

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**  
**KATEDRA GEOLOGIE**

**CHEMIZMUS STAUROLITU SVORŮ**  
**SILEZIKA**

**bakalářská práce**

**Zuzana Nováková**

**Environmentální geologie (B1201)**

**prezenční studium**

**vedoucí práce: doc. RNDr. Jiří Zimák, CSc.**

**duben 2013**

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že zadanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně pod dohledem mého vedoucího práce, a že jsem citovala veškerou použitou literaturu.

V Olomouci dne

.....

(podpis)

### **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce doc. RNDr. Jiřímu Zimákovi, CSc. za jeho vedení, konzultace a cenné rady, které mi byl ochoten dát, a stejně tak za pomoc při výběru lokalit a doprovod při odběru vzorků.

**Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora: Zuzana Nováková

Název práce: Chemizmus staurolitu svorů silezika

Typ práce: bakalářská

Pracoviště: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, katedra geologie

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jiří Zimák, CSc.

Rok obhajoby práce: 2013

Abstrakt: Tato práce je zaměřena na problematiku chemizmu staurolitu z oblasti silezika. Z vybraných lokalit byly odebrány vzorky staurolitických svorů, z nichž byly zhotoveny výbrusy, a ty vyhodnoceny pomocí polarizačního mikroskopu. K získání údajů chemizmu byly využity WDX analýzy, jejichž výsledky byly porovnány mezi sebou i mezi daty publikovanými v literatuře.

Klíčová slova: silezikum, staurolit, chemizmus, svor, analýza WDX

Počet stran: 46

Počet příloh: 3

Jazyk: čeština

**Bibliographical identification:**

Autor's first name and surname: Zuzana Nováková

Title: Chemistry of staurolite from mica schists in Silesicum

Type of thesis: bachelor

Institution: Palacký University in Olomouc, Faculty of Science, Department of Geology

Supervisor: doc. RNDr. Jiří Zimák, CSc.

The year of presentation: 2013

Abstract: The thesis is focused on the chemistry of staurolite from mica schists and similar staurolite-containing rocks in Silesicum. From selected locations samples of staurolite mica schists were removed, from which were made polished thin sections and they were studied by a polarizing microscope. WDX analysis were used to obtain chemistry data. Results were compared between each other and also with other studies from the literature.

Keywords: Silesicum, staurolite, chemistry, mica schist, WDX analysis

Number of pages: 46

Number of appendices: 3

Language: Czech

## Obsah

1 Úvod.....	7
2 Metodika a cíl práce.....	8
3 Slezikum.....	9
3.1 Geologické poměry v sleziku.....	10
3.2 Vývoj slezika v geologické minulosti.....	11
3.3 Metamorfní zóny v sleziku.....	12
3.3.1 Staurolitové zóny.....	12
4 Metamorfní procesy.....	15
5 Svor.....	17
6 Staurolit.....	18
7 Seznam studovaných lokalit.....	21
8 Minerální charakteristika svorů.....	29
9 Vyhodnocení WDX analýz.....	34
10 Diskuze.....	43
11 Závěr.....	44
Seznam použitých internetových zdrojů.....	45
Seznam zdrojů použité literatury.....	45
Seznam příloh.....	46

## 1 Úvod

Moje bakalářská práce je zaměřena na chemizmus staurolitu, který se vyskytuje ve svorech na území silezika, zejména v oblasti Hrubého Jeseníku. Cílem práce je zjistit chemizmus staurolitu ze vzorků, které jsem odebrala na vybraných lokalitách, což jsou lokality, kde staurolit nebyl z tohoto pohledu dosud zkoumán. Získaná data o chemizmu staurolitu jsem porovnala mezi sebou a také mezi dostupnými, již publikovanými analýzami a snažila jsem se zjistit nějaké závislosti s cílem potvrdit nebo vyvrátit domněnku, že chemizmus staurolitu by mohl být závislý na povaze protolitu, ze kterého staurolit během metamorfózy vzniká.

Domnívám se, že výsledky mé práce přispěly k rozšíření poznatků o chemizmu staurolitu z oblasti silezika.

## 2 Metodika a cíl práce

Podle zadání mé bakalářské práce jsem zpracovala rešerši se zaměřením na geologickou situaci silezika. Dále se zabývám metamorfózou svorů v oblasti silezika a jejich minerálním složením. Část rešerše věnuji chemizmu staurolitu, kde srovnávám již známé údaje o chemizmu s vlastními výsledky.

### *Terénní část*

Má terénní část spočívala v odebrání vzorků na území silezika. Pod vedením doc. Zimáka jsem prošla silezikum v oblasti Hrubého Jeseníku a odebrala reprezentativní vzorky (21 vzorků) svorů se staurolitem nebo s jeho předpokládaným obsahem. Podrobné popisy a lokalizace míst, kde jsem odebrala vzorky, jsou uvedeny v kapitole 7.

Po očištění vzorků a jejich nařezání na destičky, byly ze vzorků zhotoveny leštěné výbrusy (panem Jiřím Povolným, PřF MU Brno). Leštěné výbrusy jsem zkoumala pomocí optického mikroskopu Olympus BX50, na němž byly též pořízeny mikrofotografie pomocí fotoaparátu Olympus C-7070 (většina mikrofotografií je obsažena v příloze). V případě plagioklasů jsem určila bazicitu pomocí metody symetrické zóny (Gregerová et al. 2002).

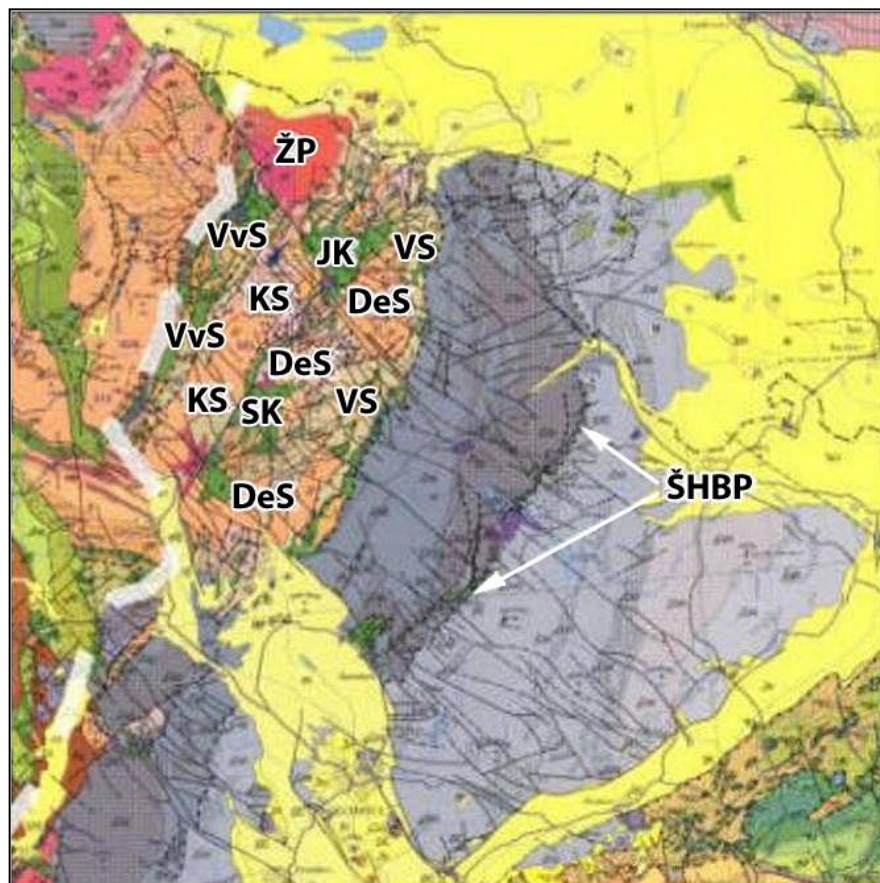
V 15 vzorcích svorů byl studován chemizmus staurolitu pomocí vlnově disperzní analýzy (WDX) na elektronové mikrosondě Cameca SX100 na PEMM PřF MU Brno (analytik Mgr. Petr Gadas, PhD.). WDX analýzy byly provedeny za těchto podmínek: průměr svazku 4  $\mu\text{m}$ , 15 keV, 10nA. Byly použity tyto standardy: albit (Na), wollastonit (Si), grossular (Al, Ca), MgO (Mg), sanidin (K), chromit (Cr), benitoit (Ba), titanit (Ti), almandin (Fe), spessartin (Mn), vanadinit (V), NaCl (Cl), gahnit (Zn) a topaz (F). Všechny údaje získané z WDX analýz jsem přepočítala v EXCELU na bázi na 11 kyslíků, všechno Fe uvádím jako dvojmocné.



### 3 Silezikum

Silezikum je částí moravosilezika na východě Českého masivu. Na západě je od moravika odděleno příčnými severozápadními a jihovýchodními zlomy labské tektonické zóny. Obecně se jako hranice silezika uvádí na západě ramzovské a nýznerovské nasunutí, na severu se noří v Polsku pod mladší kvartérní uloženiny, na východě západovergentní andělskohorské nasunutí a na jihu zlomy labské linie, konkrétně bušínské zlomové pásmo (Grygar nepubl., URL1).

Hlavní jednotky silezika jsou od východu k západu vrbenská skupina, desenská skupina, pásmo Červenohorského sedla, keprnická skupina, skupina Branné a velkovrbenská skupina. Dále pak šternbersko-hornobenešovské pásmo, sobotínský metabazitový komplex, jesenický metabazitový komplex a žulovský pluton- viz obr. 1 (Grygar nepubl., URL1).



Obr. 1. Silezikum: ŽP- žulovský pluton, VvS- velkovrbenská skupina, VS- vrbenská skupina KS- keprnická skupina, DeS- desenská skupina, JK- jesenický metabazitový komplex, SK- sobotínský metabazitový komplex (masiv), ŠHBP- šternbersko-hornobenešovské bradlové pásmo (Grygar nepubl., URL1, upraveno Nováková 2013)

Západní část silezika (desenská a vrbenská skupina) se dá považovat za příkrov Vysoké hole. Do spodní části příkrovu se počítá desenská skupina a s ní pásmo Červenohorského sedla a do svrchní části vrbenská skupina (Cháb et al. 2008).

### 3.1 Geologické poměry v sileziku

Vrbenská skupina je tvořena především kvarcity, křemennými metakonglomeráty, fylity a svory. Dále se tu objevují zelené břidlice, amfibolity, metatrachyty, porfyroidy, oligomiktní metakonglomeráty a mramory. S metavulkanity jsou spojeny četné drobné čočky metaferolitu, které byly těženy až do šedesátých let 20. století. Na východě v podloží andělsko-horského nasunutí se objevují mramory a arkózové metapískovce (Cháb et al. 2008).

Desenská skupina je od keprnické oddělena pásmem Červenohorského sedla. Desenské kvarcity, fylity, svory, zelené břidlice, amfibolity, metagabra a ojedinělé mramory se v pásmu Červenohorského sedla střídají s retrográdně metamorfovanými mylonitizovanými rulami a svory, metadacity a drobnými tělesy metagranitu (Cháb et al. 2008).

Keprnická skupina se skládá z keprnické ortoruly obklopené vnitřním i vnějším obalem. Vnitřní obal tvoří staurolitové svory a ruly a biotitické ruly s erlanovými vložkami. V obou skupinách je běžný sillimanit. Vnější obal se dělí na spodní část, která je tvořena různými variantami biotitických a biotit-kalcitických fylitů, z tmavých muskovit-chloritických ( $\pm$ biotit) fylitů, mramorů a metadacitu. Svrchní část obalu představuje devonská skupina Branné. Ta je složena z kvarcitů, křemenných a oligomiktních metakonglomerátů, tmavých muskovit-chlorit-biotitických fylitů, s vložkami metatufů a mafických metavulkanitů, a z mramorů, místy chemicky velmi čistých (Cháb et al. 2008).

Velkovrbenská skupina je na východě oddělena ramzovským nasunutím. Ruly v této oblasti obsahují četné vložky amfibolitu, kalcitického i dolomitového mramoru a ojedinělé ortoruly a kvarcity. Grafitem bohaté polohy doprovázejí karbonátové horniny po celém obvodu klenby. Stavbu této jednotky velmi dobře zobrazují historické mapy těžby grafitu (Cháb et al. 2008).

### 3.2 Vývoj silezika v geologické minulosti

Silezikum bylo jako poslední postiženo variskou orogenezí a nejlépe slouží k rekonstrukci jejího geotektonického cyklu. Variská orogeneze začala devonským riftingem kadomské kůry a vznikem úzkých riftových bazénů s bimodálním vulkanismem. Kadomská kůra je tak rozčleněna do dvou nakloněných ker, které dnes vystupují v desenské a keprnické klenbě. Oddělovaly je relativně úzké devonské pánve, jejichž výplň je dnes zastoupena v zóně červenohorského sedla mezi desenskou a keprnickou klenbou, pásmem Branné, případně částí hornin velkovrbenské klenby. Kadomský fundament i devonský obal byly intenzivně deformovány během vytváření variského akrečního klínu. Orogenní fronta migrovala v čase i prostoru od Z k V, což dokládá k východu klesající Ar-Ar stáří (340-300 Ma), údaje uvádí Maluski et al. v publikaci z roku 1995 (jak uvádí Grygar nepubl., URL1). Podle Chába et al. v publikaci z roku 1990 prodělaly devonské komplexy během subdukce rozčleněného okraje brunovistulika barrovienskou metamorfózu až v podmínkách amfibolitové facie- 600°C, 6-8 kbar (jak uvádí Grygar nepubl., URL1). Chlupáč v publikaci z roku 1989 uvádí, že byla i přesto na několika místech v devonských metamorfitech odpovídajících amfibolitové facii nalezena poměrně bohatá devonská společenstva fauny (jak uvádí Grygar nepubl., URL1). Podobně jako v moraviku, dle Součka v publikaci z roku 1978, je i v sileziku vyvinuta barrovienská metamorfni inverzní zonálnost od chloritové zóny na východě až po kyanitovou zónu na západě při hranici s lugikem (jak uvádí Grygar nepubl., URL1). Jedlička, v publikaci z roku 1995, a Hegner s Krönerem v publikaci z roku 2000 uvádí, že ztluštění variské kůry mělo za následek natavení spodních částí kůry a průnik variských granitoidních těles reprezentovaných především žulovským plutonem, šumperským masivem a několika drobnějšími masivky, jejichž stáří se pohybuje kolem 340 Ma (jak uvádí Grygar nepubl., URL1). Dalším rozdílem proti moraviku je i podstatně větší zkrácení prostoru a tedy i větší allochtonita jednotek ve srovnání s jednotkami moravika (Grygar nepubl., URL1).

### 3.3 Metamorfnní zóny v sileziku

V sileziku roste metamorfóza od J k S a dále pak k Z od chloritové po sillimanitovou zónu (Cháb et al. 2008).

#### 3.3.1 Staurolitové zóny

Vzorky obvykle obsahují granát, staurolit, biotit a +/- chloritoid, muskovit, křemen, plagioklas, ilmenit a pozdní chlorit. Porfyroblasty granátu (4 mm) obsahují výrazně orientované inkluze podle foliace. Chloritoid (0,4 mm) je přítomen pouze jako inkluze v granátu, zatímco staurolit je zahrnut v lemu granátu a je rozšířen i v matrixu. Linie inkluzí jsou zakřiveny směrem k lemům, což naznačuje pokračování růstu. Porfyroblasty staurolitu mají rovné inkluzní linie, které jsou v prostoru i na zakřiveném lemu. Biotit může být přeměněn v chlorit (Košuličová et al. 2007).

Metamorfnní staurolitové zóny z mé zájmové oblasti, tedy v oblasti silezika, jsou v mnou použité literatuře (Košuličová et al. 2007) popisovány z východu na západ- viz obr. 2.

#### *Staurolit-andalusitová zóna- východ*

Svory z této oblasti obsahují staurolit, granát, andalusit, muskovit, biotit, křemen, plagioklas, ilmenit a pozdní chlorit. Porfyroblasty staurolitu (až 2 cm) obsahují granát a biotit, ilmenit a křemen. Granát (až 0,3 mm) je obsažen ve staurolitu nebo se vyskytuje v matrixu. Porfyroblasty plagioklasu (0,3 mm) jsou náhodně rozděleny do matrixu nebo jsou obsaženy ve staurolitu. Chlorit roste na úkor biotitu a staurolitu. Chlorit je retrográdní fáze.

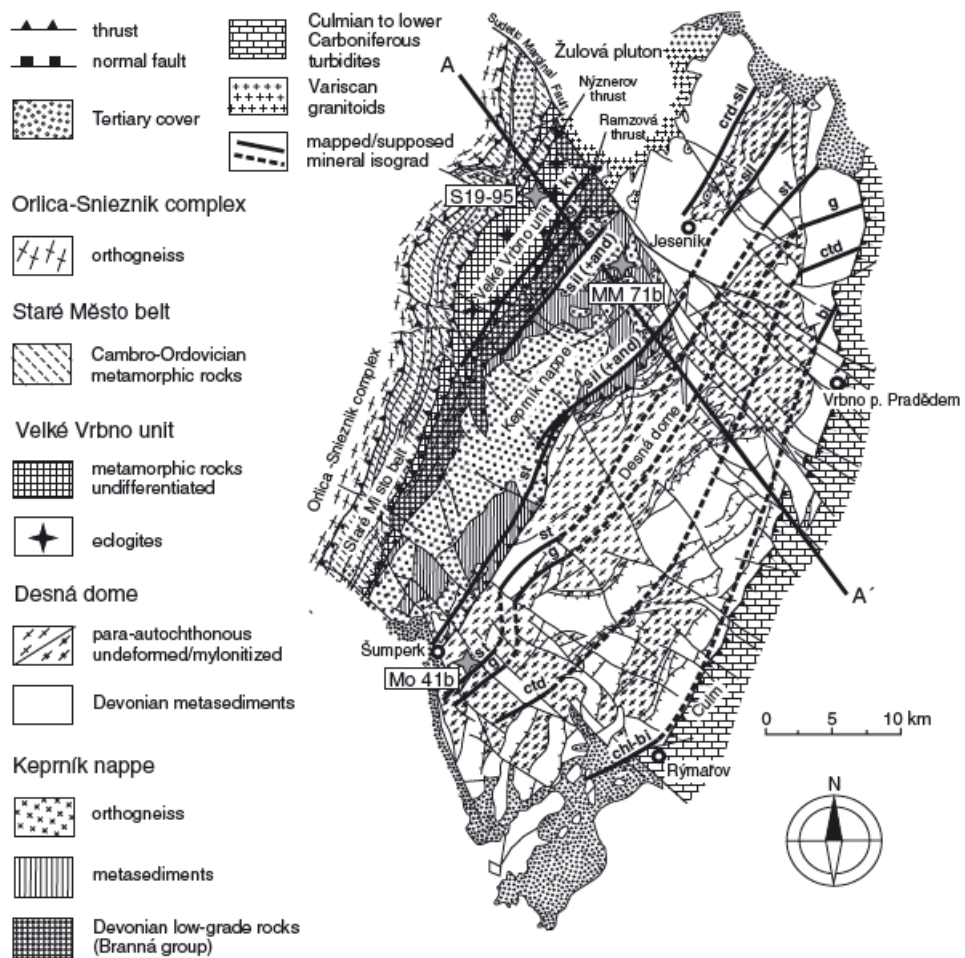
#### *Staurolit-sillimanit-andalusitová zóna*

Svory z této oblasti obsahují staurolit, +/- granát, křemen, plagioklas, muskovit, biotit, sillimanit, andalusit, ilmenit a pozdní chlorit. Porfyroblasty granátu (0,1-1 mm) obsahují lokálně orientované křemenné a ilmenitové inkluzní linie, které indikují jejich růst podle foliace. Staurolit (až 3 cm) obsahuje granát, muskovit, biotit, křemen, plagioklas a ilmenit. Křemenné a ilmenitové linie ve staurolitu jsou rovné nebo v oblouku, indikují jeho růst během foliace. Přímé inkluzní linie jsou běžné na vnější foliaci, kde se na muskovit a biotit bohaté skupiny střídají s křemen-plagioklasovými skupinami. Sillimanit se vyskytuje kolem staurolitu, plagioklasu a biotitu. Andalusit (do 5 mm)

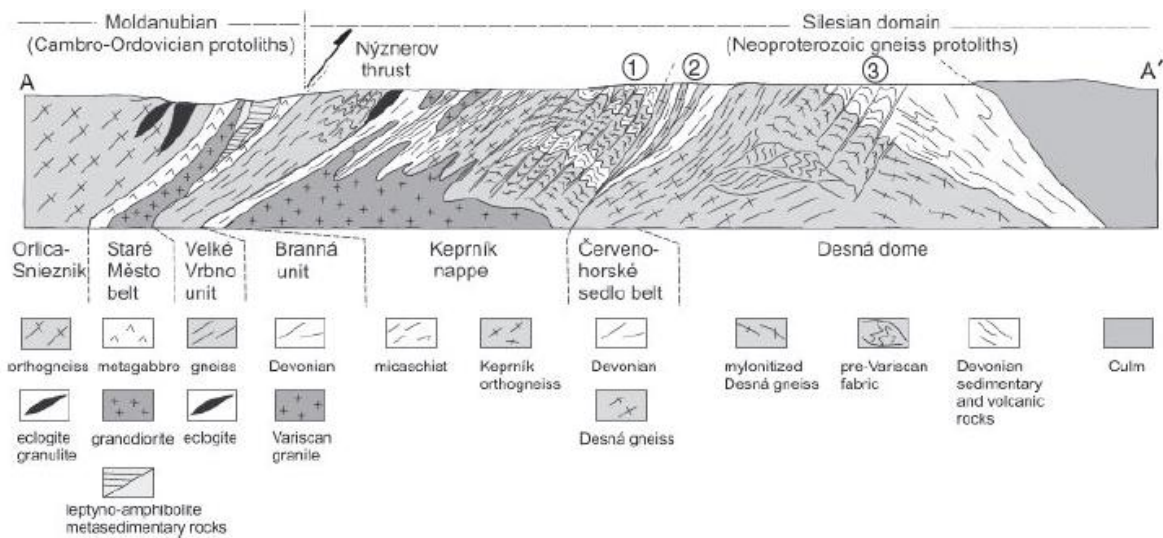
obsahuje křemen a ilmenit. Chlorit roste na kontaktu s biotitem, granátem, staurolitem a andalusitem.

*Staurolit-andalusitová zóna- západ*

Svory z této oblasti vykazují podobné vztahy růstu porfyrblastů jako staurolit-sillimanitová zóna, ale z  $poAl_2SiO_5$  obsahuje pouze andalusit.



Obr. 2. Geologická mapa silezika založená na nepublikovaných mapách České geologické služby, upravená podle J. Chába. Metamorfní zóny v severní části jsou podle Součka (1978). Umístění studovaných a diskutovaných vzorků je uvedeno. Příмка A-A' je zobrazena v obr. 3 (Košuličová et al. 2007).



Obr. 3. Geologický řez (A-A', zobrazený v obr. 2) silezikem ukazuje hlavní struktury, litologický obsah jednotlivých jednotek a hlavní tektonické hranice (upraveno podle Schulmanna & Gayera 2000, Košuličová et al. 2007).

## 4 Metamorfnní procesy

Minerální asociace, v horninách stejného chemického složení, vznikají a mění se v závislosti na PT podmínkách, deformaci a času. Po zkonstruování dráhy krystalizace minerálních asociací v hornině vidíme, že krystalizace vždy končí a začíná ve stejných PT podmínkách, ale může probíhat různými trajektoriemi. To závisí na tom, zda je metamorfóza vyvolána kontinentální kolizí (dráha A) nebo zvýšenou aktivitou magmatu (dráha B). Tyto dráhy detailně popisuje Konopásek et al. (1998)- viz obr. 4:

*Dráha A pro Al-bohatý pelit (krystalizace staurolitu)*

A-3 Staurolitová izograda: při teplotě 540 °C a tlaku 8 kbar proběhne reakce chloritoid + kyanit = **staurolit** + chlorit

Dojde k nahrazení kyanitu v hornině staurolitem. Tato reakce se projeví texturně. Staurolit často obsahuje inkluze jiných minerálů, může uzavírat inkluze kyanitu a chloritoidu. Chloritoid je částečně resorbován, protože je reaktant. Součástí asociace je tedy i chloritoid, i když není uváděn v rovnici jako produkt.

A-5 Terminální reakce chloritoidu: při teplotě 575 °C a tlaku 8 kbar proběhne reakce chloritoid = granát + chlorit + **staurolit**

Dojde k úplnému zániku chloritoidu, růstu granátu a nové generace chloritu a staurolitu. Granát a staurolit mohou obsahovat minerální uzavřeniny chloritoidu. K tomuto dojde pouze v ideálním případě. V přírodě hornina většinou obsahuje MnO a CaO, proto dojde ke krystalizaci granátu i při nižší teplotě.

A-6 Reakce granát + chlorit = **staurolit** + biotit

Dojde k resorpci granátu a další krystalizaci staurolitu a prvnímu růstu biotitu, objeví se biotitová izograda (580 °C).

*Dráha A pro Al-chudý pelit (krystalizace staurolitu)*

A-6 Staurolitová izograda: při teplotě nad 550 °C proběhne reakce granát + chlorit = **staurolit** + biotit

Objevuje se první staurolit. Granát bude částečně resorbován, chlorit zkonsumován, dojde k růstu biotitu a velkého množství staurolitu.

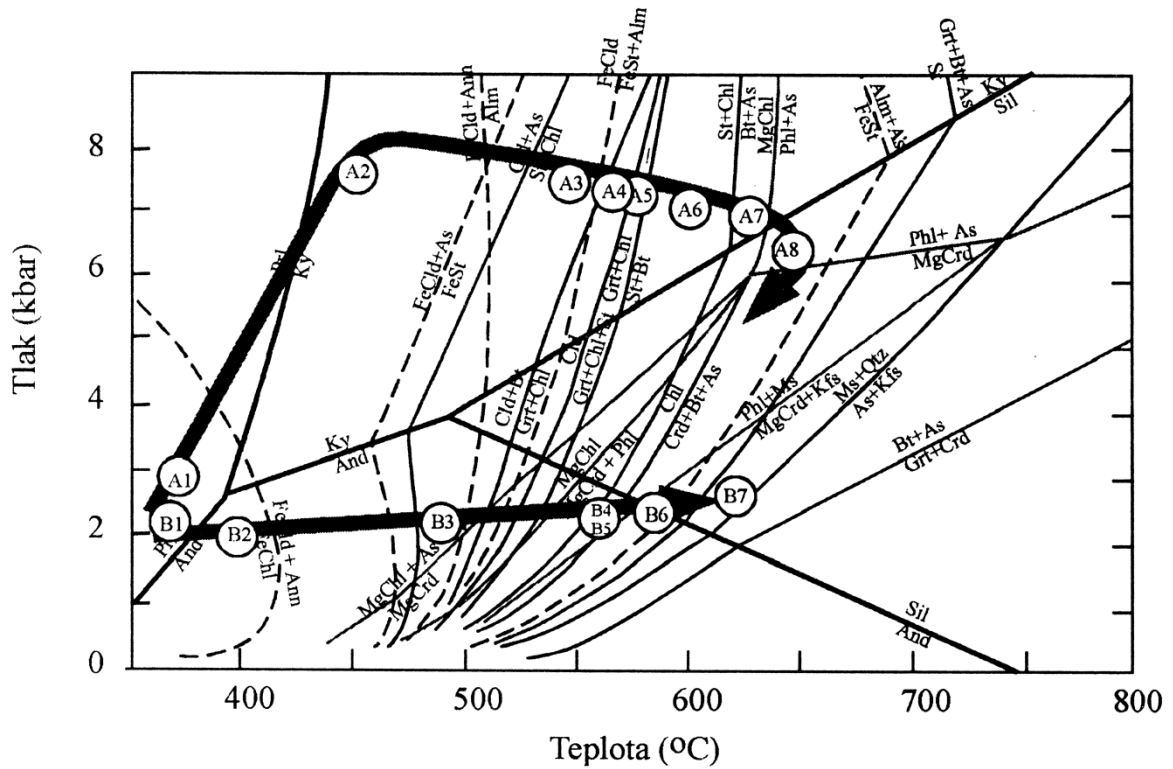
*Dráha B pro Al-bohatý pelit (krystalizace staurolitu)*

B-3 Při teplotě 475 °C a tlaku 2 kbar proběhne reakce chloritoid + andalusit = **staurolit** + chlorit

Nejdříve bude zkonsumovaný chloritoid, dále se objeví staurolit, andalusit bude resorbován a objeví se nová generace chloritu.

*Dráha B pro Al-chudý pelit (krystalizace staurolitu)*

Neproběhne žádná reakce, při které dojde ke krystalizaci staurolitu.



Obr. 4. P-T mřížka pro pelity se dvěma rozdílnými PT drahami. Dráha A je typická pro oblasti kontinentální kolize, dráha B je typická pro kontaktní metamorfózu (Konopásek et al. 1998).



## 5 Svor

Svor je metamorfovaná hornina, která vzniká progresivní metamorfózou jílových sedimentů, regionální metamorfózou středního stupně a někdy i retrográdní metamorfózou rul (Bowes 1989). Jako svor se označují středně zrnité fylosilikátové horniny, pro které je charakteristické přednostní uspořádání okem rozeznatelných, hlavně fylosilikátových, minerálů (Konopásek 1998). Důležitý znakem je břidličnatost – hornina se štěpí podél paralelních rovin, které se vytvořily právě díky paralelnímu uspořádání minerálů (Bowes et al. 1989).

Svor můžeme přirovnat k slídnaté břidlici. Většina svorů vzniká přeměnou fylitické břidlice a následně pak fylitu. Tento přechod je dán postupným zvětšováním velikosti zrn a postupnými prográdními změnami v mineralogickém složení při rostoucím stupni metamorfózy. Při dalším zvyšování stupně metamorfózy dochází k částečnému tavení, segregaci a k růstu obsahu křemen-živcové složky v hornině, a hornina tak přechází do ruly. V určitém stádiu vývoje svorových hornin dochází k formování porfyroblastů Al-silikátů jako jsou granát, kyanit, andalusit, sillimanit a staurolit (Bowes et al. 1989).

Někdy se vývoj svoru zastaví na pomezí a nelze jednoznačně určit, zda se jedná ještě o fylit na straně jedné nebo už o rulu na straně druhé. Svory se od fylitů liší nejen stavbou, ale i minerálním složením (hlavně povahou fylosilikátů), a lze je tedy s naprostou přesností rozlišit pouze pod mikroskopem. Rula je charakterizována střídáním tmavých a světlých pásků (mocnějších než 0,5 mm) minerálů, podobně jako je tomu u svoru, ale přednostně paralelně orientovaných minerálů je zde méně jak 50% (Bowes et al. 1989).

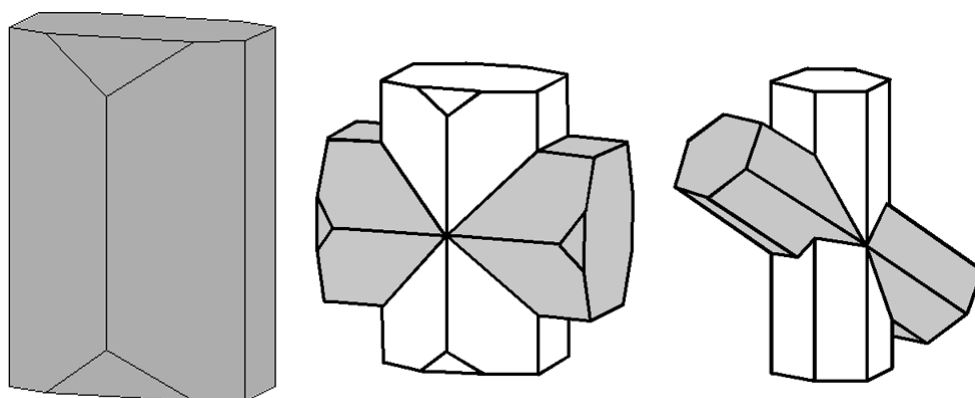
## 6 Staurolit

Staurolit je typický minerál středního stupně regionální metamorfózy jílovitých sedimentů a v některých oblastech, kde je dostatečně rozšířen, je používán jako indexový minerál metamorfních zón (Deer et al. 1997).

Jako první popisuje strukturu staurolitu Náray-Szabó v publikaci z roku 1929 (jak uvádí Deer et al. 1997), a to jako rombický (C<sub>2</sub>mm) celek obsahující 48 kyslíků v přibližně kubickém uspořádání. Paralelně k nim se nachází kyanitové vrstvy, tj. řetězcy Al oktaedrů rovnoběžné se sítí tvořené tetraedry SiO<sub>4</sub> a Al oktaedry. Opakující se vzdálenost řetězců oktaedrů definuje osu *c* ve staurolitu i kyanitu.

V prvním modelu staurolitové struktury se střídají kyanitové vrstvy s vrstvami Fe(OH)<sub>2</sub>, ale chemická analýza, kterou provedl Juurinen, a která vyšla v publikaci z roku 1956 (jak uvádí Deer et al. 1997), ukazuje, že v minerálním složení je více hliníku a železa a méně vodíku než by z toho vyplávalo. Hurst et al. v publikaci z roku 1956 (jak uvádí Deer et al. 1997) opatřil rentgenový a optický důkaz o pseudo-rombické monoklinické symetrii (C<sub>2</sub>/m) a Náray-Szabó a Sasvári v publikaci z roku 1958 (jak uvádí Deer et al. 1997) předložili novou strukturu s dalšími dvěma hliníkovými ionty v oktaedrické síti. V této struktuře se 8 kyanitových vrstev Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> střídá s vrstvami Al<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub>O<sub>8</sub>H<sub>2</sub> a celkově vytváří vzorec H<sub>2</sub>Fe<sub>4</sub><sup>2+</sup>Al<sub>18</sub>Si<sub>8</sub>O<sub>48</sub> (Deer et al. 1997).

Krystaly obvykle dvojčatně srůstají podle [032] (tvar kříže) a [232]- viz obr. 5.



Obr. 5. Idealizovaný tvar krystalu staurolitu a dvojčata podle [032] a [232] (URL2).

V metamorfitech tvoří porfyroblasty, někdy velké až několik centimetrů- viz obr. 6.



Obr. 6. Porfyroblasty (1cm) staurolitu ve svoru na lokalitě SV-15: Široký Brod. Porfyroblasty vyvětrávají na foliačních plochách, křížový srůst podle [232].

Problémy spojené s jeho krystalochemií zabraňují jeho efektivnímu využití v petrogenetice a způsobují odlišné výsledky v experimentálních a terénních studiích (jak uvádí např. Hawthorne et al. 1993).

Složení staurolitu je velmi komplikované (Hawthorne et al. 1993). Ve struktuře je sedm oktaedrických pozic, na které se váže hlavně Al, Mg a dvě tetraedrické pozice, na které se vážou Si, Al, Fe, Zn, Co a pravděpodobně Ti, Cr, V. Dalšími klíčovými prvky jsou H a Li. Dřívější snahy o pochopení chemizmu staurolitu byly více méně marné vzhledem k neúplným informacím o jeho složení (např. problémy se stanovením H a Li). Hlavní problém vzniká při snaze o umístění pozic jednotlivých prvků v krystalové struktuře. Ačkoli to není v zásadě o nic složitější než u jiných horninotvorných silikátů, problém se zvětšuje s faktem, že u staurolitu, na rozdíl od ostatních křemičitanů, často neexistují úplné údaje o jeho chemickém složení. V důsledku toho je odezva struktury na kompoziční varianty velmi jemná a je obtížné přesvědčivě odvodit umístění pozic prvků obvyklými metodami rentgenových vln, neutronového rozptylu nebo absorpce pomocí

spektrometrie (Hawthorne et al. 1993). Nedostatečné informace o pozicích jednotlivých prvků znamenají, že není možno odvodit termodynamické údaje a vytvořit spolehlivé modely pro termodynamické zpracování dat. V posledním desetiletí 20. století bylo dosaženo výrazného pokroku v oblasti chemické charakteristiky staurolitu a jeho struktury (Hawthorne 1993 a další).

Stav před cca 20 lety hodnotí Hawthorne et al. (1993) slovy: „V dnešní době používaná klasifikace pozic prvků ve staurolitu není dostačující. Pozice jsou označeny symboly prvků, což je nepohodlné, protože při nahrazování různých typů se kationty mohou vyskytnout na tom samém místě. Situace se stává absurdní, když na „místě Fe“ není Fe vůbec a místo něj je tam Zn nebo Co.“

Daleko lepší, než označení pozic podle prvku, se zdá být označení pozic podle návrhu Hawthorna (1993). Ten označil tetraedrickou pozici písmenem T, oktaedrickou pozici písmenem M. Anionty umístění si udržely staré označení a jsou slučitelné s novým systémem označení kationtů. Pozice vodíku je označena písmenem H, pozice kyslíku písmenem O. V jednom se ale následující označení liší od předchozích studií. Tyto změny jsou následující: kyslík O(1A) je donorem vodíku na pozici H(1A) a H(2A), a kyslík O(1B) je donorem pro vodík na pozici H(1B) a H(2B). Označení A a B pro atomy bylo zachováno, protože je vhodné zvážit párování atomů, společné vazby a pozice jsou pak označeny pouze číslem atomu [např. M(1)]. Dále sem patří označení Z(3), které nenalezneme v předchozích studiích. Vyskytuje se v oxidovaném staurolitu a Hawthorne et al. (1993) je přidal pro úplnost.

Struktura pozic staurolitu je tradičně popisována jako vrstvy kyanitu  $[Al_2SiO_5]$  a Fe-Al oxid-hydroxidu. Obecný předpoklad je, že hlavní substituce ve struktuře se vyskytují v oxid-hydroxidové vrstvě, vrstvy kyanitu jsou stabilnější. Staurolit má však překvapivě malou variabilitu složení. Nejnovější vzorec je typu:  $(Fe, Mg, Zn, Co)_{3-4}(Al, Fe)_{17-18}(Si, Al)_8O_{48}H_{3-4}$ ; kationty, které jsou v závorkách, nemusí být ve vzorci nutně přítomny (Hawthorne 1993).

Jak vyplývá z diskuze Hawthorna et al. (1993), navrhovaný obsah vodíku ve staurolitu je variabilní, od 2 apfu do 8 apfu. Výsledky většiny analýz naznačují, že obsah vodíku se pohybuje mezi 2-4 apfu. Koncentraci je ale velmi obtížné stanovit, protože staurolit je přírodní žáruvzdorný nerost s přítomností téměř všudypřítomných příměsí a různých forem vodíku ( $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ).

## 7 Seznam studovaných lokalit

V rámci terénní práce jsem navštívila několik lokalit v rámci silezika a odebrala na nich vzorky. Vzorky se skládaly pouze ze svorů s obsahem, nebo alespoň s předpokladem, staurolitu. Vzorky byly řádně označeny, místa odběru zběžně popsány a lokalizovány na mapě.

Z jednadvaceti zaznačených lokalit jsem po bližším zkoumání použila vzorky pouze patnácti z nich, protože splňovaly podmínky pro další postup (obsahovaly staurolit). Umístění lokalit je zobrazeno v obr. 12.

### 7.1 Popis jednotlivých lokalit:

- SV-1: Dolní Studénky (A)
  - Vrbenská skupina, úvozová cesta, deluvium, staurolitický svor, 470 m na v. od kóty 335, 1400 m na ssv. od kóty Dražník
  - Lokalita se nachází pár stovek metrů po vstupu do lesa na lesní vozové cestě v mírném svahu. Jedná se o úlomky staurolitického svoru v deluviu.
- SV-2: Dolní Studénky (B)
  - Vrbenská skupina, výchoz v úvozové cestě (6 x 2 m), staurolitický svor obklopený kvarcitem, 530 m sv. od kóty Dražník , 770 m v. od kóty 410
  - Lokalita se nachází na východ přes hřeben od lokality SV-1. Jedná se o výchoz ve vozové lesní cestě o rozměrech 6 x 2 m. Odkryv ukazuje polohu staurolitického svoru v kvarcitu- viz obr. 7.



Obr. 7. Výchoz ve vozové lesní cestě (SV-2), 6 x 2 m, kvarcít, který obklopuje staurolitický svor.

- SV-5: Vernířovice (C)
  - Skupina Červenohorského sedla, blok v deluviu (70 x 120 cm), staurolity o velikosti až 22 mm, staurolit vyvětrává na foliačních plochách, staurolitický svor s biotitem, 430 m v. od kóty 740, 580 m jjz. od kóty Rudná Hora
  - Lokalita se nachází ve svahu pod lesní cestou. Tvoří ji bloky, největší o velikosti 70 x 120 cm, staurolitického svoru s biotitem v deluviu. Porfyroblasty staurolitu mají velikost až 22 mm, netvoří křížové srůsty a vyvětrávají na foliačních plochách- viz obr. 8.



Obr. 8. Blok v deluviu (SV-5), 70 x 120 cm, staurolitický svor s biotitem a porfyroblasty staurolitu o velikosti až 22 mm.

- SV-6: Loučná nad Desnou (D)
  - Skupina Branné, skalní výchoz (30 x 6 m), staurolity o velikosti 1 cm, vytváří křížové srůsty, staurolitický svor, 1440 m zjz. od kóty Suchá Hora, 1330 m sz. od kóty 737, na Knížecí cestě
  - Lokalita se nachází po pravé straně Knížecí cesty směrem na Přemyslov. Menší část výchozu je vidět přímo ze silnice, větší část výchozu je zakryta stromy výše po svahu. Skalní výchoz je tvořen staurolitickým svorem a jeho velikost je 30 x 6 m. Porfyroblasty staurolitu dosahují velikosti až 10 mm a tvoří křížové srůsty- viz obr. 9.



Obr. 9. Skalní výchoz (SV-6), 30 x 6 m, starolitický svor s porfyroblasty staurolitu až 1 cm, vlevo nahoře tvoří křížový srůst.

- SV-7: Přemyslov (E)
  - Skupina Branné, blok v deluviu (60 x 40 x 15 cm), staurolitický svor, 1370 m z. od kóty 737, 970 m jjv. od kóty 668,6
  - Lokalita se nachází napravo od Knížecí cesty. Tvoří ji blok staurolitického svoru o velikosti 60 x 40 x 15cm v deluviu. Porfyroblasty staurolitu nejsou výrazné ani netvoří křížové srůsty.
- SV-10: Česká Ves (F)
  - Skupina Branné (?), deluvium, staurolitický svor, 580 m v. od kóty 845, 480 m s. od kóty Bílé Skály

- Lokalita se nachází podél nepoužívané lesní cesty, která odbočuje z hlavní cesty napravo do svahu. Jedná se o úlomky staurolitického svoru v deluviu.
- SV-11: Široký Brod (G)
  - Skupina Branné (?), deluvium, staurolitický svor, 200 m sz. od kóty Sporný Vrch, 800 m v. od kóty 508
  - Lokalitu tvoří úlomky staurolitického svoru v deluviu podél lesní cesty.
- SV-12: Široký Brod (H)
  - Skupina Branné (?), deluvium, staurolitický svor, 220 m jv. od kóty 719, 230 m sz. od kóty Sporný Vrch
  - Lokalitu tvoří úlomky staurolitického svoru v deluviu na křižovatce lesních cest.
- SV-14: Široký Brod (I)
  - Skupina Branné (?), deluvium, staurolitický svor, granátický svor, amfibolitická rula, amfibolit, kvarcit, žilný křemen, 780 m sv. od kóty 508, 520 m ssz. od kóty Sporný Vrch
  - Lokalitu tvoří úlomky staurolitického svoru společně s granátickým svorem, amfibolitickou rulou, amfibolitem, kvarcitem a žilným křemenem v deluviu podél lesní pěšiny.
- SV-15: Široký Brod (J)
  - Skupina Branné (?), eluvium, staurolitický svor, křížové srostlice o velikosti až 1cm, 440 m ssz. od kóty Sporný vrch, 25 m v. od kóty 719
  - Lokalitu tvoří bloky staurolitického svoru v eluviu. Porfyroblasty staurolitu jsou až 10 mm velké a tvoří křížové srůsty- viz obr. 10.

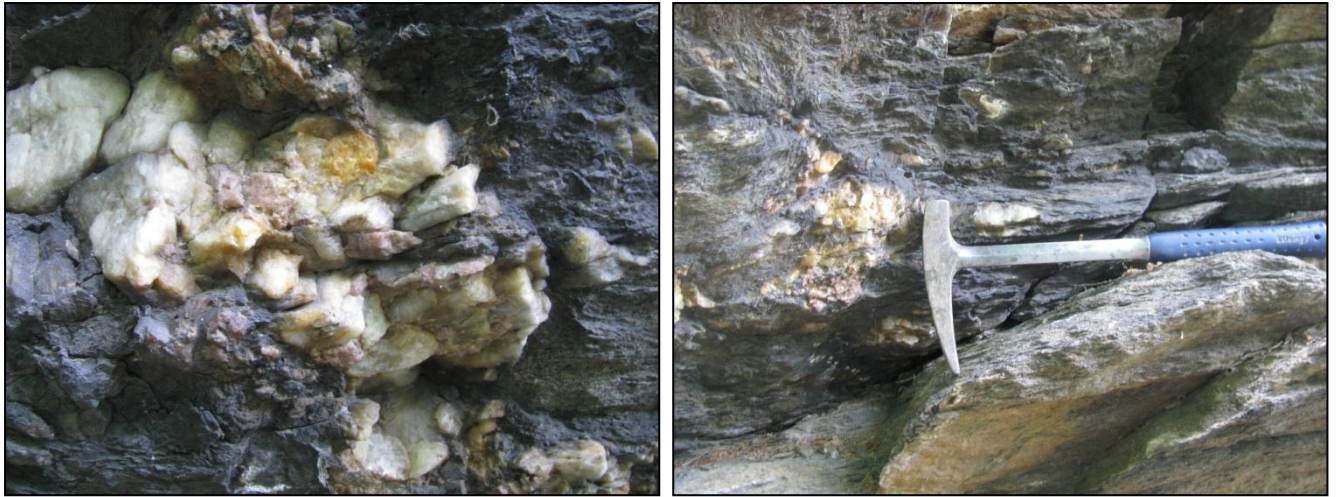




Obr. 10. Bloky v eluviu (SV-15), staurolitický svor, porfyroblasty staurolitu tvoří křížové srůsty až 1 cm.

- SV-17: Branná (K)

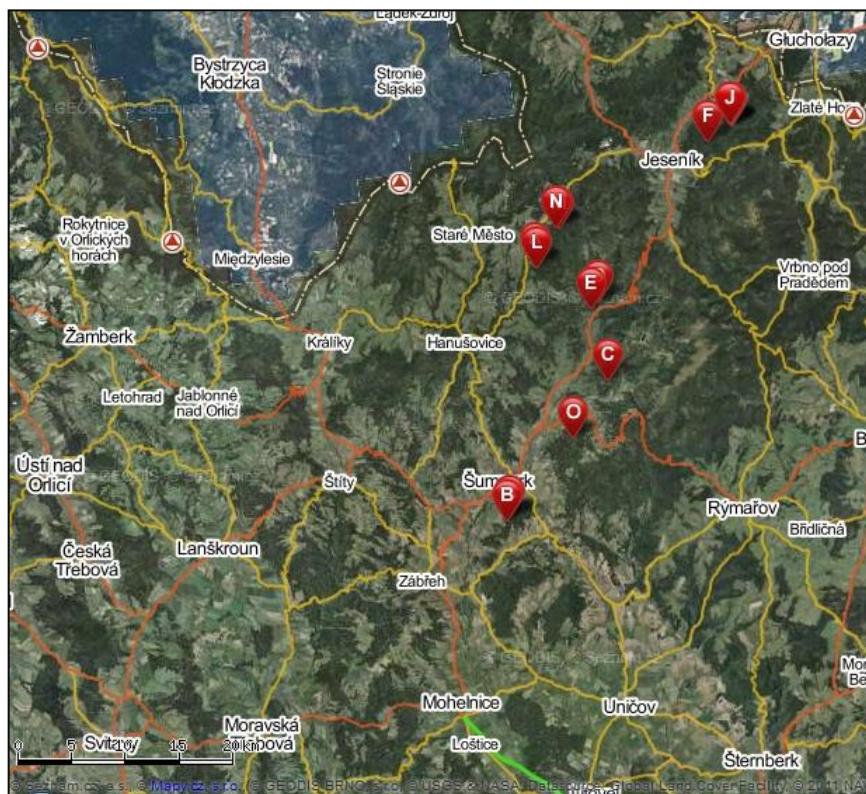
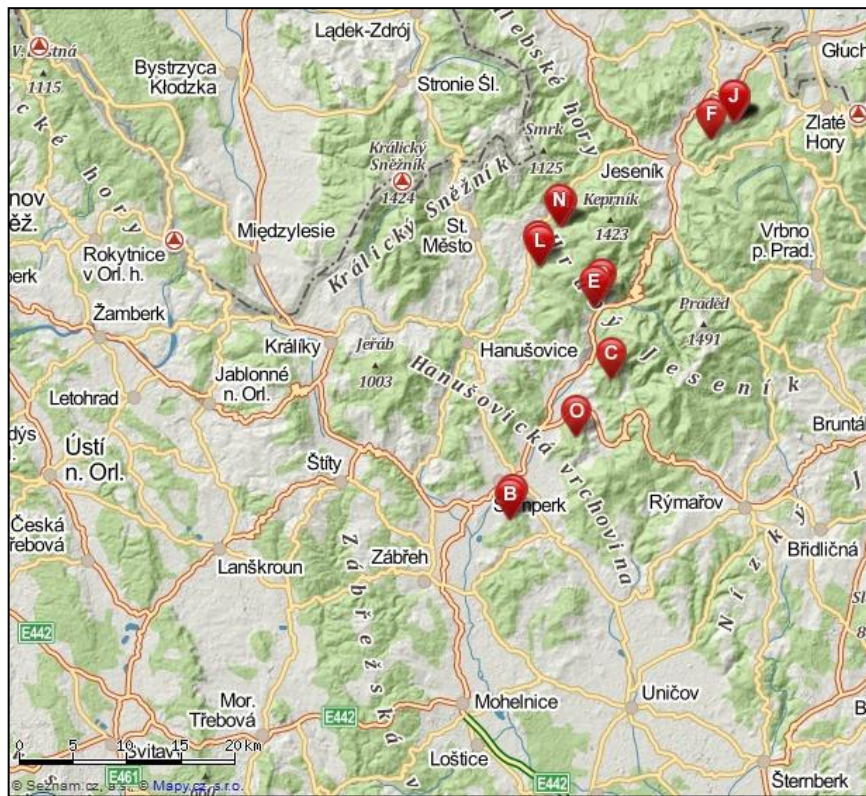
- Skupina Branné, skalní výchoz (10 x 4 m), sekreční křemenné žíly s andalusitem, průběh s foliací, mocnost do 20 cm, staurolitický svor, 180 m s. od Pasáka (PP) při turistické trase
- Lokalita se nachází po pravé straně turistické trasy 180 m severně od Pasáka (PP). Není vidět ze stezky, musí se sejít mimo trasu. Jedná se o skalní výchoz 10 x 4 m. Výchoz je tvořen staurolitickým svorem, který obsahuje ložní křemenné žíly a čočky s andalusitem o mocnosti až 20 cm- viz obr. 11.



Obr. 11. Skalní výchoz (SV-17), 10 x 4 m, staurolitický svor s křemennými žilami obsahujícími andalusit (nahore).

- SV-18: Branná (L)
  - Skupina Branné, deluvium, staurolitický svor, 480 m j. od kóty 757, 680 m vjv. od kóty 639
  - Lokalita se nachází v lesním porostu ve svahu, nad lokalitou se rozprostírá louka. Nejlepší přístup je po vrstevnici. Jedná se o bloky staurolitického svoru v deluviu. Porfyroblasty staurolitu jsou v tomhle případě nepatrné a netvoří křížové vyrostlice.
- SV-19: Ostružná (M)
  - Skupina Branné, deluvium, staurolitický svor, 370 m jjz. od kóty 824, 270 m jv. od kóty 778

- Lokalita se nachází podél lesní vozové cesty. Jedná se o úlomky staurolitického svoru. Porfyroblasty staurolitu zde dosahují až 30 mm. Nejsou patrné žádné křížové srůsty.
- SV-20: Ostružná (N)
  - Skupina Branné, skalní výchoz (25 x 6 m), staurolitický svor, sekreční křemen, 450 m jz. od kóty 824, 710 m v. od kóty Farský vrch
  - Lokalita se nachází napravo lesní vozové cesty. Jedná se o skalní výchoz o velikosti 25 x 6 m, který tvoří staurolitický svor.
- SV-21: Petrov nad Desnou (O)
  - Skupina Červenohorského sedla, deluvium, staurolitický svor, 425 m ssz. od kóty 778, 450 m jv. od kóty 632
  - Lokalita se nachází po obou stranách asfaltové cesty, která vede pod Petrovským vrchem. Jedná se o skalní výchoz, který byl narušen stavbou silnice. Výchoz je tvořen staurolitickým svorem. Porfyroblasty staurolitu dosahují velikosti až 1,5 cm.



Obr. 12. Nahoře: turistická mapa s umístěním všech mnou studovaných lokalit. Dole: letecká mapa s umístěním všech mnou studovaných lokalit (URL3). Značení lokalit (A-O) je uvedeno v závorce v popisu jednotlivých lokalit. Podrobnější mapy lokalit uvádím v příloze.

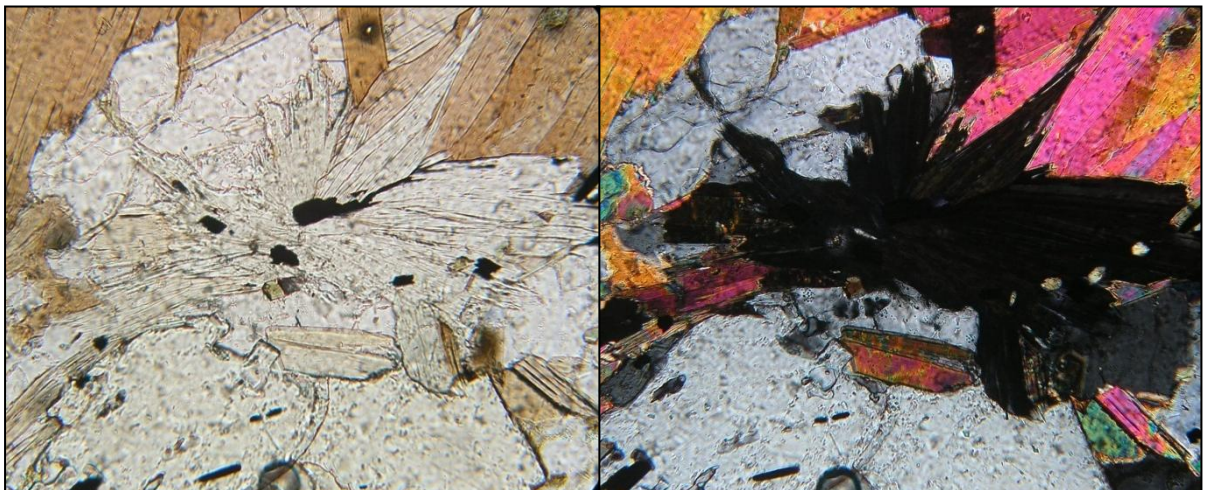
## 8 Mineralogická charakteristika svorů

Všech vybraných patnáct výbrusů ze staurolitických svorů z mnou studovaných lokalit jsem vyhodnotila pomocí polarizačního mikroskopu a podrobně popsala jednotlivé minerály. Hlavní poznatky z mikroskopického studia jsou shrnuty v následujících odstavcích.

Ve všech vzorcích je v podstatném množství přítomen křemen. Tvoří drobná zrna, která jsou xenomorfně omezena a mají izometrický tvar. Zrna obsahují fluidní inkluze a také uzavřeniny minerálů, většinou drobné šupinky muskovitu nebo biotitu.

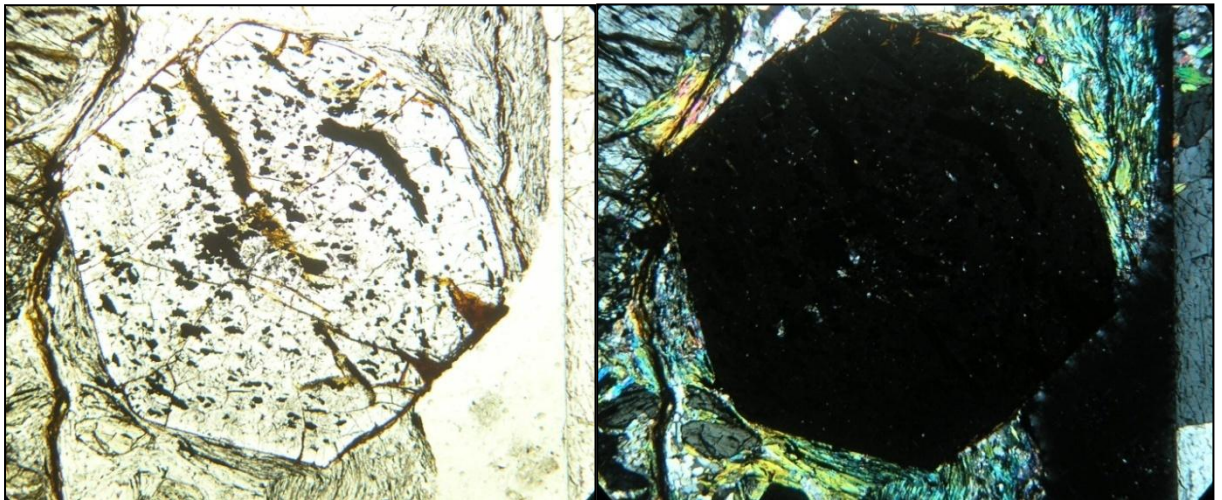
V podstatném množství jsou ve studovaných svorech přítomny slídy, zastoupené muskovitem nebo biotitem v různém poměru (ve vzorku SV-21 je ze slíd přítomen pouze muskovit). Individua muskovitu jsou xenomorfně, někdy hypautomorfně omezena, mají lištovité průřezy. Biotit je xenomorfně nebo hypautomorfně omezen, tvoří podlouhlé šupinky různé velikosti. Je výrazně pleochroický v odstínech hnědé a hnědozelené. Neobsahuje žádné uzavřeniny akcesorických minerálů.

Ve většině vzorků se nachází chlorit (SV-2, -5, -6, -7, -11, -14, -18, -19, -20, -21) nebo granát (SV-2, -6, -7, -10, -12, -14, -17, -19, -20). Chlorit se objevuje v křemenných páscích nebo jako reliktní minerál společně s biotitem na foliačních plochách. Drobné šupinky chloritu mohou vytvářet i paprscité agregáty - viz obr. 13.



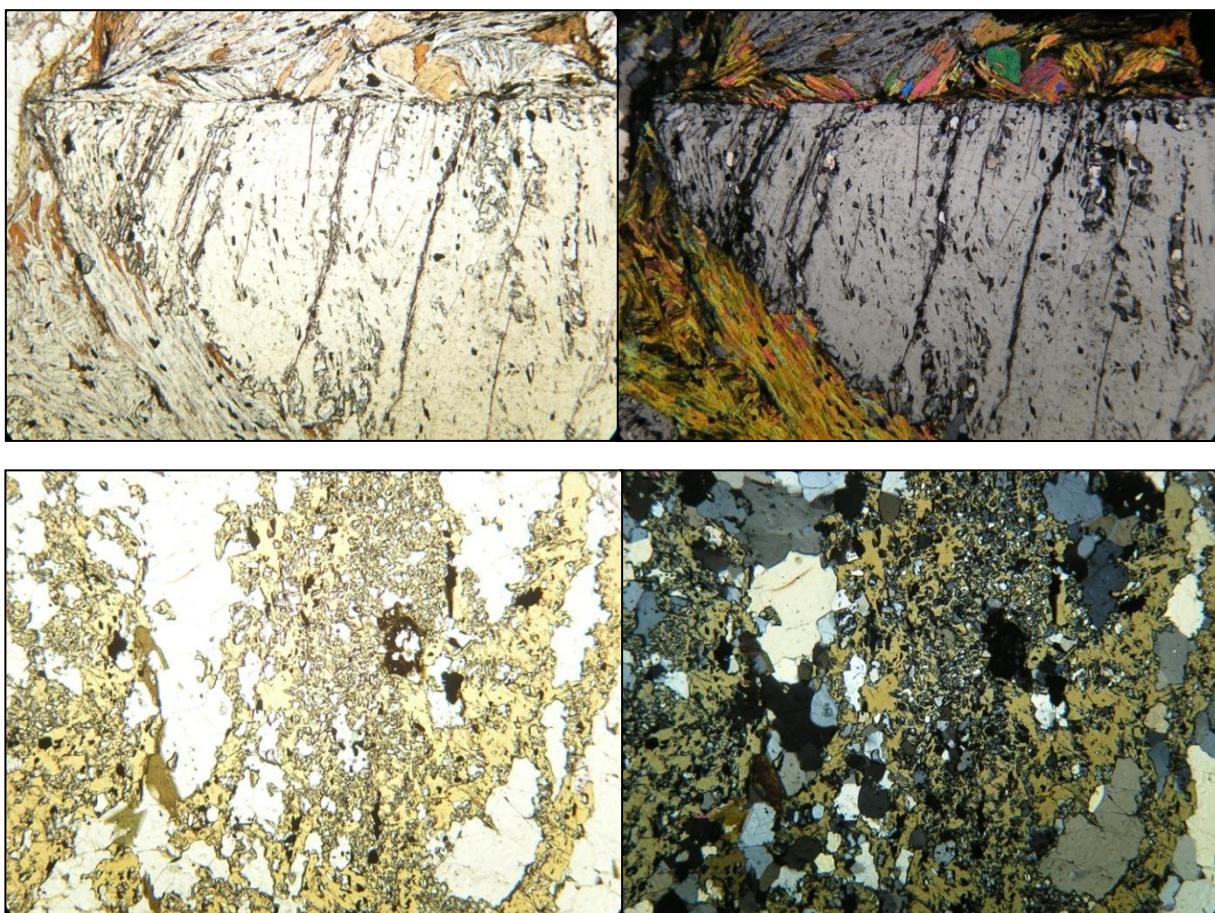
Obr. 13. Šupinky chloritu tvořící paprscitý agregát, šířka snímku je 1,6 mm, vzorek SV-10: Česká Ves, (vlevo režim PPL, vpravo režim XPL), další minerály: křemen, muskovit, biotit, zirkon.

Je pleochroický v odstínech světle zelené. V XPL je pro něj charakteristická anomální hnědá nebo modrá barva. Místy lze pozorovat chloritizaci biotitu podél štěpných trhlin. Granáty tvoří zrna o velikosti až 5,5 mm, v některých případech jsou rozpadlá na jednotlivé fragmenty. Jsou většinou hypautomorfně, ojediněle automorfně omezena a jejich průřezy často mají tvar šestiúhelníku- viz obr. 14. Na trhlinách je patrná chloritizace. Zrna granátu obsahují uzavřeniny křemene, rutilu a opakních minerálů (hlavně ilmenit).



Obr. 14. Automorfně omezené zrno granátu s uzavřeninami ilmenitu, šířka snímku je 4 mm, vzorek SV-2: Dolní Studénky, další minerály: křemen, muskovit, staurolit, zirkon.

Staurolit se nachází v každém výbrusu. Většinou tvoří hypautomorfně omezená zrna, průřezy mají často tvar kosočtverce (SV-6, SV-7, SV-19, SV-20), nebo xenomorfně omezená zrna, na kterých je patrné, že byla tektonicky porušena („rozlámana“) na jednotlivé fragmenty (SV-15)- viz obr. 15. Individua staurolitu mohou mít velikost až 6 mm (ve výbrusech). Je pleochroický v odstínech žluté a žlutohnědé (okrové) barvy. Staurolit obsahuje uzavřeniny křemene, muskovitu biotitu, ilmenitu, rutilu a pyritu.

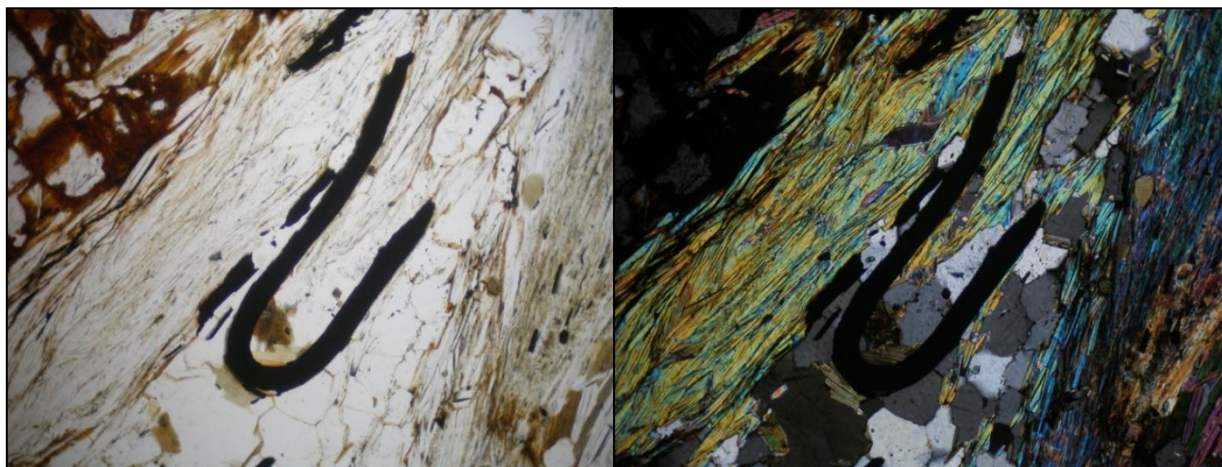


Obr. 15. Nahoře: automorfně omezené zrno staurolitu s prasklinami a uzavřeními křemene a ilmenitu, šířka snímku je 4 mm, vzorek SV-20: Ostružná, další minerály: křemen, muskovit, biotit. Dole: xenomorfně omezené zrno staurolitu, šířka snímku je 4 mm, vzorek SV-12: Široký Brod, další minerály: křemen, muskovit, chloritizovaný biotit, ilmenit.

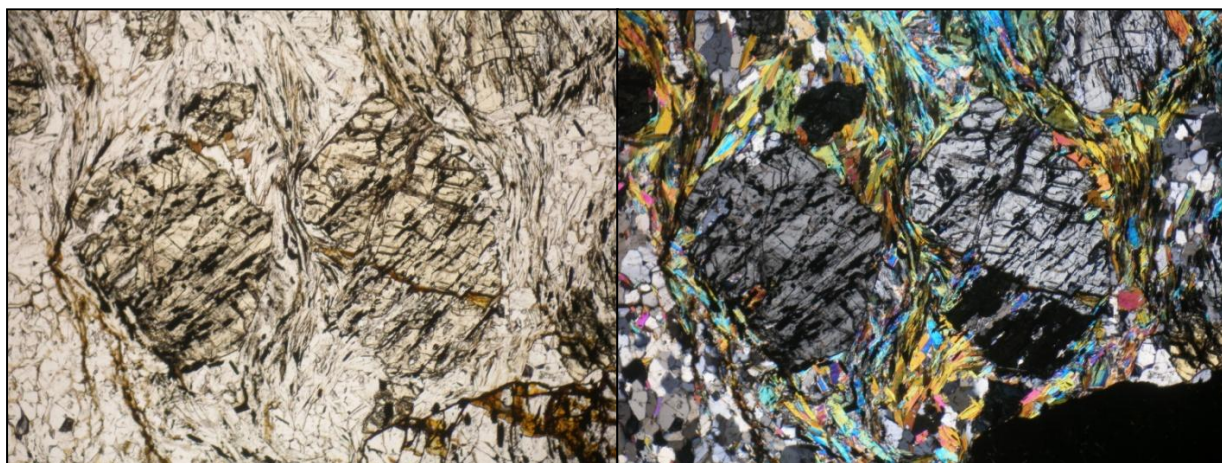
Vzorek SV-21 obsahuje navíc i plagioklas a kyanit. Plagioklas tvoří xenomorfně omezená izometrická zrna. Jsou na něm patrné, pro něj typické, lamely. Lamely jsou nestejně široké a málo četné. Pomocí metody symetrické zóny jsem zjistila bazicitu přítomného plagioklasu. Výsledky ukazují hodnotu  $An_{12}$  nebo  $An_{30}$ , tedy se jedná o oligoklas, pravděpodobnější je hodnota  $An_{12}$ , což odpovídá i výsledkům provedených EDX analýz (data vedoucího BP). Na okrajích zrn je vidět sericitizaci. Kyanit tvoří hypautomorfně omezená zrna ve tvaru deformovaných tabulek.

Z opakních minerálů se běžně ve vzorcích vyskytuje ilmenit. Tvoří lištovité průřezy o velikosti do 0,2 mm, hypautomorfně omezené tabulky nebo izometrická xenomorfní zrna o velikosti od 0,02 do 1,5 mm (SV-12)- viz obr. 16. Ilmenit je nejčastěji uzavřen

ve staurolitu, kde jsou jeho lišty seskupeny do nesouvislých linií (SV-2)- viz obr. 17, nebo v granátu.



Obr. 16. Tabulka ilmenitu deformovaná při metamorfóze, šířka snímku je 1,6 mm, vzorek SV-12: Široký Brod (vlevo v režimu PPL, vpravo v režimu XPL), další minerály: křemen, muskovit, biotit, staurolit.



Obr. 17. Hypautomorfně omezená zrna staurolitu obsahující tabulky ilmenitu v podobě uzavřenin, které jsou uspořádány do linií, šířka snímku je 4 mm, vzorek SV-2: Dolní Studénky, (vlevo v režimu PPL, vpravo v režimu XPL), další minerály: křemen, muskovit, biotit, granát, ilmenit.

Další z méně často se vyskytujících opakních minerálů je pyrit (SV-9, SV-10, SV-15). Pyrit tvoří automorfně omezená individua ve tvaru hexaedru (SV-9) nebo častější xenomorfně omezená izometrická zrna. Vyskytuje se v podobě uzavřenin ve staurolitu (protáhlé izometrické zrno o velikosti až 0,05mm- SV-10). Dalším z opakních minerálů je magnetit, tvořící automorfně omezená zrna, a ojediněle i hematit, který se vyskytuje společně s ilmenitem (SV-5).



Běžnou akcesorií studovaných svorů je rutil (SV-1, SV-2, SV-15). Rutil se vyskytuje v podobě xenomorfně omezených izometrických zrn, často jako uzavřeniny ve staurolitu nebo granátu. Další běžnou akcesorií je zirkon (SV-2, SV-10), který se objevuje v podobě okrouhlých izometrických zrn. Většinou jako uzavřenina v biotitu, kde je patrný pro něj charakteristický pleochroický dvůrek, nebo v muskovitu.

Přítomnost dalších akcesorických minerálů nelze vyloučit. Pro mou práci je hlavním minerálem staurolit, proto pokud se ve výbruse vyskytoval, nebyl důvod ke zhotovení dalších výbrusů z jiné části makrovzorku, v nichž by bylo možno další akcesorie objevit.

Studované svory lze rozdělit do dvou skupin podle struktury a následně do dalších podskupin podle vzájemného poměru slíd zastoupených muskovitem a biotitem:

1) Lepidogranoblastická struktura:

a) muskovitický svor: SV-21

b) biotit-muskovitický svor: SV-6, SV-10, SV-12, SV-14, SV-15, SV-18,  
SV-20

c) muskovit-biotitický svor: SV-2, SV-7, SV-17, SV-19

2) Granolepidoblastická struktura:

a) muskovit-biotitický svor: SV-1, SV-5, SV-11

## 9 Vyhodnocení WDX analýz

Na výbrusech ze staurolitických svorů z mnou studovaných lokalit byly provedeny WDX analýzy, jimiž byl sledován chemismus staurolitu. Díky tomu jsem získala přesné údaje o chemizmu jednotlivých staurolitů (velmi přesné obsahy sledovaných prvků), ty jsem následně přepočítala na 11 atomů kyslíků, a tím jsem zjistila proporce mezi jednotlivými prvky. Výsledky analýz a jejich přepočty jsou uvedeny v tabulce 1 a 2.

Výsledky jsem vyjádřila pomocí Al-Mg-Fe diagramů (do nichž jsou vynášeny atomární kvocienty). Z výsledků analýz vyplývá, že rozdíly v rámci jednoho sledovaného prvku jsou minimální (viz data v tab. 1 a 2). Proto jsem pro potřeby diagramu hliník podělila deseti a hořčík deseti vynásobila. Drobné rozdíly mezi jednotlivými staurolity jsou tak v diagramech lépe patrné.

V prvním digramu (viz obr. 18) jsem srovnala výsledky analýz staurolitu z mnou zkoumaných lokalit. Z diagramu je zřejmé, že i když staurolit pochází z různých lokalit silezika, jeho chemismus se v podstatě neliší. Jedinou výjimkou může být vzorek z lokality Vernířovice (SV-5), kde byl ve staurolitu stanoven vyšší obsah hořčíku.

V následujících diagramech na obr. 19 až 22 jsem porovnávala své výsledky s výsledky dostupnými v literatuře. V diagramu na obr. 19 jsem použila výsledky uváděné Košuličovou (2002) z lokalit Anenská studánka, Holubáč, Vyhlídka, Chlupěňčik, Vozka a Obří skály. Ani v tomto případě se údaje nijak zásadně neliší, alespoň pokud jde o poměr Al, Mg a Fe. V diagramu na obr. 20 jsem ke srovnání použila výsledky, které publikovali Nepejchal a Zimák (2004) z lokality Franziskazeche (z železoruďného ložiska, z hornin složených ze staurolitu, sillimanitu, korundu, magnetitu, muskovitu, křemene a dalších minerálů). Výsledky analýz z této lokality ukazují větší množství hořčíku v chemizmu staurolitu, nelze ale říct, zda tu existuje nějaký vztah nebo podobnost s lokalitou Vernířovice. V diagramu na obr. 21 srovnávám své výsledky s údaji publikovanými Zimákem (2002) z lokalit Anenský pramen a Holubáč. Ani v tomto případě se hodnoty získané EDX a WDX analýzami zásadně neliší. V diagramu na obr. 22 jsem ke srovnání použila hodnoty, uváděné Brychtou (2007) a Košuličovou (2002), z lokality Obří skály. V případě Košuličové (2002) jde o staurolitické svory na výchozu označovaném jako Obří skály; Brychtou (2007) studované staurolity pocházejí z horniny charakteru skarnu (viz Vávra et al. 1999), který byl objeven v prostředí staurolitických svorů (a lze předpokládat,

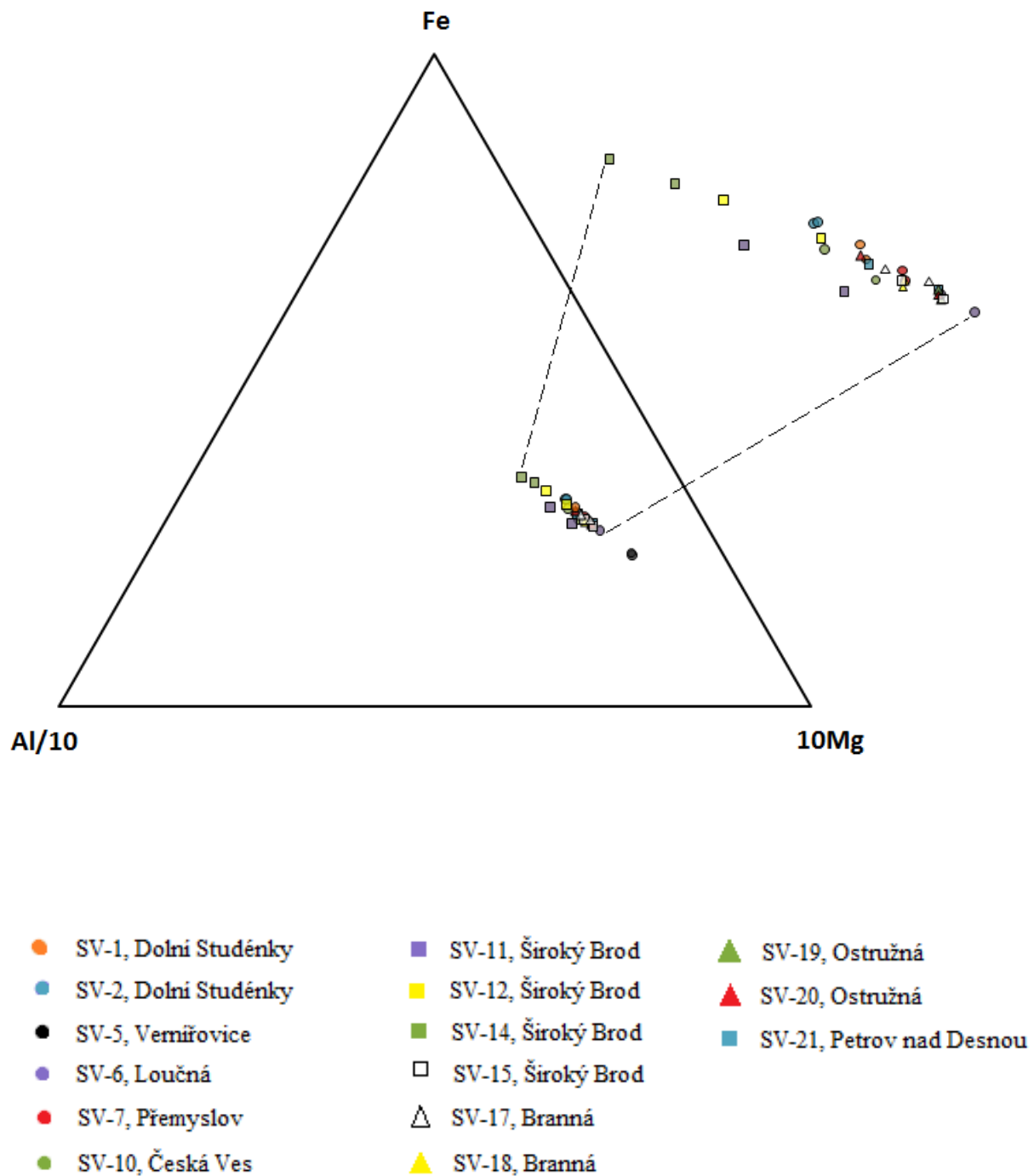
že s nimi byl shodně metamorfovaný). I tady se hodnoty liší pouze zcela nepatrně, tedy je nemožné určit nějakou závislost.

vzorek	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	F	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	BaO	Cl	Total
SV-1a	0,00	28,07	53,71	0,01	0,00	0,45	14,51	0,05	0,03	0,01	0,13	0,11	1,38	0,02	0,00	98,49
SV-1b	0,01	28,01	53,74	0,01	0,00	0,46	13,95	0,01	0,03	0,12	0,10	0,09	1,42	0,00	0,00	97,95
SV-2a	0,01	27,63	53,70	0,02	0,00	0,52	14,37	0,07	0,05	0,08	0,07	0,04	1,27	0,00	0,00	97,81
SV-2b	0,01	28,24	53,66	0,01	0,03	0,47	14,42	0,07	0,04	0,09	0,04	0,03	1,28	0,00	0,01	98,40
SV-5a	0,00	27,82	52,73	0,01	0,01	0,62	14,28	0,04	0,07	0,13	0,41	0,05	2,21	0,00	0,01	98,37
SV-5b	0,00	27,76	52,38	0,01	0,00	0,58	14,28	0,04	0,06	0,18	0,44	0,05	2,18	0,00	0,00	97,95
SV-6a	0,01	27,63	53,81	0,01	0,00	0,43	14,01	0,09	0,04	0,23	0,11	0,01	1,69	0,00	0,00	98,07
SV-6b	0,00	27,41	53,40	0,00	0,03	0,50	13,92	0,02	0,04	0,14	0,14	0,01	1,57	0,00	0,00	97,16
SV-7a	0,02	27,98	53,74	0,00	0,00	0,46	14,29	0,05	0,04	0,28	0,18	0,03	1,49	0,05	0,00	98,59
SV-7b	0,02	27,74	53,87	0,01	0,00	0,44	13,79	0,03	0,05	0,38	0,19	0,03	1,53	0,02	0,01	98,11
SV-10a	0,00	28,03	53,98	0,02	0,00	0,58	13,27	0,04	0,02	0,25	0,33	0,00	1,40	0,05	0,00	97,97
SV-10b	0,00	27,42	53,85	0,00	0,00	0,69	13,49	0,06	0,05	0,21	0,35	0,01	1,32	0,00	0,00	97,44
SV-12a	0,00	27,68	53,38	0,00	0,01	0,48	13,69	0,04	0,05	0,15	0,09	0,04	1,29	0,05	0,00	96,96
SV-12b	0,00	27,58	54,22	0,00	0,01	0,53	13,42	0,06	0,04	0,21	0,10	0,04	1,14	0,00	0,00	97,34
SV-14a	0,01	27,85	54,16	0,01	0,00	0,53	13,34	0,03	0,05	0,08	0,25	0,01	1,06	0,04	0,00	97,41
na 11 O	Na	Si	Al	K	Ca	Ti	Fe	F	Cr	Zn	Mn	V	Mg	Ba	Cl	CATSUM
SV-1a	0,00	1,86	4,19	0,00	0,00	0,02	0,80	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,14	0,00	0,00	7,02
SV-1b	0,00	1,86	4,20	0,00	0,00	0,02	0,77	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,14	0,00	0,00	7,02
SV-2a	0,00	1,84	4,22	0,00	0,00	0,03	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	7,02
SV-2b	0,00	1,87	4,18	0,00	0,00	0,02	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	7,01
SV-5a	0,00	1,85	4,13	0,00	0,00	0,03	0,79	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,22	0,00	0,00	7,05
SV-5b	0,00	1,85	4,12	0,00	0,00	0,03	0,80	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,22	0,00	0,00	7,05
SV-6a	0,00	1,83	4,21	0,00	0,00	0,02	0,78	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,17	0,00	0,00	7,04
SV-6b	0,00	1,84	4,21	0,00	0,00	0,03	0,78	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,03
SV-7a	0,00	1,85	4,19	0,00	0,00	0,02	0,79	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,15	0,00	0,00	7,03
SV-7b	0,00	1,84	4,21	0,00	0,00	0,02	0,77	0,01	0,00	0,02	0,01	0,00	0,15	0,00	0,00	7,03
SV-10a	0,00	1,86	4,21	0,00	0,00	0,03	0,73	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,14	0,00	0,00	7,01
SV-10b	0,00	1,83	4,24	0,00	0,00	0,03	0,75	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,13	0,00	0,00	7,02
SV-12a	0,00	1,86	4,22	0,00	0,00	0,02	0,77	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,13	0,00	0,00	7,01
SV-12b	0,00	1,84	4,26	0,00	0,00	0,03	0,75	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,11	0,00	0,00	7,00
SV-14a	0,00	1,85	4,25	0,00	0,00	0,03	0,74	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,10	0,00	0,00	7,00

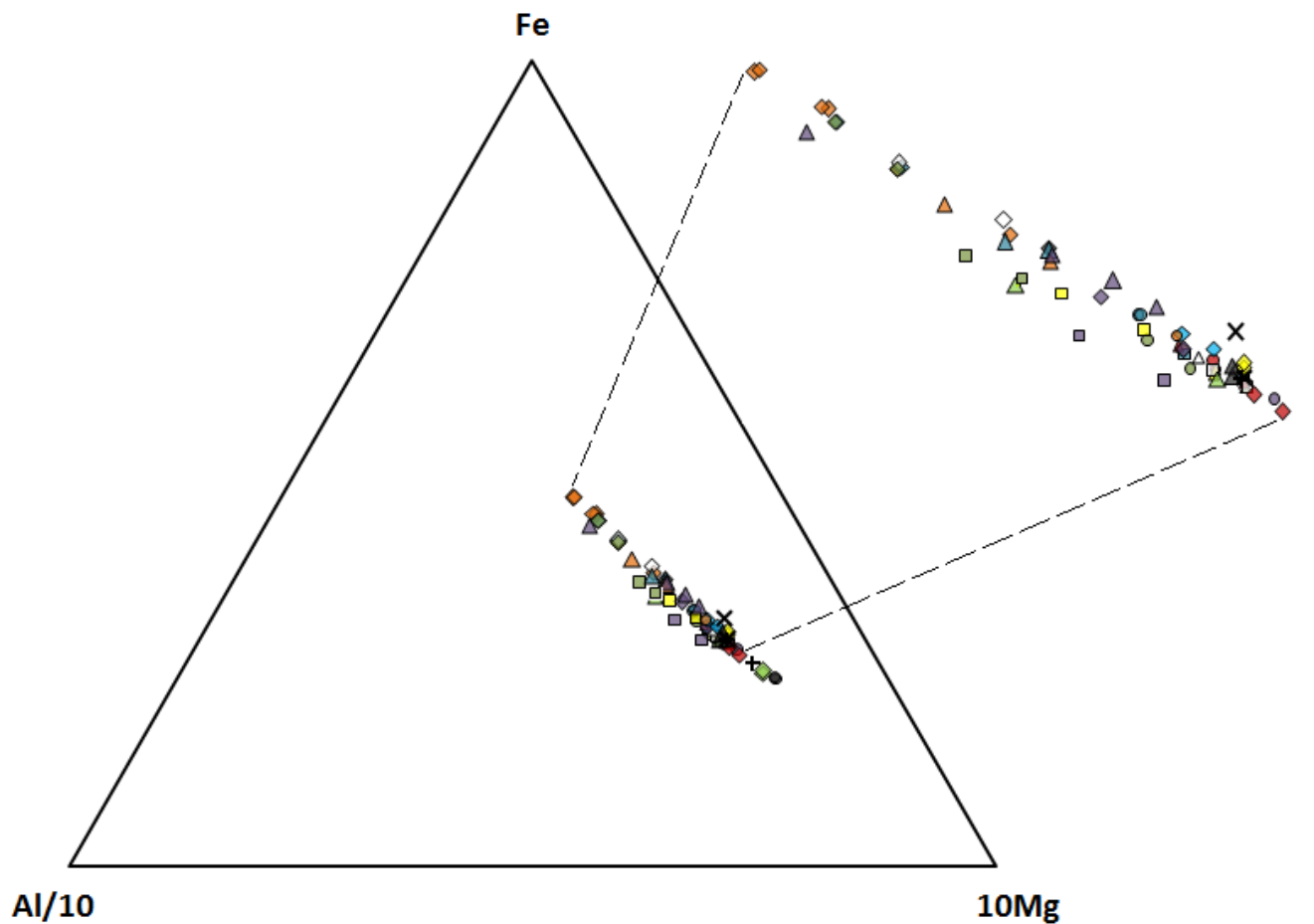
Tab. 1. Chemické složení staurolitu na základě WDX analýz, přepočít na 11 atomů kyslíku.

vzorek	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	F	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	BaO	Cl	Total
SV-14b	0,01	27,79	54,74	0,03	0,00	0,52	12,95	0,09	0,10	0,22	0,30	0,04	0,93	0,02	0,01	97,75
SV-11a	0,04	27,89	54,08	0,01	0,03	0,68	12,10	0,05	0,05	0,79	0,61	0,06	1,12	0,00	0,00	97,51
SV-11b	0,04	27,97	54,35	0,00	0,01	0,60	12,16	0,05	0,03	0,68	0,57	0,02	1,29	0,02	0,00	97,78
SV-21a	0,00	28,12	54,03	0,00	0,01	0,57	13,84	0,04	0,03	0,06	0,23	0,00	1,47	0,00	0,00	98,42
SV-21b	0,00	27,22	53,25	0,01	0,01	0,77	14,04	0,06	0,04	0,07	0,19	0,03	1,64	0,00	0,01	97,33
SV-18a	0,02	26,77	54,07	0,00	0,00	0,58	13,51	0,05	0,03	0,17	0,23	0,02	1,53	0,00	0,00	96,98
SV-18b	0,02	27,18	53,19	0,00	0,01	0,60	13,76	0,03	0,02	0,10	0,28	0,00	1,50	0,00	0,00	96,68
SV-19a	0,02	27,34	53,09	0,00	0,01	0,51	14,05	0,09	0,03	0,15	0,20	0,00	1,60	0,01	0,00	97,10
SV-19b	0,00	27,47	53,88	0,01	0,01	0,44	13,88	0,07	0,02	0,15	0,20	0,00	1,63	0,00	0,00	97,74
SV-20a	0,03	27,64	53,98	0,02	0,00	0,46	14,04	0,07	0,03	0,16	0,22	0,02	1,39	0,00	0,00	98,05
SV-20b	0,00	27,38	53,75	0,01	0,00	0,45	13,94	0,08	0,02	0,11	0,22	0,02	1,62	0,00	0,00	97,60
SV-15a	0,02	27,04	54,08	0,00	0,02	0,61	13,81	0,09	0,07	0,09	0,28	0,04	1,53	0,03	0,00	97,71
SV-15b	0,02	27,55	53,70	0,01	0,00	0,59	13,93	0,02	0,08	0,03	0,30	0,04	1,57	0,00	0,00	97,85
SV-17a	0,02	25,90	55,18	0,02	0,01	0,35	14,31	0,08	0,03	0,05	0,22	0,02	1,51	0,01	0,00	97,69
SV-17b	0,01	26,50	53,30	0,00	0,01	0,50	14,34	0,03	0,05	0,05	0,21	0,02	1,56	0,00	0,00	96,55
na 11 O	Na	Si	Al	K	Ca	Ti	Fe	F	Cr	Zn	Mn	V	Mg	Ba	Cl	CATSUM
SV-14b	0,00	1,84	4,28	0,00	0,00	0,03	0,72	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,09	0,00	0,00	6,99
SV-11a	0,00	1,85	4,24	0,00	0,00	0,03	0,67	0,01	0,00	0,04	0,03	0,00	0,11	0,00	0,00	6,99
SV-11b	0,00	1,85	4,24	0,00	0,00	0,03	0,67	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00	0,13	0,00	0,00	7,00
SV-21a	0,00	1,86	4,20	0,00	0,00	0,03	0,76	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,14	0,00	0,00	7,01
SV-21b	0,00	1,82	4,20	0,00	0,00	0,04	0,79	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,03
SV-18a	0,00	1,80	4,27	0,00	0,00	0,03	0,76	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,15	0,00	0,00	7,04
SV-18b	0,00	1,83	4,22	0,00	0,00	0,03	0,77	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,15	0,00	0,00	7,03
SV-19a	0,00	1,84	4,20	0,00	0,00	0,03	0,79	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,04
SV-19b	0,00	1,83	4,23	0,00	0,00	0,02	0,77	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,03
SV-20a	0,00	1,84	4,23	0,00	0,00	0,02	0,78	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,14	0,00	0,00	7,03
SV-20b	0,00	1,83	4,23	0,00	0,00	0,02	0,78	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,04
SV-15a	0,00	1,80	4,25	0,00	0,00	0,03	0,77	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,15	0,00	0,00	7,04
SV-15b	0,00	1,83	4,21	0,00	0,00	0,03	0,77	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,16	0,00	0,00	7,03
SV-17a	0,00	1,73	4,35	0,00	0,00	0,02	0,80	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,15	0,00	0,00	7,07
SV-17b	0,00	1,79	4,25	0,00	0,00	0,03	0,81	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,16	0,00	0,00	7,06

Tab. 2. Chemické složení staurolitu na základě WDX analýz, přepočítáno na 11 atomů kyslíku.

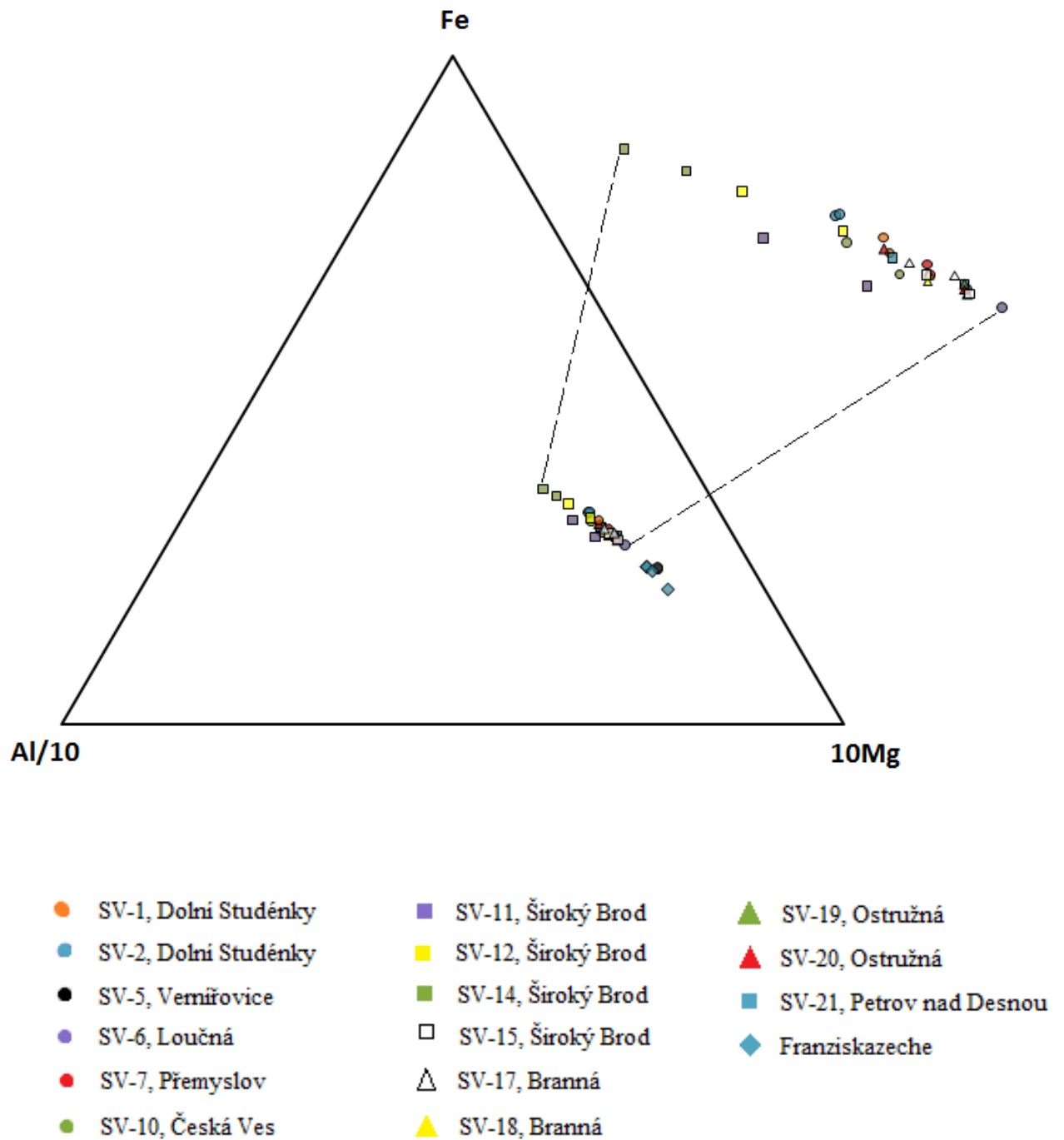


Obr. 18. Trojúhelníkový diagram znázorňující poměry hliníku, hořčíku a železa ve staurolitech svorů silezika, srovnání vzorků z mnoha studovaných lokalit.



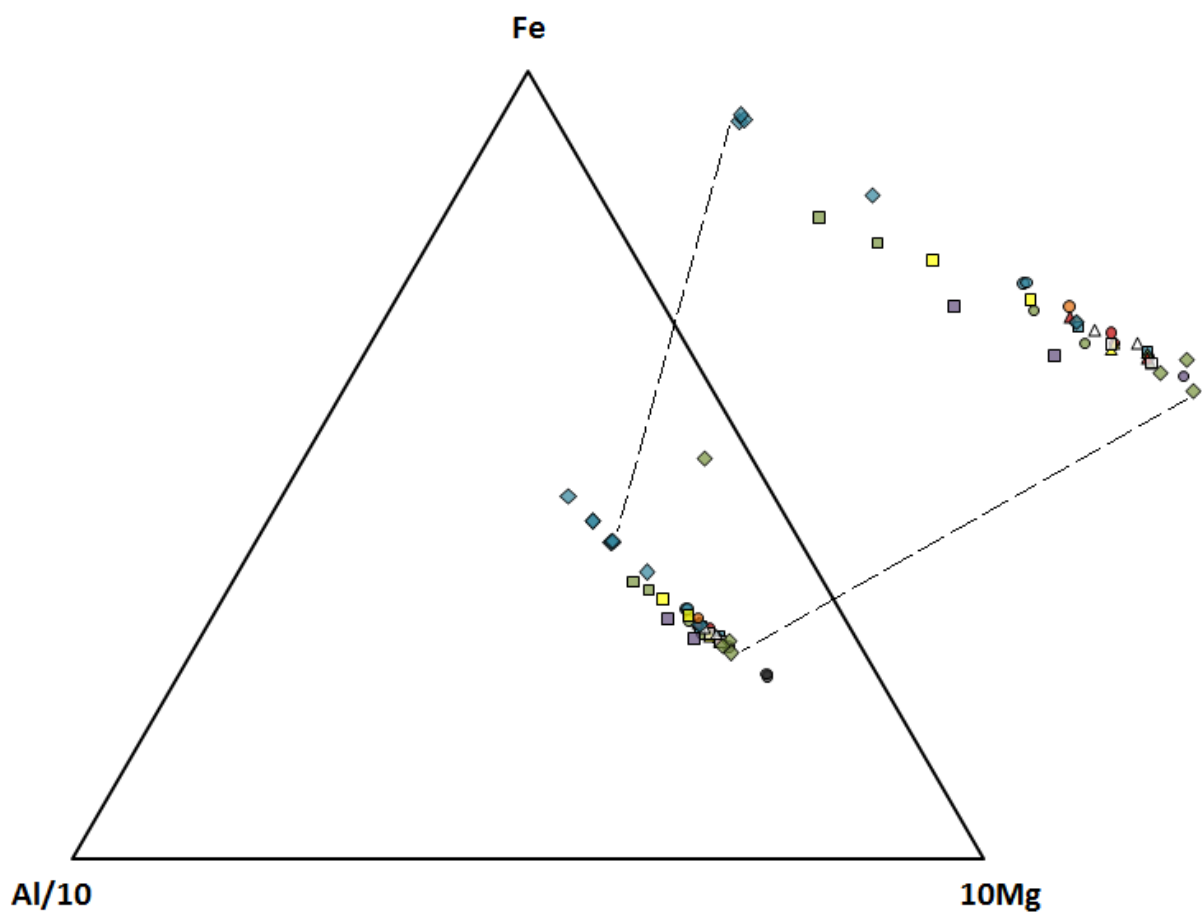
- |                        |                            |                         |                     |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| ● SV-1, Dolní Studénky | ■ SV-11, Široký Brod       | ◆ AS1, Anenská studánka | ◆ HO5, Holubáč      |
| ● SV-2, Dolní Studénky | ■ SV-12, Široký Brod       | ◆ AS3, Anenská studánka | ◆ HO23, Holubáč     |
| ● SV-5, Vernířovice    | ■ SV-14, Široký Brod       | ◆ AS4, Anenská studánka | ▲ VYH1, Vyhlídka    |
| ● SV-6, Loučná         | □ SV-15, Široký Brod       | ◆ AS5, Anenská studánka | ▲ CH1, Chlupěňčik   |
| ● SV-7, Přemyslov      | △ SV-17, Branná            | ◆ AS7, Anenská studánka | ▲ CH2, Chlupěňčik   |
| ● SV-10, Česká Ves     | ▲ SV-18, Branná            | ◆ AS8, Anenská studánka | ▲ VOZ1, Vozka       |
|                        | ▲ SV-19, Ostružná          | ◆ HO3, Holubáč          | ▲ VOZ2, Vozka       |
|                        | ▲ SV-20, Ostružná          | ◆ HO4, Holubáč          | ✕ OBS1, Obří skály  |
|                        | ■ SV-21, Petrov nad Desnou |                         | ✕ OBS10, Obří skály |

Obr. 19. Trojúhelníkový diagram znázorňující poměry hliníku, hořčíku a železa ve staurolitech svorů silezika, srovnání vzorků z mnoha studovaných lokalit (všechny vzorky označené SV) a vzorků z lokalit Anenská studánka, Holubáč, Vyhlídka (Petrov nad Desnou), Chlupěňčik, Vozka a Obří skály uváděných Košuličovou (2002).



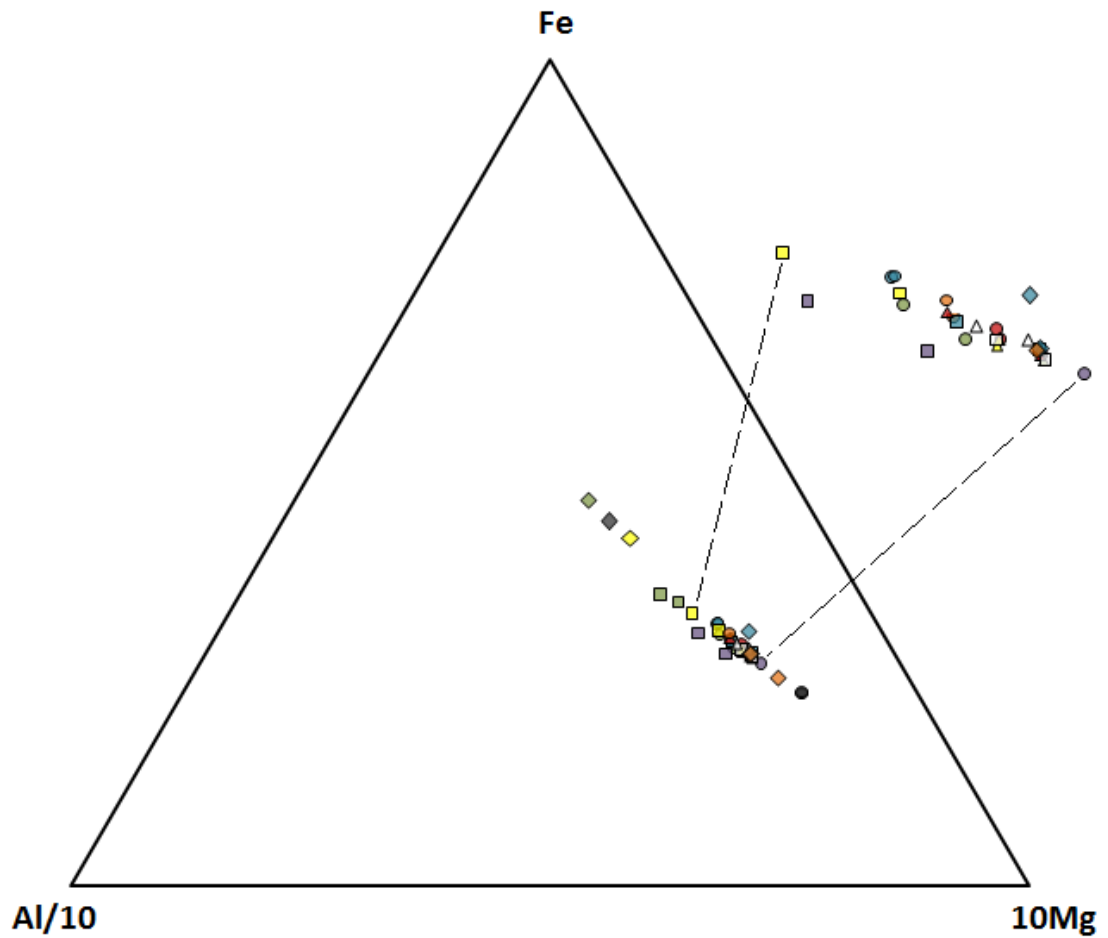
Obr. 20. Trojúhelníkový diagram znázorňující poměry hliníku, hořčíku a železa ve staurolitech svorů silezika, srovnání vzorků z mnoha studovaných lokalit (všechny vzorky označené SV) a vzorků z lokality Franziskazeche publikované Nepejchalem a Zimákem (2004).





- |                        |                      |                            |
|------------------------|----------------------|----------------------------|
| ● SV-1, Dolní Studénky | ■ SV-11, Široký Brod | ▲ SV-19, Ostružná          |
| ● SV-2, Dolní Studénky | ■ SV-12, Široký Brod | ▲ SV-20, Ostružná          |
| ● SV-5, Vernířovice    | ■ SV-14, Široký Brod | ■ SV-21, Petrov nad Desnou |
| ● SV-6, Loučná         | □ SV-15, Široký Brod | ◆ AP, Anenský pramen       |
| ● SV-7, Přemyslov      | △ SV-17, Branná      | ◆ HO, Holubáč              |
| ● SV-10, Česká Ves     | ▲ SV-18, Branná      |                            |

Obr. 21. Trojúhelníkový diagram znázorňující poměry hliníku, hořčíku a železa ve staurolitech svorů silezika, srovnání vzorků z mnoha studovaných lokalit (všechny vzorky označené SV) a vzorků z lokalit Anenský pramen a Holubáč publikované Zimákem (2002).



- |                        |                      |                            |
|------------------------|----------------------|----------------------------|
| ● SV-1, Dolní Studénky | ■ SV-11, Široký Brod | ▲ SV-19, Ostružná          |
| ● SV-2, Dolní Studénky | ■ SV-12, Široký Brod | ▲ SV-20, Ostružná          |
| ● SV-5, Vernířovice    | ■ SV-14, Široký Brod | ■ SV-21, Petrov nad Desnou |
| ● SV-6, Loučná         | □ SV-15, Široký Brod | ◆ OBS1, Obří skály         |
| ● SV-7, Přemyslov      | △ SV-17, Branná      | ◆ OBS10, Obří skály        |
| ● SV-10, Česká Ves     | ▲ SV-18, Branná      | ◆ AS1M1, Obří skály        |
|                        |                      | ◆ AS1M2, Obří skály        |
|                        |                      | ◆ AS1H, Obří skály         |

Obr. 22. Trojúhelníkový diagram znázorňující poměry hliníku, hořčíku a železa ve staurolitech svorů silezika, srovnání vzorků z mnoha studovaných lokalit (všechny vzorky označené SV) a vzorků z lokality Obří skály uváděné Brychtou (2007) a Košuličovou (2002).

## 10 Diskuze

Chemizmus staurolitu je velmi složitý. V minulosti se předpokládalo, že strukturu staurolitu tvoří střídající se kyanitové vrstvy s vrstvami  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . Později však chemická analýza ukázala, že staurolit obsahuje více hliníku a železa a méně vodíku, což nepotvrdilo původní teorii. Nakonec bylo zjištěno, že se struktura skládá z 8 kyanitových vrstev  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  a střídá se s vrstvami  $\text{Al}_2\text{Fe}_4\text{O}_8\text{H}_2$ . Celkově tak vytváří vzorec  $\text{H}_2\text{Fe}_4^{2+}\text{Al}_{18}\text{Si}_8\text{O}_{48}$  (Deer et al. 1997).

Největším problémem v chemizmu staurolitu je umístění jednotlivých prvků ve struktuře. Asi s nejlepším řešením přišel Hawthorne (1993), když jednotlivé pozice označil písmeny T, M, H, O, atomy písmeny A, B a společné vazby čísla (viz kapitola 6).

Problémem je i přesné určení vodíku. Teoretický obsah vodíku ve staurolitu je různý, od 2 apfu do 8 apfu. Ale výsledky většiny analýz ukazují, že se obsah vodíku pohybuje mezi 2-4 apfu. Obsahy vodíku jsou variabilní, protože staurolit je žáruvzdorný nerost a obsahuje příměsi a různé formy vodíku ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) (Hawthorne et al. 1993).

U staurolitu může být problém určit strukturu, ale jeho chemizmus se moc neliší. Podle Deera (1997) vzniká staurolit pouze z jílových sedimentů bohatých na hliník.

Výsledky analýz staurolitu ze svorů v oblasti silezika ukazují, že jejich chemizmus je téměř shodný, i když byly vzorky sebrány z různých oblastí; provedla jsem i srovnání mezi staurolitem ze svoru (Košuličová 2002) a staurolitem ze skarnoidní horniny, která pravděpodobně vznikla při stejném procesu metamorfózy, ale z jiného protolitu (Brychta 2007), z lokality Obří skály. Při přepočtu výsledků mých WDX analýz na 11 atomů kyslíku jsou obsahy hliníku 4,12 - 4,35 apfu, železa 0,65 - 0,81 apfu, hořčíku 0,09 - 0,22 apfu. Ve všech třech případech jde o intervaly velmi úzké, chemizmus staurolitů je tedy velmi podobný. Jen velmi nízká variabilita ve složení staurolitu byla zjištěna i v případech, kdy z relativně malého území byl studován větší počet vzorků (lokality u Širokého Brodu).

U některých vzorků (Holubáč- Zimák 2002, Franziskazeche- Zimák, Nepejchal 2004) lze konstatovat mírně zvýšený obsah hořčíku, snad to souvisí s povahou protolitu (odlišného od pelitů, které byly protolitem svorů na všech ostatních lokalitách silezika).

## 11 Závěr

V rámci terénních prací jsem navštívila 21 lokalit v oblasti silezika, kde se vyskytují staurolitické svory, a odebrala vzorky potřebné k dalšímu výzkumu. Pouze 15 z nich bylo vhodných ke zhotovení leštěných výbrusů a provedení celkem třiceti WDX analýz, pomocí nichž jsem zjistila chemizmus jednotlivých staurolitů. Výsledky analýz jsem následně přepočítala na 11 atomů kyslíku a tím dostala přesné atomární obsahy jednotlivých prvků. Obsahy hlavních prvků jsou jen ve velmi úzkých intervalech: křemík 1,73 - 1,87 apfu, hliník 4,12 - 4,35 apfu, železo 0,65 - 0,81 apfu, hořčík 0,09 - 0,22 apfu. Pro lepší zobrazení drobných rozdílů ve výsledcích jsem vytvořila Al-Mg-Fe diagramy.

Zjištěné nepatrné rozdíly v chemizmu staurolitu nelze interpretovat. Zdá se však, že chemizmus staurolitu ve svorech silezika nezávisí ani na stupni metamorfního přepracování, ani na povaze protolitu (alespoň pokud jde o mikroelementy – Si, Al, Fe, Mg). Stupeň metamorfního přepracování a složení protolitu určují pouze to, zda staurolit vznikne či nikoli.

## Seznam použitých internetových zdrojů

URL1: GRYGAR, Radomír. VŠB. Regionální geologie České republiky:

Moravosilezikum - moravskoslezská oblast [online]. [cit. 2013-04-22].

Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/reg\\_geol\\_cr/6\\_kapitola.htm](http://geologie.vsb.cz/reg_geol_cr/6_kapitola.htm)

URL2: UK. Mineralogie pro školy: Přehled minerálů- staurolit [online]. [cit. 2013-04-22].

Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/ugmnz/mineral/mineral/staurolit.html>

URL3: SEZNAM. Mapy [online]. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.mapy.cz/>

## Seznam zdrojů použité literatury

Bowes D. R. (1989): The Encyclopedia of igneous and metamorphic petrology. New York: Van Nostrand Reinhold.

Brychta L. (2007): Staurolit a jeho pozice v metamorfovaných horninách. MS. Bakalářská práce, PřF Masarykova univerzita Brno.

Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. (1997): An Introduction to the Rock-forming minerals, second edition. London.

Gregerová M., Fojt B., Vávra V. (2002): Mikroskopie horninotvorných a technických minerálů. Moravské zemské muzeum a Přírodovědecká fakulta MU Brno.

Hawthorne F. C., Ungaretti L., Oberti R., Caucia F., Callegari A. (1993): The crystal chemistry of staurolite. I. Crystal structure and site populations. The Canadian Mineralogist, 31, 551-582.

Cháb J., Breiter K., Fatka O., Hladil J., Kalvoda J., Šimůnek Z., Štorch P., Vašíček Z., Zajíc J., Zapletal J. (2008): Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu. Vydavatelství České geologické služby, Praha.

Konopásek J., Štípská P., Klápová H., Schulmann K. (1998): Metamorfní petrologie. Praha: Karolinum.

Košuličová M. (2002): Svory v okolí Petrova nad Desnou a Ramzové. MS. Diplomová práce, PřF Univerzita Palackého v Olomouci.

Košuličová M., Štípská P. (2007): Variations in the transient prograde geothermal gradient from chloritoid-staurolite equilibria: a case study from the Barrovian and Buchan-type domains in the Bohemian Massif. Journal of metamorphic geology, 25, 19-35.

Nepejchal M., Zimák J. (2004): Železorudné ložisko Franziskazeche u Šumperka. Městský úřad Šumperk a Vlastivědné muzeum v Šumperku.

- Vávra V., Fojt B., Kopa D. (1999): Skarnoidní hornina z Obřích skal v Hrubém Jeseníku. Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v r. 1998, str. 128-129.
- Zimák J., Novotný P., Fojt B., Novák M., Vávra V., Kopa D., Losos Z., Prinzová E., Skácel J. (2002): Exkurzní průvodce po mineralogických lokalitách na Sobotínsku. UP Olomouc.

## **Seznam příloh**

Přílohy jsou k dispozici na přiloženém CD.

Příloha 1: Podrobné mapy (turistické i letecké) lokalit

Příloha 2: Fotografie makrovzorků odebraných na studovaných lokalitách

Příloha 3: Fotografie mikrovzorků pořízené pomocí polarizačního mikroskopu Olympus BX50 a fotoaparátem Olympus C-7070