 \text{SiO}_4$

Tefroit  $\text{Mn}_2 \text{SiO}_4$

Ideálně mísitelné, hlavní substituce Mg-Fe-Mn

**Výskyty:**

**Forsterit**

ultrabazické magmatické (výlevné i hlubinné) a metamorfované horniny  
hojný ve svrchním pláští

dolomitické mramory

**Fayalit**

pegmatity (Strzegom) a alkalické granity

Fe-bohaté metamorfované hornin

**Tefroit**

Mn-bohaté metamorfované horniny

Olivín lehce podléhá hydrotermálním alteracím a vzniká serpentín.

**Skupina humitu**

**Rombické a monoklinické**

Příbuzné olivínu, ve struktuře se střídají motivy  $Mg_2SiO_4$  a  $Mg(OH,F)_2$  v různé poměru

**Minerály**

**norbergit**

**chondrodit**  $Mg_5(SiO_4)_2(OH, F)_2$

**humit**

**klinohumit**

**Výskyty**

Dolomitické mramory, skarny

Ultrabazické horniny

**Skupina granátu**

**Kubické**

**Obecný vzorec**  $A_3B_2(SiO_4)_3$

**A** =  $Fe^{2+}$ , Mn, Ca, Mg

**B** = Al,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $V^{3+}$

**Vedlejší prvky:** Y, Zr, Ti, Na, OH, P

**Struktura**

Izolované tetraedry  $SiO_4$  sdílejí apikální kyslíky s deformovanými oktaedry (Al a  $Fe^{3+}$ )  
a s deformovanými dodekaedry (Mg,  $Fe^{2+}$ , Mn, Ca).

Granáty jsou kubické, vstup OH snižuje souměrnost.

**Minerály**

**Pyrop**  $Mg_3 Al_2 Si_3 O_{12}$

**Almandin**  $Fe_3 Al_2 Si_3 O_{12}$

**Spessartin**  $Mn_3 Al_2 Si_3 O_{12}$

**Grosulár**  $Ca_3 Al_2 Si_3 O_{12}$

**Andradit**  $Ca_3 Fe_2 Si_3 O_{12}$

**Uvarovit**  $Ca_3 Cr_2 Si_3 O_{12}$

**Hibschit**  $Ca_3 Al_2 Si_3 O_{12-x} (OH)_{4x}$

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.

Substituce Mn-Fe<sup>2+</sup>-Ca-Mg, Al-Fe<sup>3+</sup>-Cr, Si-4H, Si-P

Výskyty:

Almandin – metamorfované pelity, pegmatity, granity

Pyrop – ultrabazické horniny

Spessartin – pegmatity, Mn-bohaté metamorfované horniny

Grossular - skarny

Andradit - skarny

Hibschit - kontakty vulkanických hornin

Granáty jsou velmi odolné vůči hydrotermálním alteracím a zvětrávání

Skupina Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>

Sillimanit Al<sup>6</sup> Al<sup>4</sup> O SiO<sub>4</sub> rombický

Andalusit Al<sup>6</sup> Al<sup>5</sup> O SiO<sub>4</sub> rombický

Kyanit Al<sup>6</sup> Al<sup>6</sup> O SiO<sub>4</sub> triklinický

Vzhled, barva a optické 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

Andalusit - sloupcovité krystaly, jehlicovité, drobně až hrubě zrnité agregáty, velikost až do velikosti 1 m

růžová, červenohnědá, bílá šedá, zelená, modrá, někdy je pleochroický

Kyanit - sloupcovité až tabulkovité krystaly, drobně až hrubě zrnité agregáty, velikost až několik dm

modrá, šedá, bezbarvý, vysoký index lomu

Variety:

viridin – zelený Mn-andalusit,

chiasolit – andalusit se sektoriální zonálností z kontaktních rohoveců,

fibrolit – jehlicovitý sillimanit

Krystalová struktura

Obr. Krystalová struktura sillimanitu, andalusitu a kyanitu I

Chemické složení je většinou blízké ideálnímu složení.

Sillimanit	Al <sup>6</sup> Al <sup>4</sup> O SiO <sub>4</sub>	minoritní a stopové prvky B <sup>3+</sup> , Mg, Fe <sup>3+</sup> , Al, H
Andalusit	Al <sup>6</sup> Al <sup>5</sup> O SiO <sub>4</sub>	Mn <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , H
Kyanit	Al <sup>6</sup> Al <sup>6</sup> O SiO <sub>4</sub>	Cr <sup>3+</sup> , V <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , H

Většinou jsou blízké koncovému členu, některé stopové až minoritní prvky jsou uvedeny výše. Pouze  $Mn^{3+}$  a v menší míře také  $Fe^{3+}$  v andalusitu dosahují významných koncentrací a existuje  $Mn^{3+}$  analog andalusitu - kanonait.

**Petrologický význam jednotlivých modifikací  $Al_2SiO_5$  a příbuzných minerálů**

**Výskyty:**

**Sillimanit – regionálně metamorfované horniny středního až vyššího stupně, migmatity**

**Andalusit – kontaktně metamorfované horniny, granity, pegmatity**

**Kyanit – regionálně metamorfované horniny středního až vyššího stupně, granulity**

**Obr. Trojný bod -  $Al_2SiO_5$ .**

Z obrázků je zřejmé, že pozice trojného bodu zůstává stále diskutabilní. Především pozice univariantní křivky reakce andalusit=sillimanit je nejistá.

**Staurolit**

**Mnoklinický (pseudorombický)**

**$Fe_2 Al_9 O_6 (SiO_4)_4 (O,OH)_2$**

**Obecný vzorec:  $A_4B_4C_{18}D_4T_8O_{40} (O,OH)_8$**

**Vedlejší prvky: Zn, Li, Mn, Co**

**Substituce: Fe-Zn, i velmi komplikované**

**Struktura:**

**Obr. Struktura staurolitu.**

**Výskyty**

**Typický horninotvorný minerál svorů a rul, výjimečně se objevuje v peraluminických granitech, popř. pegmatitech, typický těžký minerál vzhledem ke svojí mechanické a chemické odolnosti a hustotě.**

**Chloritoid**

**monoklinický a triklinický**

**$(Fe, Mg)_2 Al_4 O_2 (SiO_4)_2 (OH)_2$**

**strukturně a geneticky příbuzný staurolitu**

**Vedlejší prvky: Mn**

**Výskyty**

**v metamorfovaných horninách (při nižší metamorfóze, než aby vznikl staurolit) – chloritoidových břidlicích**

## **Topaz**

**Rombický**

**$\text{Al}_2\text{SiO}_4 (\text{F}, \text{OH})$**

**Substituce F-OH**

**Výskyty:**

**v pegmatitech, greisenech, granitech a na křemenných žilách.**

## **Titanit**

**Monoklinický**

**Ca Ti ( $\text{SiO}_4/\text{O}$ )**

**Vedlejší prvky: Sn, Al, Nb, Ta, F, Y**

**substituce: AlF - TiO, NbAl - 2Ti**

**Výskyty:**

**Hojný akcesorický minerál v různých typech hornin, vyžaduje zvýšenou aktivitu Ca.**

## **Zirkon**

**Tetragonální**

**Zr  $\text{SiO}_4$**

**Vedlejší prvky: Hf, U, Th, Y, Sc, P**

**Typické substituce: Zr-Hf, Zr-Th, ZrSi –YP, ZrSi-ScP**

**Výskyty:**

**Hojný akcesorický minerál v různých typech hornin, jediný rel. hojný minerál Zr..**

**Další nesilikáty:**

**Fenakit  $\text{Be}_2\text{SiO}_4$**

**Willemit  $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$**

**Datolit  $\text{CaBSiO}_4 \text{OH}$**

**Dumortierit  $\text{Al}_7 (\text{BO}_3) (\text{SiO}_4)_3 \text{O}_3$**

**Uranofán  $\text{Ca}(\text{H}_3\text{O}) (\text{UO}_2)_2 (\text{SiO}_4)_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$**

## SOROSILIKÁTY

Málo významná skupina, mají nízký stupeň polymerizace, dva spojené tetraedry  $\text{Si}_2\text{O}_7$ , někdy jsou ve struktuře přítomny  $\text{SiO}_4$  i  $\text{Si}_2\text{O}_7$ .

**Bertrandit**

**Rombický**

$\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7 (\text{OH})_2$

**Výskyty**

sekundární minerál po berylu

Skupina epidotu

**Monoklinické, romboické**

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<sup>3+</sup>, Mn<sup>3+</sup>**

**Minerály**

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

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

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

**Allanit**  $(\text{Ce,Ca})_2\text{Al}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

**Piemontit**  $\text{Ca}_2\text{AlMn}^{3+}_3 (\text{SiO}_4)_3 \text{OH}$

Substituce  $\text{Al-Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al-Mn}^{3+}$ ,

**Výskyty**

Hydrotermální alpské žíly, pegmatity, skarny, metamorfované horniny bohaté Ca, Mn-bohaté metamorfované horniny

**Vesuvian**

**Tetragonální**

$\text{Ca}_{10} (\text{Mg,Fe})_2 \text{Al}_4 (\text{SiO}_4)_5 (\text{Si}_2\text{O}_7)_2 (\text{OH},\text{F})_4$

Vedlejší prvky: B, Na, Mn, Be

**Výskyty:**

skarny, alkalické vyvřeliny

**Další sorosilikáty**

**Hemimorfit**  $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7 (\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

**Pumpellyit**  $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2 (\text{SiO}_4) (\text{Si}_2\text{O}_7) (\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

## CYKLOSILIKÁTY

Skupina silikátů, v níž jsou  $\text{SiO}_4$  tetraedry spojeny do prstenců a jiných cyklických tvarů. Do této skupiny patří poměrně malé množství minerálů, část z nich ale důležitých horninotvorných minerálů.

Skupina berylu

Hexagonální

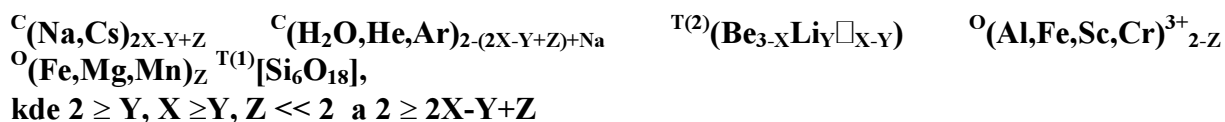
Obecný vzorec:  $\text{T}(2)_3\text{O}_2\text{T}(1)_6\text{O}_{18}$

Minerály

Beryl	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
Stoppaniit	$\text{Be}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
Bazzit	$\text{Be}_3\text{Sc}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Obr. Struktura berylu

Beryl je mnohem hojnější než oba další minerály a je pravděpodobně nejhojnějším minerálem Be vůbec. Jednoduché vzorce ale musíme nahradit podstatně složitějšími, uvažujeme-li skutečné složení berylu v přírodě.



Hlavní vedlejší prvky zahrnují: Na, Fe, Mg, v pegmatitech navíc Cs a Li, v metamorfovaných horninách také Cr. Kationty v jednotlivých pozicích a substituční mechanismy lze odhadnout ze strukturního vzorce. Tetraedrická substituce vede ke snižování množství Be, oktaedrická substituce ke zvyšování Fe, Mg a Sc.

V berylu je častý vysoký obsah  $\text{H}_2\text{O}$ , Na a někdy i Cs, které jsou umístěny v kanálech v několika strukturně odlišných pozicích.

Nejnovější výzkumy ukazují na zřetelnou mísitelnost mezi berylem a minerály skupiny cordieritu  $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$  – cordieritem a sekaninaitem. Zvýšený obsah Be v cordieritech z pegmatitů je poměrně častý, až 1,94 váh.% BeO, naopak beryl může obsahovat vysoká množství femických prvků, např. až 2,98 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a 2,24 % FeO. V cordieritu jsou známy dvě substituce pro vstup Be -  $\text{NaBeAl}_1$  a  $\text{BeSiAl}_2$ .

Výskyty:

Beryl se vyskytuje v různých geologických prostředích

1. granitické pegmatity - nejhojnější typ výskytu, několik set ppm Be je dostatečné ke krystalizaci berylu z taveniny. Složení berylu kolísá podle typu mateřského pegmatitu, v relativně primitivních pegmatitech se blíží teoretickému vzorci, v silně frakcionovaných pegmatitech může obsahovat vysoké obsahy Cs popř. Li.
2. greiseny a vysokoteplotní hydrotermální křemenné žíly
3. metamorfované horniny – často obsahuje zvýšená množství např. Fe, Cr, Mg, Sc, aj.

## Skupina cordieritu

### Rombické

Obecný vzorec  $M_2Al_3 (Al Si_5 O_{18})$

Vedlejší prvky: Be, Li, Mn, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Na

### Minerály

Cordierit  $Mg_2Al_3 (Al Si_5 O_{18})$

Sekaninait  $Fe_2Al_3 (Al Si_5 O_{18})$

Substituce Fe-Mg, NaBe-Al

### Výskyt

#### Cordierit

Je horninotvorným minerálem v metamorfitech bohatých Al v typické asociaci s křemenem a alumosilikáty – andalusitem, granátem, slídami, živci.

Vyskytuje se v periplutonicky metamorfovaných horninách (cordieritové ruly a migmatity – Vanov, Bory) a kontaktně metamorfovaných horninách (cordieritové kontaktní břidlice – plášť středočeského plutonu)

Sekaninait v granitických pegmatitech bohatých Al (popsán jako nový minerál z Dolních Borů) a granulitech.

Cordierit a sekaninait snadno podléhají pinitizaci – přeměně na směs sericitu a choritů (šedozelené pseudomorfózy)

## Skupina turmalínu

### Trigonální

Obecný vzorec:  $X Y_3 Z_6 T_6 O_{18} (BO_3)_3 V_3 W$

$X = \underline{Na^*, Ca, \square, K}$

$Y = \underline{Mg, Fe^{2+}, Li, Al, Fe^{3+}}, Mn, Zn, Cr^{3+}, V^{3+}, Ti^{4+}, (\square)$

$Z = \underline{Al, Mg, Fe^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}}$

$T = \underline{Si, Al, B}$

$B = \underline{B}$

$V = \underline{OH, O}$

$W = \underline{OH, F, O}$

### Minerály

Skoryl  $Na Fe_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 OH$

Dravit  $Na Mg_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 OH$

Foitit  $\square Fe_2 Al Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 OH$

Uvit  $Ca Mg_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 O$

$Ca Mg_3 Mg Al_5 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 OH$

Elbait  $Na (Li, Al)_3 Al_6 Si_6 O_{18} (BO_3)_3 (OH)_3 OH$



## *Krystalová struktura a krystalografie*

Turmalíny jsou řazeny mezi cyklosilikáty, jsou trigonální, prostorová grupa  $R3m$ . Mají acentrickou strukturu, která vede k polárnímu vývoji krystalů a výrazným pyroelektrickým i piezoelektrickým vlastnostem.

### *Obr. Krystalová struktura turmalínu*

#### Výskyty

Minerály skupiny turmalínu (především skoryl a dravit) jsou nejhojnějšími minerály s podstatným obsahem B v horninách zemské kůry. Tato skutečnost je způsobena širokým polem stability těchto minerálů v PT projekcích a jejich značnou odolností vůči chemickým i mechanickým přeměnám.

Díky refraktorním vlastnostech minerálů skupiny turmalínu, jejich přítomnost v horninách s velmi rozdílným chemickým složením a velmi rozdílným způsobem vzniku, patří mezi jedny z nejstudovanějších minerálů.

Na složení turmalínů mají vliv

- chemické složení mateřského media (např. tavenina, hydrotermální fluidum - zatlačovaná hornina)
- složení asociujících minerálů
- P-T-X podmínky vzniku

Skoryl je typickým minerálem peraluminických většinou silně leukokratních granitů.

Elbait - Li-pegmatity

Foilit - granity, pegmatity

Dravit metamorfované horniny metapelity

Uvit - metamorfované horniny bohaté Ca

Na stratiformních ložiscích rud nebo turmalinitech jsou zdrojem B velmi pravděpodobně klastické horniny kontinentálního původu popř. vulkanické exhaláty nebo evapority (dravit – uvit - skoryl)

#### Další cyklosilikáty

Axinit  $\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{B Si}_4\text{O}_{15}\text{OH}$

Dioptas  $\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$