



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV GEOLOGICKÝCH VĚD



**Petalit a jeho alterace
v komplexních (Li) pegmatitech
moldanubika**

Diplomová práce

Jiří Zikeš

Bibliografický záznam

Autor: Ing. Bc. Jiří Zikeš
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav geologických věd

Název práce: Petalit a jeho alterace v komplexních (Li) pegmatitech
moldanubika

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie

Vedoucí práce: prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Akademický rok: 2015

Počet stran: 44

Klíčová slova: granitické pegmatity, lithné minerály, fázový diagram
petalit, spodumen, moldanubikum

Bibliographic Entry

Author: Ing. Bc. Jiří Zikeš
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Geology

Title of Thests: Petalite and its alteration from complex (Li)
pegmatites in the Moldanubian Zone

Degree Programme: Geology

Field of Study: Geology

Supervisor: prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Academic Year: 2015

Number of Pages: 44

Keywords: granitic pegmatites, Li-minerals, phase diagram,
petalite, spodumene, Moldanubian Zone

Abstrakt

V rámci diplomové práce byly detailně studovány tři moldanubické pegmatity - Nová Ves u Českého Krumlova, Jeclov u Jihlavy a Dobrá Voda u Velkého Meziříčí, které reprezentují oblast moldanubika o rozměrech přibližně 150 x 60 km. Studium ukázalo, že na všech třech lokalitách byl petalit nahrazen jemnozrnným (Jeclov) až hrubozrnným (Nová Ves, Dobrá Voda) spodumen-křemenným agregátem. Jak v Nové Vsi tak v Dobré Vodě byl tento agregát silně porézni a obsahoval drobné zaoblené inkluze petalitu o velikosti 15–40 μm . Vzorek z Jeclova byl postižen mylonitizací a nebyl vhodný pro další studium.

Parageneze petalit + spodumen + křemen má několik aspektů. (i) Výskyt primárního petalitu dokládá krystalizaci pegmatitu za tlaku nižšího než 2,5-3 kbar (~7-9 km) napříč celým moldanubikem. (ii) Krystalizace komplexních pegmatitů v regionu je evidentně omezena na úzký hloubkový rozsah. (iii) Petalit a spodumen-křemenný agregát jsou značně citlivé na orientovaný tlak. (iv) Inkluze petalitu mohou reprezentovat reliktů původního primárního petalitu, ale může se jednat o nově tvořený petalit vzniklý rekrystalizací sekundárního spodumen-křemenného agregátu v důsledku snížení objemu o 18-19 % během reakce $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ a následného izotermického poklesu tlaku, který může vrátit systém z pole stability spodumenu do pole stability petalitu.

Abstract

Three pegmatites from the Moldanubian Zone - Nová Ves near Český Krumlov, Jeclov near Jihlava and Dobrá Voda near Velké Meziříčí were examined in detail to cover whole extend of the region. Detailed EMP study revealed that petalite is replaced by fine-grained (Jeclov) to fine- to coarse-grained (Nová Ves, Dobrá Voda) spodumene-quartz aggregate. This aggregate is typically porous at both latter localities, whereas in the Jeclov pegmatite tectonic mylonitization significantly overprinted the original texture. At Nová Ves and Dobrá Voda pegmatites, the aggregate contains small rounded inclusions of petalite, 15-40 μm in size.

The mineral assemblage petalite + spodumene + quartz has several implications. (i) Occurrence of primary petalite suggests $P < 2.5\text{-}3$ kbar (depth ~7-9 km) of the pegmatite emplacement and primary crystallization for all over the region of the Moldanubian Zone. (ii) The complex pegmatites are evidently restricted to a narrow depth level in the whole region. (iii) The assemblage $\text{Ptl} + \text{Spd} + \text{Qz}$ is highly sensible for tectonic overprint. (iv) Inclusions of petalite in quartz and spodumene may represent relics of primary petalite but also a product of recrystallization of secondary spodumene + quartz due to decreasing of volume at 18-19 vol. % during the reaction $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2\text{Qz}$ and consequent isothermal drop of pressure back from the stability field of spodumene to the stability field of petalite.



Masarykova univerzita



Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student : Jiří Zikeš

Studijní program : Geologie

Studijní obor : Geologie

Ředitel Ústavu geologických věd PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje diplomovou práci s tématem:

Petalit a jeho alterace v komplexních (Li) pegmatitech moldanubika

Petalite and its alterations from complex (Li) pegmatites in the Moldanubian Zone

Zásady pro vypracování: Granitické komplexní pegmatity s Li-minerály (Li-slídy Li-turmalíny amblygonit-montebrazit petalit) jsou poměrně rozšířené v oblasti moldanubika. Petalit $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ je typický minerál komplexních (Li) pegmatitů vznikající za relativně nízkého tlaku $P \approx 3$ kbar a je proto důležitým indikátorem tlakových podmínek vzniku pegmatitů. Dosud byl zjištěn pouze na několika lokalitách rozšířených ale v celé oblasti moldanubika. Petalit se ale velmi často během časného subsolidu rozpadá na jemnozrnnou až hrubě zrnitou směs spodumenu a křemene podle rovnice $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10} = \text{LiAlSi}_2\text{O}_6 + 2\text{SiO}_2$ a někdy je zcela zatlačený. Student se zaměří na detailní petrografické (výbrusy) a mineralogické (elektronová mikrosonda, RTG, popř. CL) studium petalitu a produktů jeho rozpadu z lokalit Nová Ves u Českého Krumlova, Jeclov u Jihlavy a Dobrá Voda u Velkého Meziříčí. Tyto lokality se liší stupněm alterace od jen slabě alterovaných krystalů petalitu (Nová Ves) po jeho kompletní zatlačení spodumem a křemenem (Dobrá Voda). V diskusi se student zaměří na srovnání alteračních procesů na jednotlivých lokalitách a také s již studovanými výskyty ve světě. 1. Přehledná rešerše literatury – krystalochemie petalitu a spodumenu, fázové vztahy a jejich stabilita v PTX diagramech. 2. Terénní studium – dokumentace vybraných lokalit 3. Příprava výbrusů a preparátů, makroskopický a mikroskopický popis vzorků, podrobné studium vybraných minerálů na elektronové mikrosondě, grafické zpracování chemických analýz. V omezené míře i další laboratorní studium (RTG, CL, IR, RAMAN).

Literatura: Černý P. (1991): *Rare element granite pegmatites. I Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geoscience Canada, 18, 49-67.* Černý P. Ercit T. S. (2005): *The classification of granitic pegmatites revisited. Canadian Mineralogist, 43, 2005-2026.* London D. (1984): *Experimental phase equilibria in the system LiAlSiO₄ SiO₂ H₂O: a petrogenetic grid for lithium rich pegmatites. American Mineralogist, 69, 995-1004.* London D. (2008): *Pegmatites. Canadian Mineralogist, Special Publication, 348.*

Vedoucí diplomové práce : prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Datum zadání diplomové práce : 31. října 2013

Datum odevzdání diplomové práce : 30. dubna 2015

V Brně dne 11.11.2013

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
602 00 Brno

ÚSTAV GEOLÓGICKÝCH VĚD

doc. RNDr. Josef Zeman, CSc.

ředitel Ústavu geologických věd PřF MU

Zadání diplomové práce převzal dne: 28.11.2013

Podpis studenta

Poděkování

Je mou milou povinností poděkovat prof. RNDr. Milanu Novákovi, CSc. za jeho pomoc při vypracování této diplomové práce a za to, že mě přivedl ke studiu mineralogie na Masarykově univerzitě. Rovněž děkuji prof. Ing. Jindřichu Leitnerovi z VŠCHT Praha za cenné připomínky k problematice fázových přeměn v pevném stavu. V neposlední řadě děkuji manželce Martině a celé rodině za toleranci a trpělivost.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 6. květen 2015

.....
Jiří Zikeš

Obsah

1. Úvod	8
2. Granitické pegmatity	9
2.1. Charakteristika granitických pegmatitů a jejich klasifikace	9
2.2. Podmínky vzniku lithných pegmatitů	11
2.3. Lithné minerály komplexních pegmatitů	12
2.4. Petrologické aplikace fázových přeměn petalitu a spodumenu	14
2.5. Příklady fázových přeměn petalitu a spodumenu	16
3. Studované komplexní (Li) pegmatity	17
3.1 Nová Ves u Českého Krumlova	17
3.2 Jeclov u Jihlavy	20
3.3 Dobrá Voda u Velkého Meziříčí	21
4. Metodika.....	24
5. Výsledky studia	25
5.1 Makroskopický popis studovaných vzorků.....	25
5.2 Studium na elektronové mikrosondě.....	26
5.3 Chemické analýzy	33
5. Diskuse	38
6. Závěr.....	41
7. Literatura	42

1. Úvod

Lithné aluminosilikáty petalit $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$ (Ptl) a spodumen $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ (Spd) jsou vedle Li-slíd nejčastějšími a nejhojnějšími Li minerály v komplexních Li pegmatitech. V některých případech se mohou vyskytovat společně v jednom pegmatitovém tělese, běžně dokonce na stejném vzorku. Jejich vzájemné rovnovážné vztahy, reprezentované fázovým diagramem pro systém $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ představeným LONDONEM (1984), jsou důležité pro pochopení petrogenese lithných pegmatitů, pro stanovení P-T podmínek jejich vzniku a pro určení procesů a izochemických změn, které probíhaly během krystalizace včetně jejich chování ve stadiu časného subsolidu.

V rámci předložené práce byly detailně studovány tři moldanubické pegmatity - Nová Ves, Jeclov a Dobrá Voda (stáří ~ 335 Ma) reprezentující oblast moldanubika o rozměrech přibližně 150 x 60 km. Cílem práce bylo analyzovat vzorky z uvedených lokality na elektronové mikrosondě, na základě výsledků analýzy stanovit P-T podmínky, za kterých pegmatity vznikaly, a provést jejich vzájemné srovnání.

2. Granitické pegmatity

2.1. Charakteristika granitických pegmatitů a jejich klasifikace

Granitické pegmatity jsou magmatické horniny, jejichž celkové chemické složení odpovídá granitům. Ve většině případů vytváří menší, převážně žilná tělesa o rozměrech metrů až stovek metrů, výjimečně prvních jednotek kilometrů. Mocnost žil zpravidla nepřesahuje jednotky metrů. Typickým znakem granitických pegmatitů je jejich zonální stavba, která je produktem texturní diferenciaci v průběhu krystalizace z magmatu. Jednotlivé zóny, nebo přesněji texturně-paragenetické jednotky (NOVÁK 2005), se liší jak minerálním (chemickým) složením, tak texturou a velikostí minerálních zrn, jejich morfologií a prostorovým uspořádáním. Běžně se lze u zonálních pegmatitů setkat s následujícími jednotkami od okraje směrem do středu pegmatitu: granitická jednotka, grafická jednotka, muskovit-albitová jednotka, bloková zóna a křemenné jádro. Tyto jednotky mohou tvořit souvislé zóny až několik metrů mocné.

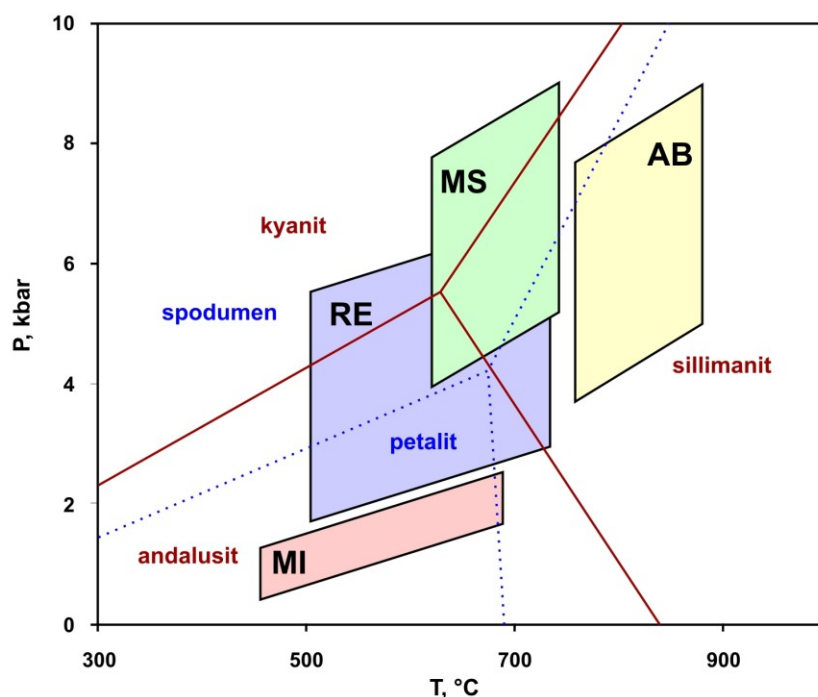
Dalším typickým znakem granitických pegmatitů jsou jedinečné textury, které se u jiných magmatických hornin téměř nevyskytují. Jedná se například o grafické srůsty křemene a K-živce nebo velké krystaly (řádově decimetry až kolem deseti metrů) některých minerálů, např. spodumenu, berylu nebo K-živce.

Pro klasifikaci granitických pegmatitů byla v minulosti vytvořena různá schémata. V současné době je nejpoužívanější klasifikace ČERNÉHO & ERCITA (2005) navazující na jejich předchozí práce a na práce řady dalších autorů, která je založená na geologickém prostředí, v němž vznikají hostitelské horniny pegmatitů, i když se tento přístup v poslední době pomalu opouští (ČERNÝ ET AL. 2012). ČERNÝ & ERCIT (2005) rozdělují pegmatity do pěti základních tříd:

1. abysální pegmatity
2. muskovitové pegmatity
3. pegmatity muskovitové-vzácných prvků
4. pegmatity vzácných prvků
5. miarolitické pegmatity

Zařazení pegmatitů do jednotlivých tříd v závislosti na P-T podmínkách vzniku jejich hostitelských hornin je znázorněno na obr. 1. Třída pegmatitů muskovitových-vzácných prvků je přechodní mezi třídou pegmatitů muskovitových a pegmatitů vzácných prvků.

ČERNÝ ET AL. (2012) upozornili, že neexistuje přímý vztah mezi P-T podmínkami, za kterých pegmatity krystalizovaly, a metamorfními podmínkami okolních hornin. Proto navrhují klasifikovat pegmatity primárně podle jejich chemismu (obsahu nekompatibilních prvků), který je odvozen od chemického složení zdrojové granitické taveniny.



Obr. 1 P-T diagram zobrazující přibližně pole jednotlivých tříd pegmatitů (LONDON 2008).

AB - abysální pegmatity; MS - muskovitové pegmatity; RE - pegmatity vzácných prvků; MI - miarolitické pegmatity. Plné linie vyznačují reakční hranice pro kyanit – sillimanit – andalusit; tečkované linie vyznačují reakční hranice pro spodumen – petalit – β -spodumen a virgilit.

Pegmatity třídy vzácných prvků mají největší variabilitu svého složení a objevují se nejčastěji v horninách metamorfovaných za relativně nižších tlaků, v amfibolitové facii nebo ve facii zelených břidlic (ČERNÝ & TRUEMAN 1978). Mineralogická klasifikace granitických pegmatitů třídy vzácných prvků je uvedena v tab. 1.

Tab. 1 Klasifikace granitických pegmatitů třídy vzácných prvků (podle ČERNÉHO & ERCITA 2005).

Podtřída	Typ	Subtyp
REE		allanit-monazitový
		euxenitový
		gadolinitový
Li	berylový	beryl-columbitový
		beryl-columbit-fosfátový
	komplexní	spodumenový
		petalitový
		lepidolitový
		elbaitový
		amblygonitový
albit-spodumenový		
albitový		

Lithné pegmatity patří k nejvíce geochemicky frakcionovaným typům pegmatitů. Ke geochemické frakcionaci dochází během krystalizace magmatu, kdy se ve zbytkové tavenině hromadí nekompatibilní prvky, jako jsou Rb, Cs, Mn, Ga, Hf nebo Ta a zvyšuje se koncentrace Be a Li. Tyto prvky vstupují do staveb minerálů ve větší míře až v závěrečné fázi krystalizace, což se projevuje jak vznikem nových fází, např. Li-minerálů (lepidolit, petalit, spodumen, elbait, amblygonit), tak změnou chemického složení u jednotlivých skupin minerálů, např. biotit → muskovit → trilithionit → polyolithionit nebo dravit → skoryl → elbait → rossmanit (NOVÁK 2005).

Lithné pegmatity tvoří pouze malou část všech granitických pegmatitů, cca 1-2%. Na druhou stranu však řada regionů s výskytem pegmatitů obsahuje minimálně jeden Li-pegmatit (LONDON & BURT 1982B).

2.2. Podmínky vzniku lithných pegmatitů

Lithné pegmatity spadají v klasifikaci pegmatitů podle ČERNÉHO & ERCITA (2005) do třídy vzácných prvků. Pegmatity této třídy jsou nabohaceny prvky, které se v běžných horninách vyskytují pouze ve stopovém množství. Tyto prvky se koncentrují do exotických minerálů nevyskytujících se v běžných magmatických horninách. Podle toho, jaké vzácné prvky v pegmatitech dominují, rozdělil ČERNÝ (1991b) pegmatity do dvou skupin LCT a NYF. Pro skupinu LCT pegmatitů je charakteristická přítomnost lithia, cesia a tantalu, pro skupinu NYF to jsou niob, yttrium a fluor. ČERNÝ ET AL. (2012) odvodili, že uvedené skupiny pegmatitů souvisí s typem granitu, jehož magma se podílelo na vzniku pegmatitu. Složení většiny LCT pegmatitů je příbuzné peraluminickým granitům typu S, u kterých se předpokládá vznik tavením sedimentárních hornin pelitického charakteru v orogenním a post-orogenním tektonickém prostředí, zatímco NYF pegmatity jsou spojovány s magmatizmem, jehož zdroj leží v hlubších částech zemské kůry uvnitř kontinentálních riftových zón (LONDON 2008).

Hlavní proces, který se uplatňuje při vzniku granitických pegmatitů, je frakční krystalizace z magmatu bohatého na těžké komponenty, přičemž pegmatity mohou být následně modifikovány ve stadiu subsolidu (DOSBABA & NOVÁK 2012). Teploty, za kterých pegmatitové magma krystalizuje, studovala řada autorů (např. LONDON 1986A, 1986B; CHAKOUMAKOS & LUMPKIN 1990; MORGAN & LONDON 1999). MORGAN & LONDON (1999) na základě rovnovážných teplot plagioklasu a K-živce stanovili teplotu krystalizace pegmatitu v Little Three v Kalifornii v rozmezí ~275-450 °C. Později tyto hodnoty mírně korigovali a dospěli k rozmezí teplot ~350-460 °C (LONDON 2008).

Tlakové podmínky vzniku pegmatitů shrnul LONDON (2008). Pro miarolitické pegmatity uvažuje tlaky 1,5 kbar (což odpovídá hloubce 4-5 km), pro miarolitické REE pegmatity 2-3 kbar (hloubka 5-8 km) a pro nemiarolitické REE pegmatity 3-4 kbar (hloubka 8-11 km). ČERNÝ (1991A) stanovil rozmezí tlaků, ve kterých vznikají pegmatity vzácných prvků, na ~ 2-4 kbar, což odpovídá hloubce přibližně 5,5-11 km.

2.3. Lithné minerály komplexních pegmatitů

Pro komplexní pegmatity je charakteristická přítomnost Li-aluminosilikátů petalitu a spodumenu (případně velmi vzácného eukryptitu a bikitaititu) a dalších lithných silikátů a fosfátů jako jsou lepidolit, Li-turmalíny a minerály řady amblygonit-montebrazit.

Všechny uvedené minerály se koncentrují hlavně ve vnitřních, extrémně hrubozrnných partiích pegmatitu, kde vytvářejí krystaly velké až několik metrů (např. v pegmatitu v Etta v Jižní Dakotě dosahují krystaly spodumenu velikosti 13 x 2 m). Petalit, spodumen, eukryptit, lepidolit a minerály řady amblygonit-montebrazit se ve světě těží jako surovina lithia pro elektrotechnický průmysl, sklářský a keramický průmysl a pro metalurgii hliníku. Drahokamové variety spodumenu (hiddenit, triphan a kunzit) a Li-turmalíny elbait a liddicoatit jsou vyhledávanými a ceněnými surovinami ve šperkařském průmyslu.

Petalit $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$

Je monoklinický aluminosilikát s tvrdostí 6,5, hustotou $2,42 \text{ g/cm}^3$ a dokonalou štěpností podle (001). Parametry jeho základní buňky jsou $a \sim 11,76$, $b \sim 5,15$, $c \sim 7,63 \text{ \AA}$, $\beta = 113^\circ$, $Z=2$, prostorová grupa P2/a. Obvykle vytváří velké subhedrální tabulární krystaly nebo je prismatický, s protažením krystalů ve směru osy a . Čerstvý má skelný lesk, je průhledný až průsvitný a je bezbarvý nebo má barvu bělavou až nažedlou. Od spodumenu se odlišuje štěpností podle (001) a nižší hustotou.

Chemické složení většiny petalitů je blízké ideálnímu krystalochemickému vzorci (tab. 2). Vedlejší prvky jako Na, K, Fe^{3+} a Mn vstupují do vazeb petalitu pouze ve stopovém množství. ČERNÝ & LONDON (1983) na základě řady chemických analýz zjistili, že většina petalitů má oproti stechiometrickému vzorci mírný deficit Li, jsou mírně bohatší na Al a obsahují nepatrné množství vody.

Tab. 2 Průměrné chemické složení petalitu v hm%. Upraveno podle LONDONA & BURTA (1982C).

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	Li_2O	Na_2O	K_2O	Rb_2O	Cs_2O
77,62	16,24	0,47	0,12	0,13	0,28	4,29	0,38	0,38	stopy	stopy

Spodumen $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$

Spodumen existuje ve třech polymorfních formách, přičemž v přírodě se vyskytuje pouze nízkoteplotní α -spodumen. β -spodumen je vysokoteplotní tetragonální forma. Třetí fáze, označovaná jako β -quartz, má hexagonální symetrii a je isostrukturní s vysokoteplotním β -křemenem (MUNOZ 1969). α -spodumen je monoklinický pyroxen s tvrdostí 6,5-7, hustotou $3,03\text{-}3,23 \text{ g/cm}^3$ a dokonalou štěpností podle (110). Parametry jeho základní buňky jsou $a \sim 9,45$, $b \sim 8,39$, $c \sim 5,215 \text{ \AA}$, $\beta = 110^\circ$, $Z=4$, prostorová grupa C2/c. Strukturu má podobnou diopsidu. Primární spodumen se vyskytuje jako euhedrální až subhedrální prismatické krystaly protažené ve směru osy c a dosahující velikosti až 12 m (RICKWOOD 1981), nebo tvoří lištovité krystaly zarostlé do masivního křemene ve vnitřních zónách

pegmatitů nebo v jejich jádře (např. v pegmatitu v Hardingu v Novém Mexiku). V petalitových pegmatitech se spodumen vyskytuje v jemnozrnných vláknitých agregátech srostlých s křemenem (tzv. Spodumen-Quartz Intergrowth - SQI) vytvářejících pseudomorfózy po primárním petalitu. Tento spodumen je sekundární a vzniká fázovou přeměnou petalitu.

Čerstvý spodumen má skelný nebo hedvábný lesk, je průsvitný až průhledný, bezbarvý nebo má barvu bílou, šedou až nazelenalou. Drahokamové variety spodumenu hiddenit, triphan a kunzit mají barvu smaragdově zelenou, žlutou, nebo růžovou. Navětralý spodumen má zemitý vzhled a je neprůhledný. Na rozdíl od petalitu a mikroklinu má spodumen prismatickou štěpnost odpovídající klinopyroxenům a vyšší hustotu. Od amblygonitu-montebrazitu se odlišuje prismatickým habitem a vyšší tvrdostí.

Chemismus spodumenu studovali v posledních letech např. FILIP ET AL. (2006), kteří se zaměřili na tři genetické typy spodumenu z 31 různých lokalit: A) primární magmatický spodumen, B) sekundární spodumen vzniklý izochemickým rozpadem petalitu ve stádiu pozdního solidu až subsolidu a C) hydrotermální spodumen z miarolitických pegmatitů. Zjistili, že chemické složení je obecně blízké ideálnímu vzorci (tab. 3). Nižší obsah Al u některých vzorků byl způsoben substitucí Fe (až 0,103 apfu, přičemž většina, 90-94% Fe_{Tot} patřila Fe^{3+}) a u některých vzorků byl vyšší obsah Na (až 0,043 apfu), který substituoval Li na pozici M2. Vyšší obsah Fe byl vázán na primární spodumen (typ A). Sekundární spodumen (typ B) a hydrotermální spodumen (typ C) měly obecně velmi nízké obsahy Fe (0,003-0,009 apfu) s výjimkou spodumenů z pegmatitu Bikita v Zimbabwe (0,052 apfu) a z pegmatitu Stony Point, Alexander Co. ze Severní Karolíny (0,031 apfu). Autoři také ve zkoumaných vzorcích zjistili extrémně nízké obsahy H_2O ve formě OH (0,13-3,78 hm ppm).

Tab. 3 Průměrné chemické složení spodumenu ve hm%. Upraveno podle FILIPA ET AL. (2006).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
64,81	27,20	0,59	0,08	0,01	0,01	7,76	0,17	0,004	0,01

Eukryptit LiAlSiO₄

Je hexagonální aluminosilikát s tvrdostí 6,5, hustotou 2,65 g/cm³ a nedokonalou štěpností. Vytváří obvykle celistvé, jemnozrnné agregáty s křemenem nebo albitem. Krystaly jsou vzácné. Hrubozrnný eukryptit má skelný lesk, jemnozrnné srůsty s albitem jsou matné. Na většině lokalit je eukryptit průsvitný až neprůhledný a má barvu bílou, světle šedou, modrou, růžovou nebo hnědou. Fyzikální vlastnosti jsou podobné vlastnostem křemene, ale od křemene ho lze snadno odlišit růžovou až rudou fluorescencí v krátkovlnném UV záření.

Z trojice lithných aluminosilikátů petalit-spodumen-eukryptit je eukryptit nejméně rozšířeným minerálem. Vyskytuje se nejčastěji společně s albitem jako velice jemnozrnné vláknité agregáty nebo grafické srůsty nahrazující spodumen.

Bikitaitit $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Je vzácný monoklinický lithný aluminosilikát vytvářející pseudorombické krystaly protažené v ose *b*. Má skelný lesk a je čirý nebo mléčně bílý, průsvitný až průhledný. Jeho tvrdost je 6 a hustota $2,32 \text{ g/cm}^3$.

Li-slídy

Lepidolit je označení pro skupinu trioktaedrických monoklinických slíd bohatých lithiem. Koncové členy jsou trilithionit $\text{K}(\text{Li,Al})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F,OH})_2$ a polyolithionit $\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F,OH})_2$. Nejčastěji se vyskytuje v podobě jemnozrnných šupinatých agregátů, méně častěji v hrubozrnných lupenitých agregátech, vzácně v tabulkovitých krystalech. Je bezbarvý až šedavý, nebo může mít růžovou, fialovou, či zelenavou barvu. V pegmatitech se vzácně vyskytují i další Li-slídy bohaté Fe nebo Mn označované dříve jako zinvaldit a masutomilit.

Li-turmalíny $\text{X}(\text{Li,Al})_3 \text{Al}_6 \text{Si}_6 \text{O}_{18} (\text{BO}_3)_3 (\text{OH})_3 \text{W}$

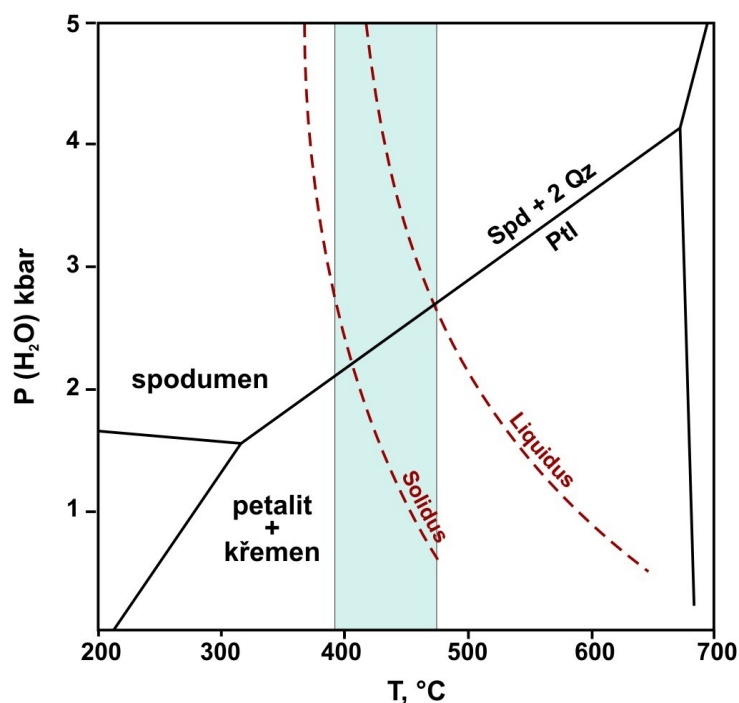
Turmalíny jsou složité borosilikáty krystalizující v trigonální soustavě s tvrdostí přibližně 7,5, hustotou kolem $3,1 \text{ g/cm}^3$ a nedokonalou štěpností. Jejich dobře vyvinuté prismatické krystaly jsou běžnou součástí pegmatitů. V současné době je známo více jak dvacet koncových členů turmalínů (NOVÁK 2012), teoretických koncových členů je mnohem více. Koncové členy Li turmalínů jsou elbait, případně fluor-elbait ($\text{X}=\text{Na}$, $\text{W}=\text{OH}$ resp. F), fluor-liddicoatit ($\text{X}=\text{Ca}$, $\text{W}=\text{F}$), rossmanit ($\text{X}=\text{vakance}$, $\text{W}=\text{OH}$) a darrellhenryit ($\text{X}=\text{Na}$, $\text{W}=\text{O}$). Nejběžnějším Li-turmalínem je zřejmě fluor-elbait. Lithné turmalíny mají řadu různobarevných variet: bezbarvý se označuje jako achroit, rubelit má barvu růžovou až fialovou, verdelit je zelený, indigolit modrý.

Amblygonit-montebrazit $\text{LiAlPO}_4\text{F} - \text{LiAlPO}_4(\text{OH})$

Lithné fosfáty amblygonit a montebrazit tvoří plynulou řadu lišící se poměrem F/OH . Krystalizují v triklinické soustavě, hustotu mají přibližně $3,06 \text{ g/cm}^3$, tvrdost 5,5-6. Tvoří subhedrální krystaly nebo častěji zaoblená zrna ve vnitřních jednotkách pegmatitu nebo v jádru. Jsou průsvitné a mají barvu mléčně bílou, někdy s nádechem do šeda nebo do žluta.

2.4. Petrologické aplikace fázových přeměn petalitu a spodumenu

Lithné aluminosilikáty petalit a spodumen jsou vedle Li-slíd nejčastějšími a nejhojnějšími Li minerály v komplexních Li pegmatitech. V některých případech se mohou vyskytovat společně v jednom pegmatitovém tělese, běžně dokonce na stejném vzorku. Jejich vzájemné rovnovážné vztahy jsou důležité pro pochopení petrogenese lithných pegmatitů a pro určení procesů a izochemických změn, které probíhaly během krystalizace. Podmínky stability v přírodě se vyskytujících Li-aluminosilikátů znázorňuje P-T fázový diagram systému $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, který experimentálně stanovil LONDON (1984) v rozmezí podmínek $340\text{-}950^\circ\text{C}$ a $0,5\text{-}6,0 \text{ kbar}$ (obr. 2).



Obr. 2 Fázový P-T diagram pro systém $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Podle LONDONA (1984). Přerušovanou čarou jsou vyznačeny křivky solidu a likvidu (podle LONDONA 2008)

Fázový diagram systému $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ definuje rovnovážné vztahy mezi eukryptitem, spodumem a petalitem. Stabilita těchto minerálů je v systému saturovaném křemenem pouze funkcí teploty a tlaku a je nezávislá na vlastnostech a vzájemných poměrech ostatních fází v systému. Protože jsou spodumen a petalit relativně hojně se vyskytujícími lithnými minerály a jejich složení je blízké ideálnímu vzorci, lze uplatnit informace o jejich stabilitě na velkém množství lokalit komplexních pegmatitů. Fázový P-T diagram pro systém $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2$ také nabízí vysvětlení pro izochemické nahrazování petalitu spodumem a křemenem podle rovnice $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10} \rightarrow \text{LiAlSi}_2\text{O}_6 + 2 \text{SiO}_2$.

Reakce kolem invariantního bodu Ecr-Spd-Ptl-Qz ($\sim 350^\circ\text{C}$, $\sim 1,5$ kbar) lze využít pro odhadnutí historie krystalizace Li pegmatitů. Reakce $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ odděluje pole pegmatitů se spodumem od pegmatitů pouze s primárním petalitem. Relativní plochost této hranice naznačuje, že uvedená reakce je závislá mnohem více na tlaku, než na teplotě. Jestli jako primární aluminosilikát v pegmatitu vykrytalizuje spodumen nebo petalit bude tedy záviset především na hloubce vzniku pegmatitu. Za vyšších tlaků ($> \sim 3$ kbar) bude vznikat spodumen, za tlaků nižších ($< \sim 3$ kbar) bude vznikat petalit.

Fázové vztahy v systému $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ studoval také KRIVOVIČEV (2004). Pozice jednotlivých reakcí v P-T diagramu stanovil podobně jako LONDON (1984), avšak upozornil na to, že pozice reakcí mohou být závislé také na aktivitě SiO_2 .

NĚMEC (1989) studoval Li pegmatity na přibyslavské mylonitové zóně na Jihlavsku. Zjistil, že primární petalit byl zachován pouze v částech nezasažených tektonikou, zatímco v tektonicky deformovaných částech byl petalit kompletně přeměněn na spodumen-křemenný agregát. NĚMEC (1989) vyvozuje, že mezi ostatními minerály, které se běžně vyskytují v Li pegmatitech, je pouze

petalit citlivý na zvýšení tlaku a proto je nutné při odhadování P-T podmínek podle fázového diagramu pro systém $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ u tektonicky deformovaných pegmatitů brát orientovaný tlak v úvahu.

2.5. Příklady fázových přeměn petalitu a spodumenu

Přeměnu petalitu na spodumen popsali ČERNÝ & FERGUSON (1972) z pegmatitu v Tanco v Manitobě. Autoři zde rozlišili 3 typy spodumenu: A) tabulkovité agregáty tvořené srůsty čirého spodumenu s křemenem (tento typ tvořil až 90% veškerého spodumenu), B) spodumen bílé barvy ve tvaru lišt dlouhých až 1,5 m v křemeni. C) čirý až světle zelený vláknitý až sloupcovitý spodumen velký několik cm.

Vnější tvary spodumenu prvního typu přesně kopírovaly tvary velkých krystalů petalitu. To naznačovalo úzké genetické sepjetí obou minerálů. Tento spodumen, jak autoři prokázali, vznikl alterací petalitu podle rovnice $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$. Mírný přebytek SiO_2 oproti teoretickým předpokladům vysvětlili autoři tím, že sekundárně vzniklý $\text{Spd} + 2 \text{Qz}$ vykazuje menší objem než původní petalit a rozdíl v objemu byl vyrovnán přínosem SiO_2 .

Spodumen vzniklý přeměnou petalitu popsali CHAKOUMAKOS & LUMPKIN (1990) z pegmatitu v Hardingu v Novém Mexiku. Spodumen se zde vyskytuje ve třech litologicky odlišných jednotkách. Převážná část spodumenu se objevuje v zóně křemen-spodumenové, kde vytváří dlouhé euhedrální lištovité krystaly zarostlé v křemeni. Směrem do středu pegmatitu následuje mikroklin-spodumenová zóna, ve které je spodumen v podobě nepravidelných krystalů srostlých po okrajích s mikroklinem. Třetí, nejméně častý výskyt spodumenu je v albit-aplitické jednotce, kde spodumen tvoří symplektické srůsty s křemenem vzniklé přeměnou petalitu. Uvedená stavba pegmatitu nasvědčuje, že krystalizace Li-aluminosilikátů probíhala těsně nebo přímo na hranici mezi petalitem a spodumenem. Z počátku, po relativně krátkou dobu krystalizoval jako primární aluminosilikát petalit. Poté se změnil podmínky a po zbytek krystalizace vznikl již jen spodumen (CHAKOUMAKOS & LUMPKIN 1990).

Produkty alterace spodumenu a příslušné izochemické reakce popsali LONDON & BURT (1982A) také z pegmatitu White Picacho v Arizoně. Jedná se o reakce, kdy je spodumen za účasti křemene nebo křemene + albitu nahrazován jemnozrnnými srůsty eukryptitu a albitu, přičemž eukryptit se dále rozkládá na Li-muskovit nebo lepidolit, a zbylý spodumen a sekundární albit bývají nahrazeny Li-muskovitem nebo lepidolitem. Někdy se spodumen rozpadá přímo na albit nebo na muskovit + albit nebo na čistý muskovit.

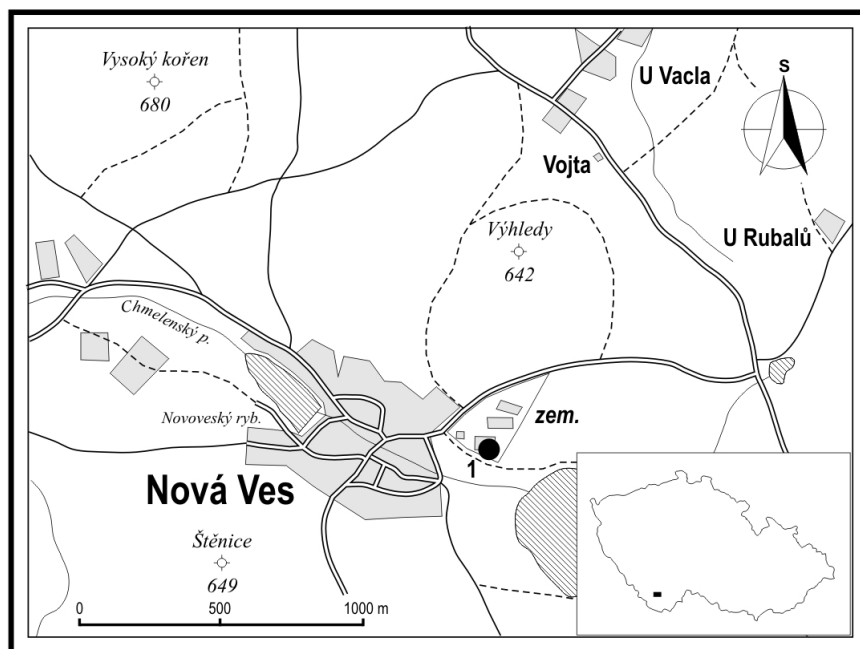
Komplikované vztahy mezi spodumenem a petalitem popsali CHAROY ET AL. (2001) v hrubých a jen jednoduše zonálních pegmatitech v Covas de Barroso v severním Portugalsku. Autoři zjistili, že ve studovaných pegmatitech spodumen krystalizoval z časně magmatické fáze, zatímco petalit vznikl v pozdější etapě z fluidní fáze. Spodumen zůstal stabilní nebo metastabilní. Vznik fluid, ze kterých se vysrážel petalit, autoři připsali náhlému poklesu tlaku, pravděpodobně v důsledku tektonické události. Primární spodumen byl následně nahrazován hlavně albitem a muskovitem, petalit K-živcem a eukryptitem.

3. Studované komplexní (Li) pegmatity

V současné době jsou v rámci moldanubika známy čtyři pegmatity s výskytem petalitu. Jedná se o pegmatity u Nové Vsi u Českého Krumlova, Chvalovic, Jeclova a Puklic u Jihlavy (NOVÁK 2005). V pegmatitu u Dobré Vody u Velkého Meziříčí byl nalezen spodumen-křemenný agregát, který nepochybně vzniknul přeměnou petalitu (NOVÁK & STANĚK 1999), primární petalit, nebo reliktů po něm, však nalezeny nebyly. Podobně byl nalezen spodumen také v pegmatitu u Panské Lhoty u Jihlavy. Také v tomto případě se LAŠTOVIČKA (1970) domnívá, že spodumen vznikl přeměnou primárního petalitu, přestože primární petalit nalezen nebyl. Na Žižkově vrchu u Sušice byl na konci 19. století nalezen pegmatit se spodumem. Spodumen nebyl podrobněji studován, takže není zcela jasné, zda se jedná o primární nebo sekundární spodumen. Patrně zvláštní postavení má mylonitický petalit-spodumenový pegmatit od Rožmberka nad Vltavou popsany VRÁNOU (2013).

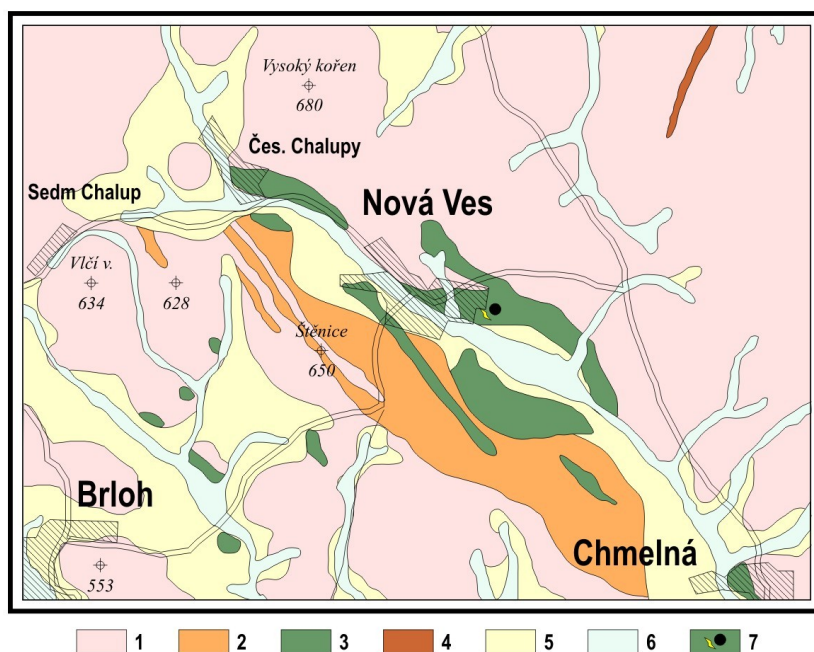
3.1 Nová Ves u Českého Krumlova

Novoveský pegmatit je situován v areálu zemědělského družstva na jv. okraji obce Nová Ves (okres Český Krumlov), asi 15 km z. od Českých Budějovic a 15 km s. od Českého Krumlova (obr. 3).



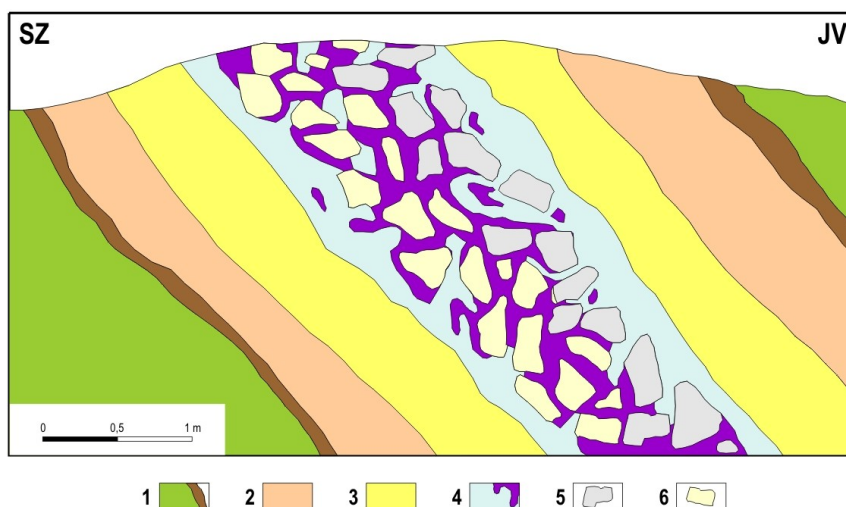
Obr. 3 Topografická situace pegmatitu u Nové Vsi. 1 – pozice pegmatitu.

Skalní podklad zájmového území tvoří granulitový masív Blanského lesa náležící ke gfohlské jednotce šumavské části moldanubika. Vedle granulitů se zde hojně vyskytují menší tělesa serpentinitů, amfibolitů a eklogitů. Vlastní pegmatit je žilné těleso směru SZ-JV o délce asi 85 m a mocnosti 20-21 m (NOVÁK 1981), které proniká okolním serpentinitem (obr. 4).



Obr. 4 Geologická situace širšího okolí novoveského pegmatitu (podle KODYMA ET AL. 1982).
 Legenda: 1 – granulity; 2 – pararuly; 3 – serpentinity; 4 – žilné syenity; 5 – svahové hlíny, písky; 6 – nivní sedimenty; 7 – Li-pegmatit.

Pegmatit má výraznou zonální stavbu, ve které GRYM (1975) rozlišil od okraje do středu následující jednotky: granitická jednotka, grafická jednotka, muskovit-albitová jednotka, albit-lepidolitová jednotka a jádro tvořené blokovým K-živcem a petalitem (obr. 5). Jednotky se liší jak minerálním (chemickým) složením, tak texturou a velikostí zrn. U novoveského pegmatitu chybí křemenné jádro, které je jinak pro granitické pegmatity typické.



Obr. 5 Idealizovaný příčný řez Li-pegmatitem v Nové Vsi (podle GRYMA 1975).
 Legenda: 1 – serpentinit s flogopitovým reakčním lemem; 2 – granitický pegmatit; 3 – hrubozrný pegmatit místy s grafickými srůsty K-živce a křemene; 4 – albit-lepidolitový pegmatit (fialově lepidolit); 5 – blokový živec; 6 – blokový petalit.

NOVÁK (2005) zařadil pegmatit v Nové Vsi k petalitovému subtypu, resp. k přechodu mezi lepidolitovým a petalitovým subtypem. Jeho vnitřní stavba, mineralogie a chemické složení minerálů se velmi podobá lepidolitovým pegmatitům, od kterých se liší nižší aktivitou F, takže vedle lepidolitu vznikl petalit. Relativně hojný výskyt polucitu dokladuje vysoký stupeň jeho frakcionace (NOVÁK 2005).

Novoveský pegmatit obsahuje běžné minerály pegmatitů křemen, plagioklas, K-živec, granát, muskovit, biotit a apatit.

Z lithných aluminosilikátů je nejhojnější petalit, který je vázán výhradně na blokovou zónu. Jeho zrna dosahují velikosti až 25 x 15 cm (WELSER ET AL. 2007) a jsou buď čirá se skelným leskem, nebo jsou přeměněná na jemnozrné zemité agregáty, které částečně nebo úplně zatlačují původní petalitová zrna. Spodumen se vyskytuje jako žlutobílá křemen-spodumenové agregáty (SQI), ve kterých je přítomen v podobě drobných jehlicovitých krystalů. Je produktem sekundární přeměny petalitu (WELSER ET AL. 2007).

Lepidolit se vyskytuje ve dvou typech. Prvním typem, v pegmatitu převažujícím, je růžový až fialový lepidolit v podobě žilek a šupinatých nebo celistvých agregátů, který je svým složením blízký trilithionitu. Druhým typem je bezbarvý hrubozrný lupenitý lepidolit bohatý Cs a Rb, jehož složení je blízké polyolithionitu (WELSER ET AL. 2007).

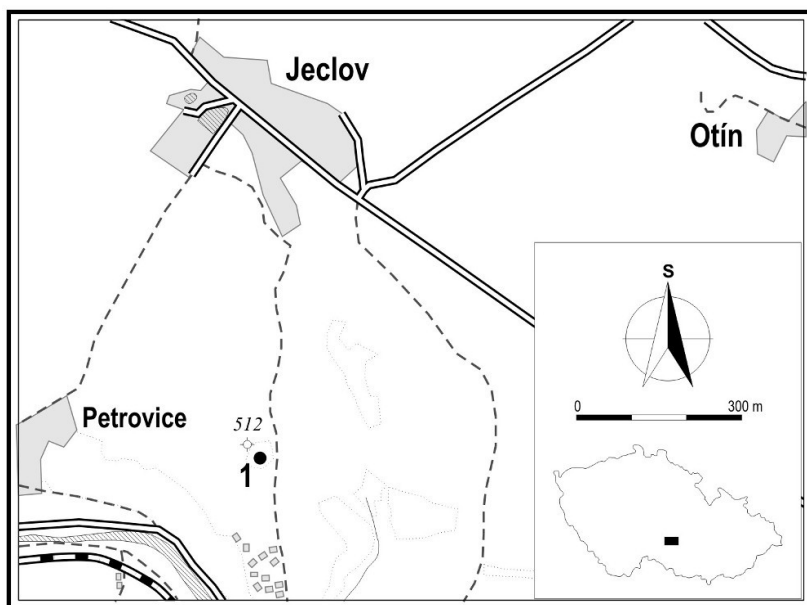
Z turmalínů je běžný skoryl a elbait (rubelit, verdelit, indigolit). Poprvé na světě byl z novoveského pegmatitu popsán nový minerál ze skupiny turmalínu darrellhenryit (NOVÁK ET AL. 2013), pro který je Nová Ves typovou lokalitou a je na lokalitě poměrně hojný.

Amblygonit-montebrazit se vyskytuje nejméně ve dvou generacích (WELSER ET AL. 2007). Starší amblygonit vznikl jako součást lithné fáze blokové jednotky spolu s petalitem, mladší je spojen se vznikem lepidolitu. Štěpná bělavá zrna amblygonitu nepřesahují velikost 3 cm.

V asociaci s namodralým cleavelanditem, bezbarvým polyolithionitem a darrellhenryitem se vyskytuje polucit jako produkt nejvyššího stupně geochemické frakcionace pegmatitu. Tvoří bezbarvá nebo bělavá zrna a zrnité agregáty do velikosti max. 25 cm (WELSER ET AL. 2007). V albit-lepidolitové jednotce se vyskytuje beryl v podobě krátce sloupcovitých krystalů a izometrických zrn. Je buď bezbarvý nebo zelenožlutý. Dalším silikátem Be v novoveském pegmatitu je vzácný milarit, který tvoří agregáty jehlicovitých až dlouze sloupcovitých krystalů hexagonálního průřezu dosahujících délky až 7 mm. Na albit-lepidolitovou jednotku je vázán také výskyt dalších vzácnějších minerálů jako jsou kasiterit, zirkon, mikrolit a minerály skupiny columbitu. Kasiterit vystupuje v podobě hnědočerných zrn nebo tabulek do 2 cm. Zirkon tvoří zrna nebo dypiramidální krystaly do 2 mm hnědé barvy. Mikrolit, který byl poprvé na území naší republiky popsán právě z pegmatitu v Nové Vsi (ČECH & STANĚK 1960), tvoří žlutohnědá zrna a oktaedrické krystaly do 5 mm. Minerály skupiny columbitu odpovídají svým chemickým složením columbitu-(Fe) až columbitu-(Mn). Vyskytuje se v podobě černých, kovově lesklých tabulkovitých krystalů do 30 mm (WELSER ET AL. 2007).

3.2 Jeclov u Jihlavy

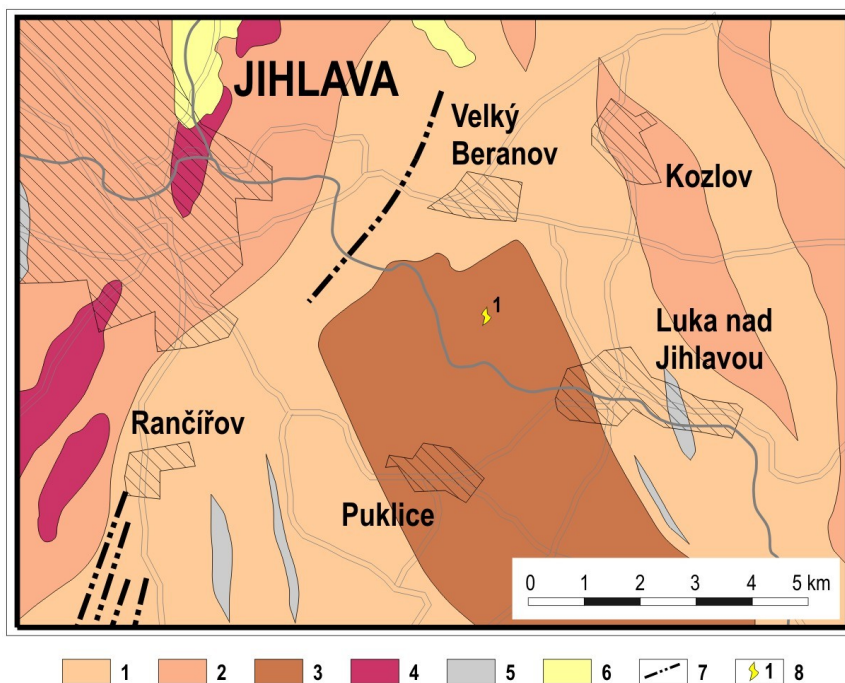
Pegmatit u Jeclova (Jeclov I) je jedním z nejvíce diferencovaných pegmatitů v jihlavském pegmatitovém okrsku (STANĚK 1962). Pegmatit náleží k lepidolitovému subtypu, ale obsahuje podstatné množství petalitu. Mineralogickým složením je podobný pegmatitu v Nové Vsi.



Obr. 6 Topografická situace pegmatitu u Jeclova. 1 – pozice pegmatitu.

Pegmatit vystupuje na návrší 0,5 km j. od obce (obr. 6). Žíla o mocnosti 6 m a směru Z-V protíná rulovou obálku jihlavského durbachitového masívu nacházejícího se na přibyslavské mylonitové zóně (obr. 7). Vzhledem k tomu je pegmatit silně tektonicky postižen (NĚMEC 1989).

Pegmatit vykazuje zřetelnou symetrickou zonálnost. Od vnějšího okraje směrem do středu lze rozlišit granitickou jednotku a hrubozrnnou jednotku s muskovitem a turmalínem a s partiemi grafického pegmatitu. Centrální část tvoří blokový K-živec s blokovým petalitem, částečně nahrazeným jemnozrnným spodumen-křemenným agregátem s milimetrovými žilkami pollucitu (NĚMEC 1989). Jádro je penetrováno albit-lepidolitovou jednotkou, jejíž vnější, albitem bohatší část, sestává z hrubozrnného albitu, muskovitu, turmalínu (skorylu, elbaitu) a granátu. Akcesoriemi jsou kasiterit, beryl, apatit, löllingit, manganocolumbit a zirkon. Část bohatší lepidolitem sestává z lepidolitu, albitu, křemene, zonálního elbaitu (růžového až červeného) a amblygonitu-montebrasitu s lacroixitem. Poněkud vzácnějšími jsou beryl, topaz a kasiterit (NĚMEC 1989).

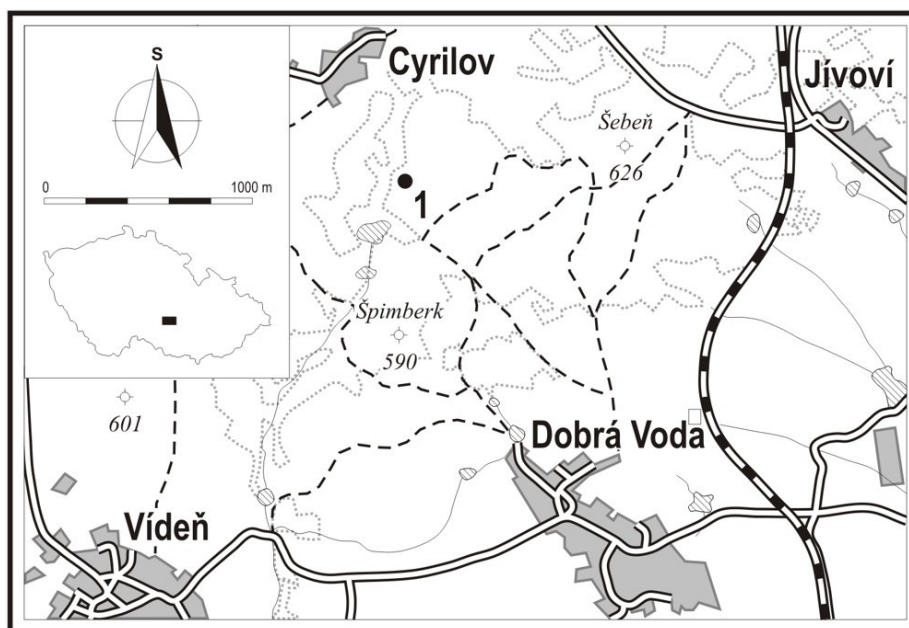


Obr. 7 Geologická situace širšího okolí pegmatitu u Jeclova (podle Beneš et al. 1996)

Legenda: 1 – pararuly; 2 – migmatity; 3 – durbachity; 4 – granity; 5 – kvarcity; 6 – písky a štěrky; 7 – drcená (mylonitová) pásma; 8 – pegmatit.

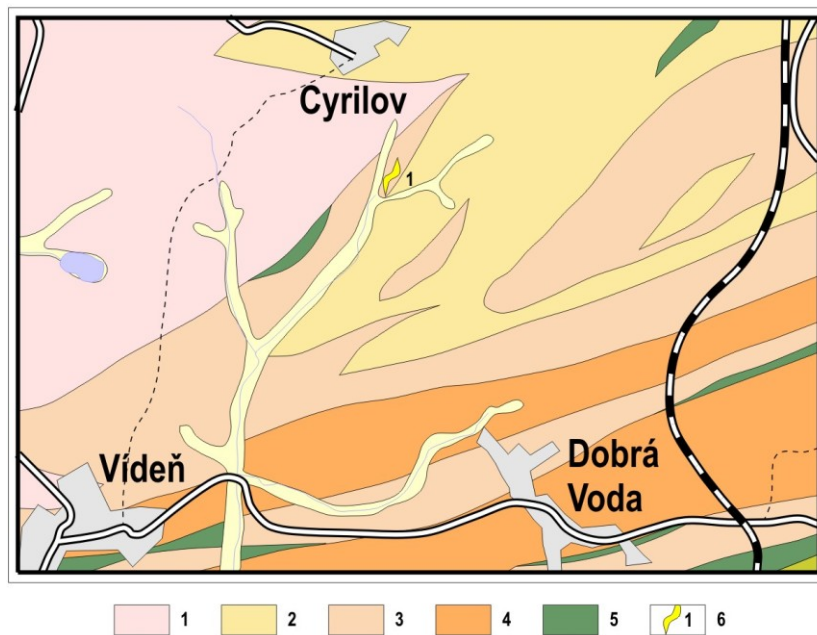
3.3 Dobrá Voda u Velkého Meziříčí

Pegmatit u Dobré Vody detailně zpracovali NOVÁK & STANĚK (1999). Pegmatit je situován v oblasti strážeckého moldanubika, v lese 0,5 km jjv. od Cyrilova a 2 km ssz. od Dobré Vody (obr. 8). NOVÁK (2005) řadí dobrovodský pegmatit k lepidolitovému subtypu.



Obr. 8 Topografická situace pegmatitu u Dobré Vody. 1 – pozice pegmatitu.

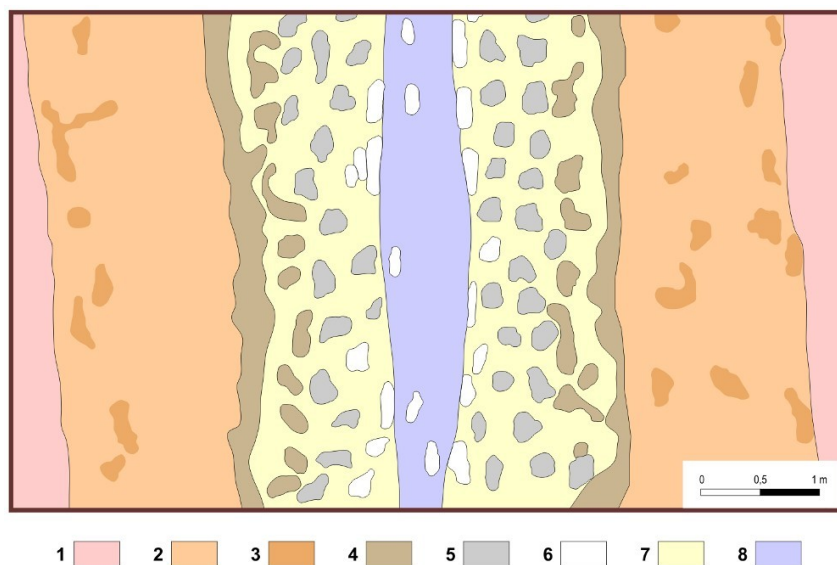
Skalní podklad tvoří styk biotitických pararul s amfibolitem, na sz. okraji pegmatitu vystupují různé typy granulitů a granulitových rul borského granulitového tělesa. Dále k sz., ve vzdálenosti asi 6 km, leží jz. okraj třebičského durbachitového masívu (obr. 9).



Obr. 9 Geologická situace širšího okolí pegmatitu u Dobré Vody (upraveno podle on-line stránek ČESKÉ GEOLOGICKÉ SLUŽBY 2015).

Legenda: 1 – granulit; 2 – migmatit; 3 – rula; 4 – pararula; 5 – amfibolit; 6 – pegmatit.

Pegmatitové těleso o mocnosti až 6 m je dlouhé asi 100 m a je orientované ve směru SSZ-JJV. Idealizovaný řez tělesem je znázorněn na obr. 10.



Obr. 10 Idealizovaný příčný řez Li-pegmatitem u Dobré Vody (podle STAŇKA 1969).

Legenda: 1 – okolní horniny; 2 – granitický pegmatit; 3 – granitický aplit; 4 – grafický pegmatit; 5 – blokový živec; 6 – blokový křemen; 7 - albit; 8 - lepidolit.

Vnější okraj pegmatitové žíly tvoří drobně až hrubě zrnitá granitická jednotka, místy s aplitickými partiemi, dále směrem do středu následují grafická jednotka, hrubozrnná albitová jednotka s lepidolitem, elbaitem, skorylem, manganocolumbitem, kasiteritem, vzácným zirkonem, topazem a amblygonitem a centrální část žíly tvoří lepidolitová jednotka.

Hlavním nositelem lithia v pegmatitu je lepidolit a to jak trilithionit, který je poněkud hojnější, tak i polyolithionit. Hojnými jsou i Li turmalíny, především elbait v krystalech dlouhých až 8 cm, vyskytující se v albitové jednotce i v centrální lepidolitové jednotce. Vedle elbaitu se v dobrovodském pegmatitu vzácně vyskytuje také rossmanit a to ve vnější části albitové jednotky (NOVÁK & STANĚK 1999).

Minerály skupiny amblygonitu-montebrazitu jsou po elbaitu nejrozšířenějšími Li-minerály. Vyskytují se v partiích albitové jednotky v podobě protáhlých zrn až 2 cm velkých nebo jako srůsty nedokonale vyvinutých krystalů velké až 10 cm.

Spodumen v podobě spodumen-křemenného agregátu (SQI) se vyskytoval ve spodních partiích albitové jednotky. Vznikl přeměnou primárního petalitu. Byl zjištěn ve dvou morfologicky odlišných typech. Spodumen I tvoří sloupcovitá a stejně orientovaná zrna až několik mm velká v křemenu. Spodumen II tvoří vláknité agregáty složené z jehliček až 3 mm dlouhých, místy tvořící kompaktní shluky. Relikty petalitu nebyly dosud zjištěny, i když je podle stavby SQI nepochybné, že primárním minerálem byl petalit, dosahující velikosti až kolem 10 cm (NOVÁK & STANĚK 1999).

4. Metodika

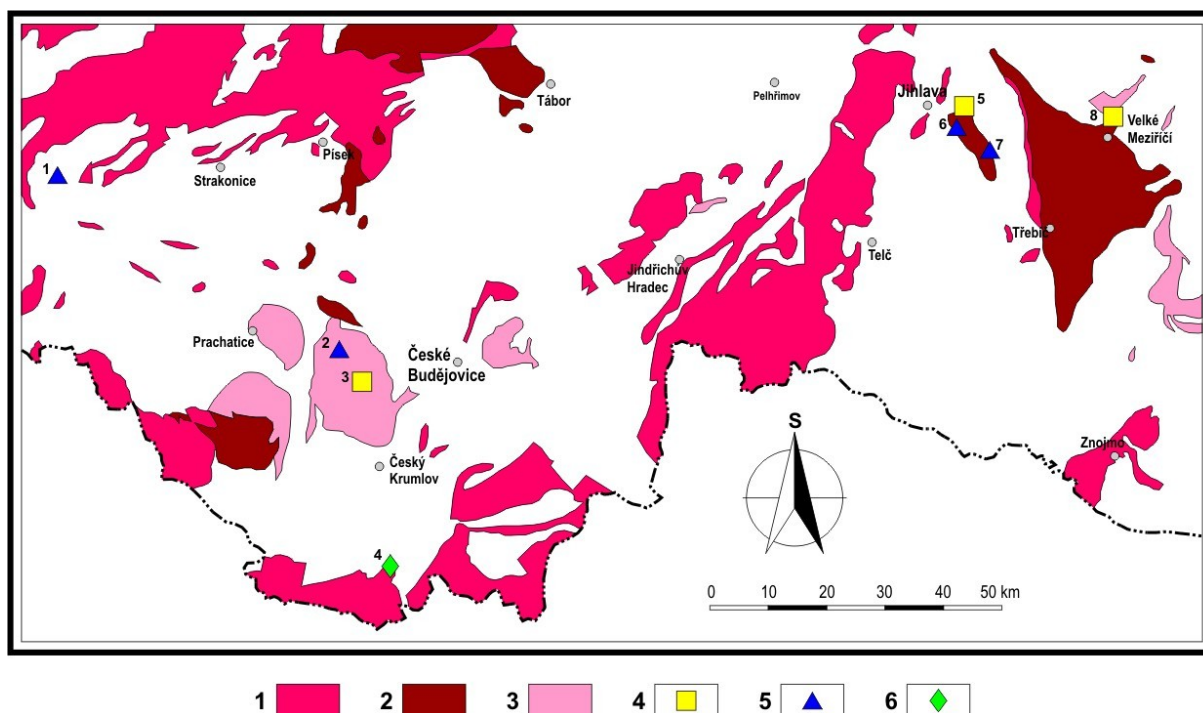
Ze studovaných vzorků byly zhotoveny výbrusy, které byly analyzovány na elektronové mikroskopě Cameca SX 100, na společném pracovišti Ústavu geologických věd, PřF MU a ČGS v Brně. Urychlovací napětí – 15 kV a proud svazku 10 nA, průměr svazku 2 μm (petalit a spodumen z Jeclova a z Dobré Vody), 3 μm (petalit a spodumen z Nové Vsi), 4 μm (slídy a ostatní minerály) a 5 μm (turmalín). Byly použity následující standardy: spessartin (Si, Al, Mn), sanidin (K), albit (Na), wollastonit (Ca), almandin (Fe), pyrop (Mg), gahnit (Zn), Ni_2SiO_4 (Ni), chromit (Cr), titanit (Ti), fluorapatit (P), vanadinit (Cl), topaz (F), baryt (Ba) SrSO_4 (Sr) a ScVO_4 (V). Načítací časy byly 10 s pro hlavní prvky a 20 – 40 s pro minoritní a stopové prvky.

Vzorky z Nové Vsi a z Dobré Vody byly podrobeny též studiu na katodové luminiscenci s horkou katodou na přístroji Simon-Neuser, typ HC2 na pracovišti Ústavu geologických věd. Snímky CL byly pořízeny fotoaparátem Olympus C5060WZ.

5. Výsledky studia

Pro studium alterací petalitu byly zvoleny lokality, které v maximální míře reprezentují Li-pegmatity celého moldanubika. Vzorky z pegmatitu u Sušice se nepodařilo vzhledem k velkému časovému odstupu od nalezení pegmatitu zajistit. Z šumavské části moldanubika byl zvolen pegmatit u Nové Vsi, z jihlavského pegmatitového okrsku pegmatit u Jeclova a z okolí Velkého Meziříčí pegmatit u Dobré Vody. Výběr lokalit tak reprezentuje oblast moldanubika o rozměrech přibližně 150 x 60 km.

Distribuce moldanubických pegmatitů s Li-aluminosilikáty je vyznačena na obr. 11.



Obr. 11 Distribuce pegmatitů s Li-aluminosilikáty v rámci moldanubika.

Legenda: 1 – granity a granodiority; 2 - syenodiority (durbachity); 3 - granulity; 4 - studované pegmatity; 5 - ostatní pegmatity s Li-aluminosilikáty; 6 - mylonitický petalit-spodumenový pegmatit.

Lokality: 1 - Sušice; 2 - Chvalovice; 3 - Nová Ves; 4 - Rožmberk; 5 - Jeclov; 6 - Puklice; 7 - Panská Lhota; 8 - Dobrá Voda.

5.1 Makroskopický popis studovaných vzorků

Celkem bylo studováno šest vzorků. Dva vzorky z pegmatitu u Nové Vsi (Nv1, Nv2), dva vzorky z Jeclova (Je1, Je2) a dva vzorky z pegmatitu u Dobré Vody (Dv1, Dv2).

Vzorek Nv1 je agregát šedofialového jemnozrného lepidolitu o rozměrech 8 x 6 cm se zrny bělavého petalitu o velikosti do 3 cm. Petalit makroskopicky neporušený zůstal zachován pouze v centrální části zrn, po okrajích zrn je petalit přeměněn na jemnozrnou zemitou hmotu. Vzorek Nv2 je agregát o rozměrech 5 x 5 cm obsahující šedofialový jemnozrný lepidolit, zrna křemene do 1 cm,

růžové turmalíny, lupeny slídy do 5 mm a protažené zrno petalitu o rozměrech 4 x 1 cm. I v tomto případě je petalit přeměněn na jemnozrnnou zemitou hmotu s lištami makroskopického křemene dlouhými max. 1 cm.

Vzorek Je1 o rozměrech 5 x 5 cm je tvořen bělavým cukrovitým albitem, zemitým rozpadavým petalitem a jemnozrnným fialovým lepidolitem. Lepidolit v sobě uzavírá žlutobílé zrno amblygonitu 0,5 x 1 cm. Vzorek Je2 o rozměrech 5 x 4 cm je tvořen jemnozrnným šedofialovým lepidolitem, namodralým cleavelanditem 2 x 2 cm a šedobílým petalitem s protaženými zrny křemene do 1 cm.

Vzorky Dv1 a Dv2 tvoří žlutobílý spodumen-křemenný agregát. Vzorek Dv1 je jemnozrnný, na vzorku Dv2 tvoří křemen lišty do 2 cm. Přítomen je jemnozrnný muskovit a lístky lepidolitu do 1 cm.

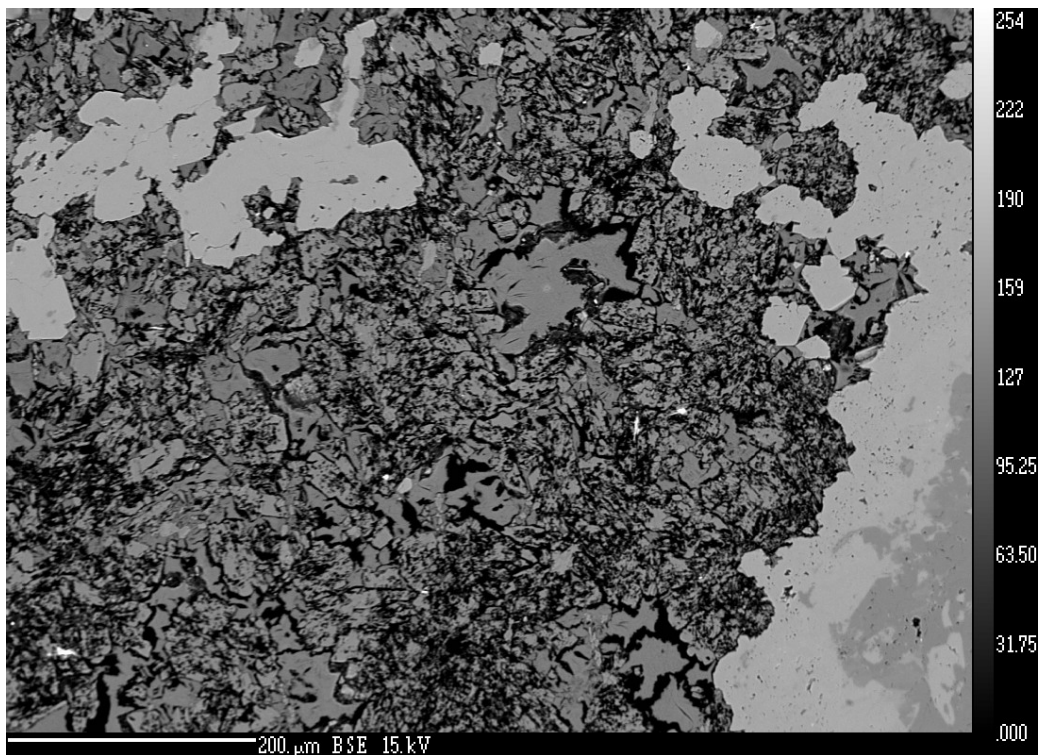
5.2 Studium na elektronové mikrosondě

Vzorek Nv1 se ukázal pro studium vzájemných vztahů mezi petalitem, spodumem a křemenem jako nevhodný, protože obsahoval pouze velmi jemnozrnnou směs minerálů, vzniklou polyfázovým zatlačením petalitu (obr. 12). Převládaly K-živce, místy se zvýšeným obsahem Ba, dále vzácný baryt, Ba-zeolity a jílové minerály. Podobně nevhodný byl vzorek Je1, který byl tvořen tektonizovaným jemnozrnným spodumen-křemenným agregátem spolu s jemnozrnným petalitem (obr. 18).

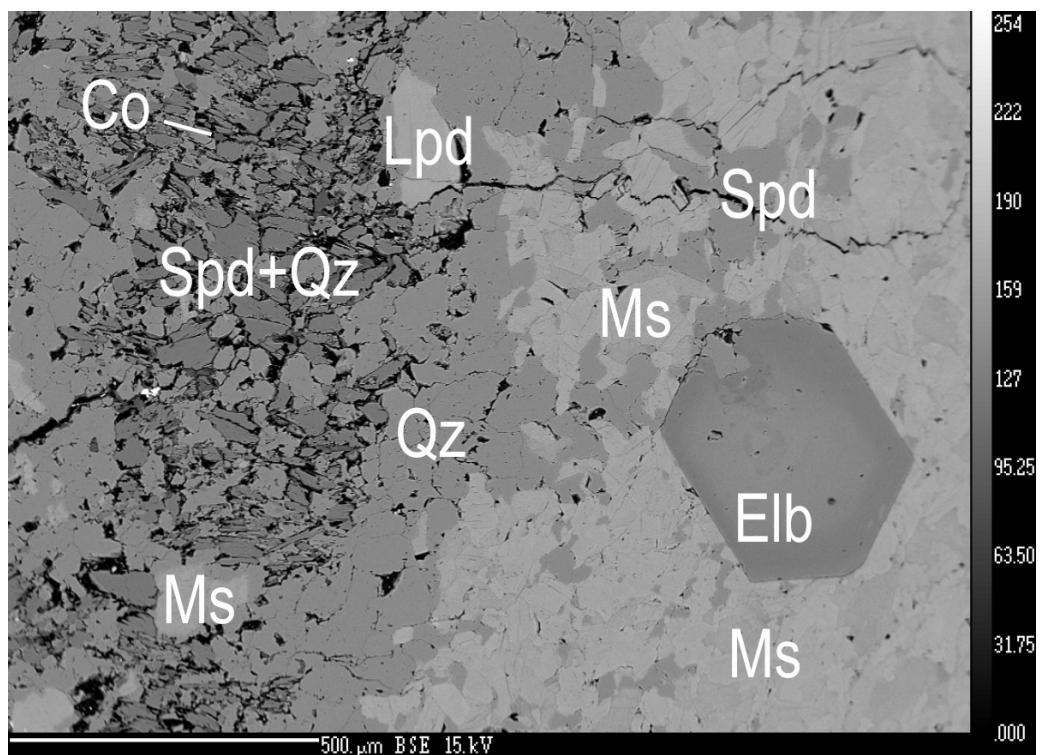
BSE snímky vzorku Nv2 jsou na obrázcích 13-17. Na vzorku jsou v převážné míře zastoupena anherdální zrna spodumenu a křemene v podobě jemně (obr. 13) až středně zrnitého spodumen-křemenného agregátu SQI. Hranice mezi zrny spodumenu a křemene je ostrá. Spodumen-křemenný agregát je silně porézní (například obr. 14, 16 a 17). Póry o rozměrech až ~ 30x40 μm jsou soustředěny hlavně na kontaktech mezi jednotlivými zrny spodumenu a křemene. Kromě spodumenu a křemene byly ve vzorku identifikovány drobné, zaoblené, ostře ohraničené inkluze petalitu o velikosti ~ 17-30 μm (obr. 14-17), a to hlavně v křemeni, výjimečně ve spodumenu (obr. 17). Pokud se petalit nalézá v křemeni, pak je situován vždy do těsné blízkosti spodumenu. Dále byl ve vzorku Nv2 identifikován turmalín v podobě euhedrálního zonálního zrna hexagonálního průřezu uzavřeného v jemnozrnném muskovitu (obr. 13), slídy zastoupené trilitem a muskovitem (obr. 13 a 17) a vzácný cookeit (obr. 13). Chemické analýzy petalitu, spodumenu, slíd a turmalínu jsou uvedeny v tabulkách 4, 5, 6 a 7.

BSE snímky vzorku Je2 jsou na obr. 19 a 20. Podobně jako vzorek Nv2 je i vzorek Je2 tvořen charakteristickým spodumen-křemenným agregátem SQI, silně porézním, a rovněž na tomto vzorku byly identifikovány inkluze petalitu o velikosti až ~ 30 μm.

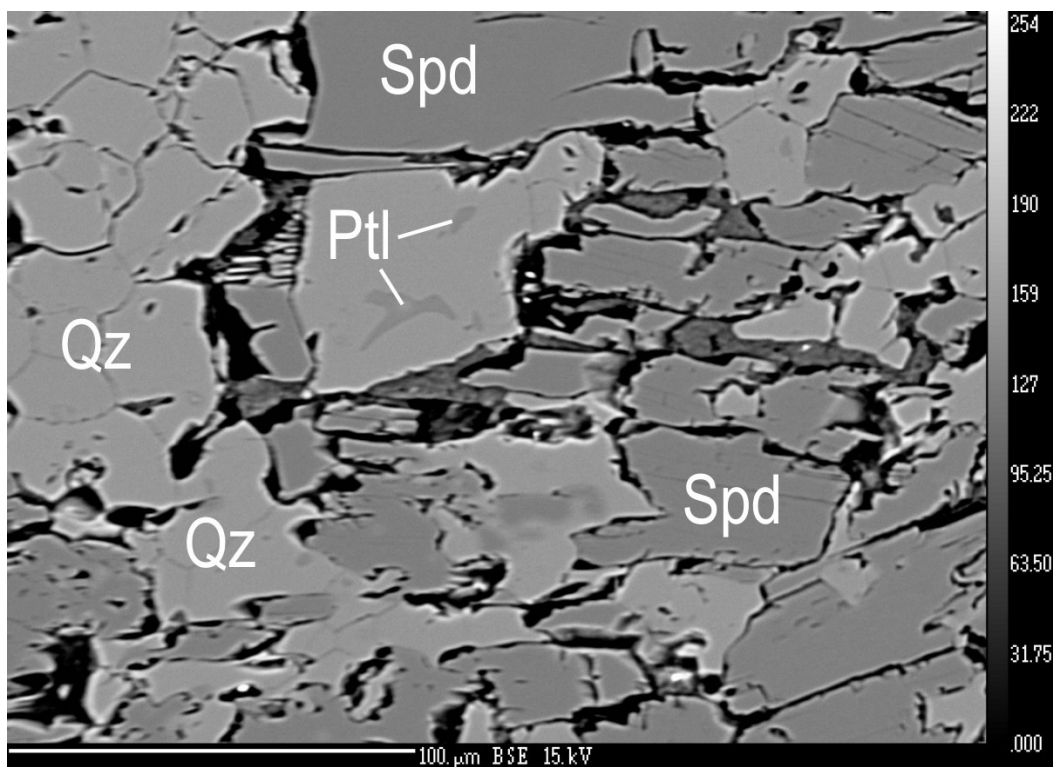
Na obr. 21-24 jsou BSE snímky vzorku Dv2. Ani tento vzorek se neliší od předchozích. Póry mezi krystaly spodumenu na obr. 22 dosahují velikosti až ~ 30x50 μm. V blízkosti spodumenu se vyskytují inkluze petalitu do velikosti ~ 15 μm. Spodumen na obr. 24 vlevo je v podobě dlouze lištovitých krystalů uspořádaných do vějířovitého agregátu.



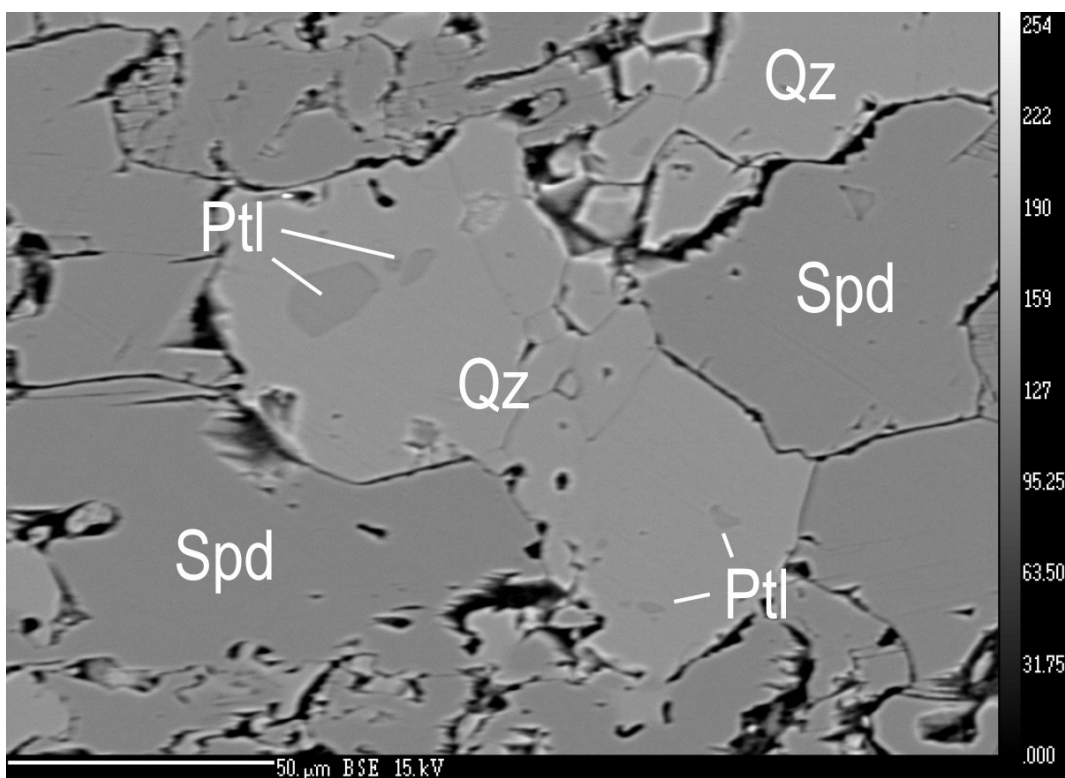
Obr. 12 BSE fotografie vzorku Nv1 z pegmatitu u Nové Vsi
 Jemnozrný agregát tvořený živcem, barytem, Ba-zeolity a jílovými minerály.



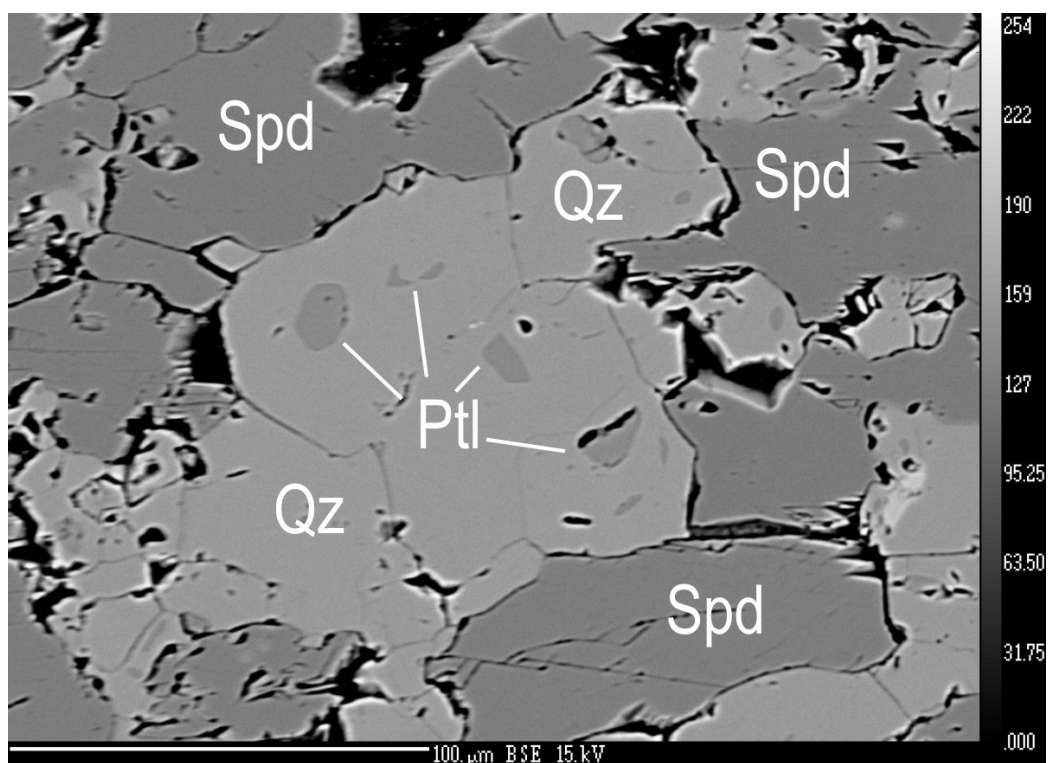
Obr. 13 BSE fotografie vzorku Nv2 z pegmatitu u Nové Vsi
 Spd - spodumen; Qz - křemen; Lpd - lepidolit; Ms - muskovit; Elb - elbait; Co - cookeit.



Obr. 14 BSE fotografie vzorku Nv2 z pegmatitu u Nové Vsi
 Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.

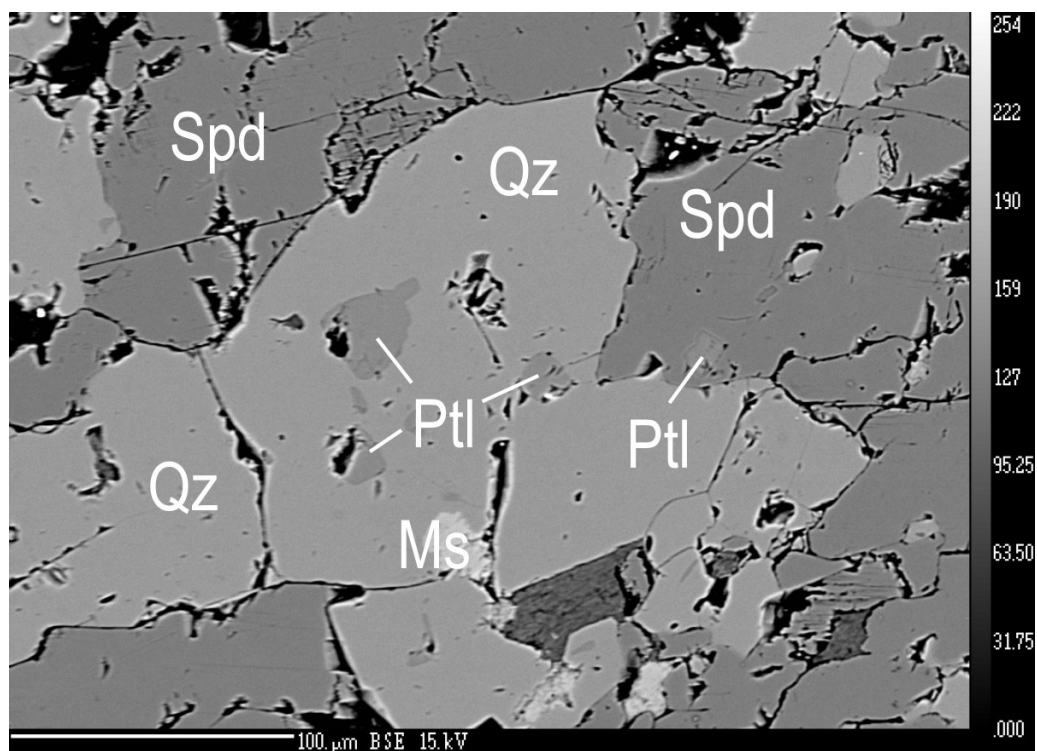


Obr. 15 BSE fotografie vzorku Nv2 z pegmatitu u Nové Vsi
 Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.



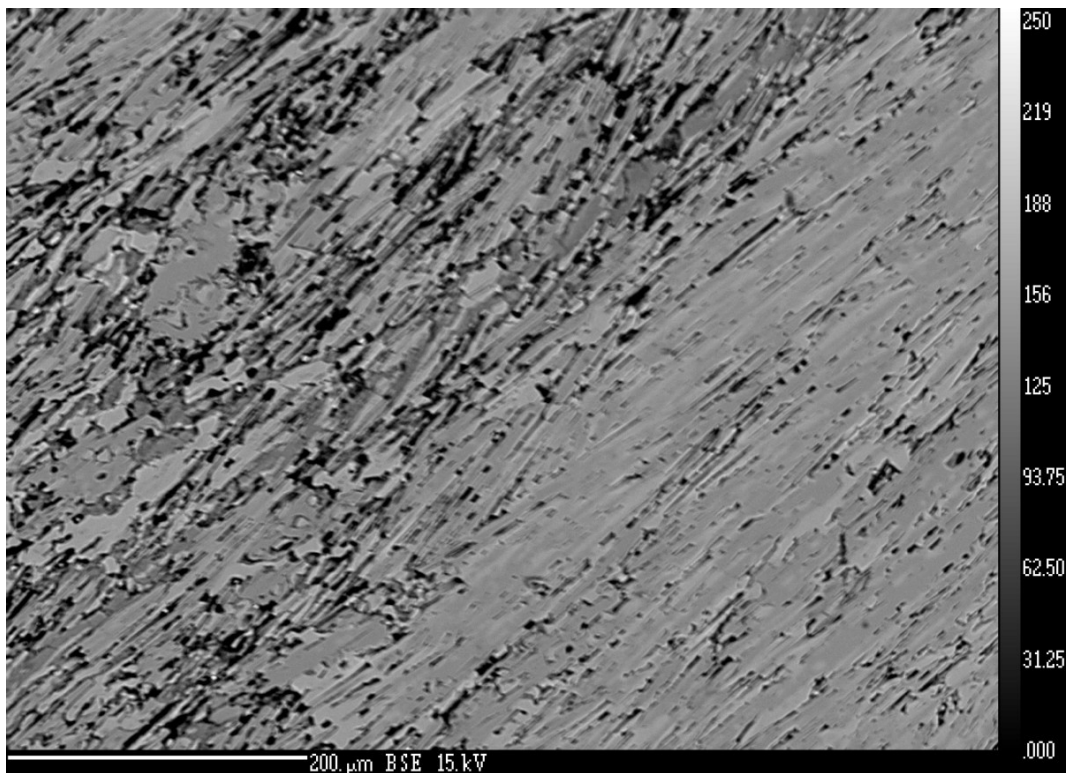
Obr. 16 BSE fotografie vzorku Nv2 z pegmatitu u Nové Vsi

Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.

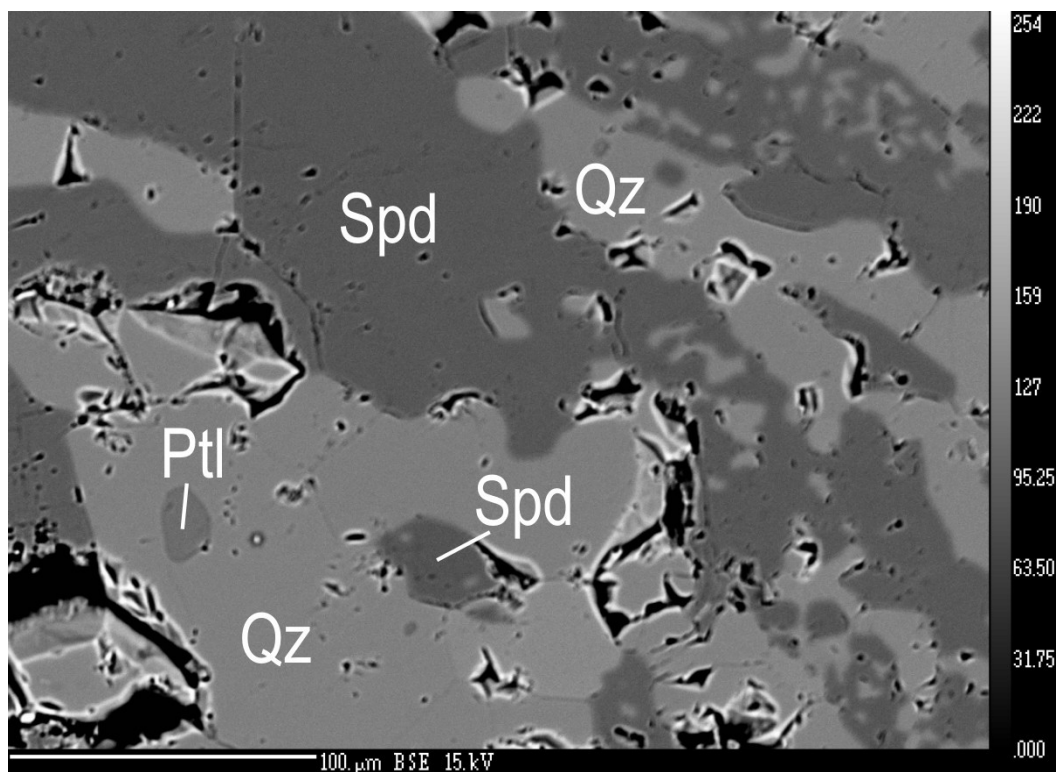


Obr. 17 BSE fotografie vzorku Nv2 z pegmatitu u Nové Vsi

Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl – petalit, Ms – muskovit.

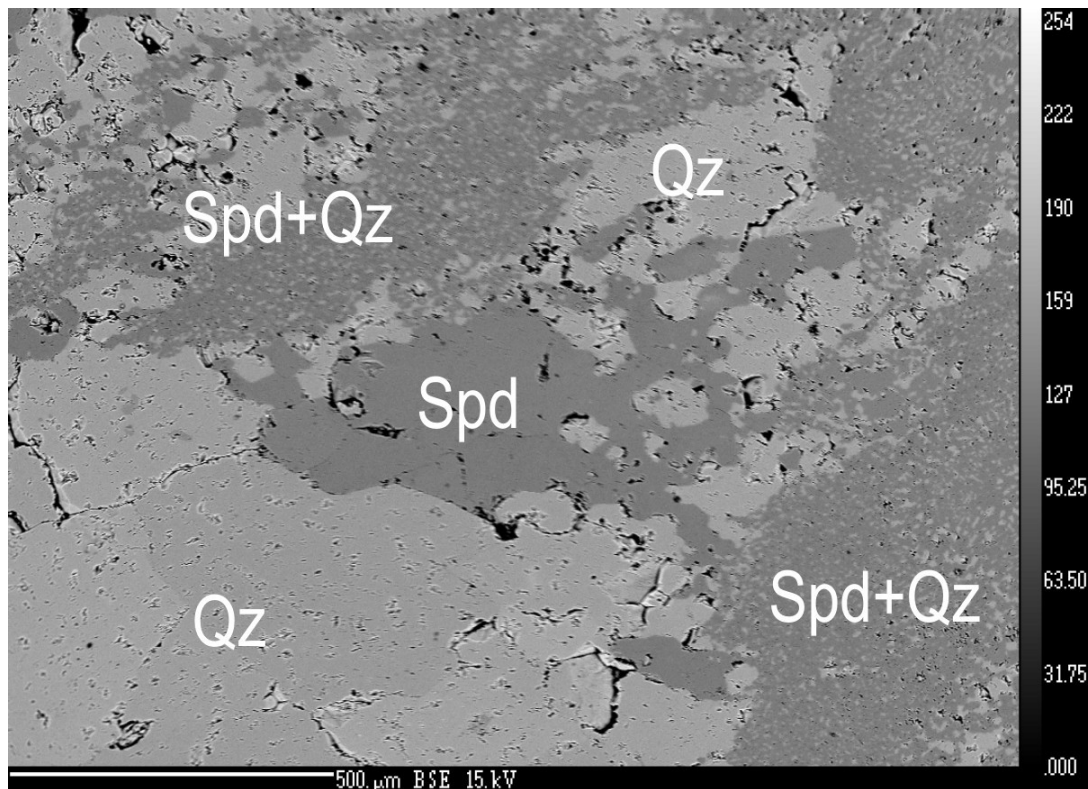


Obr. 18 BSE fotografie vzorku Je1 z pegmatitu u Jeclova



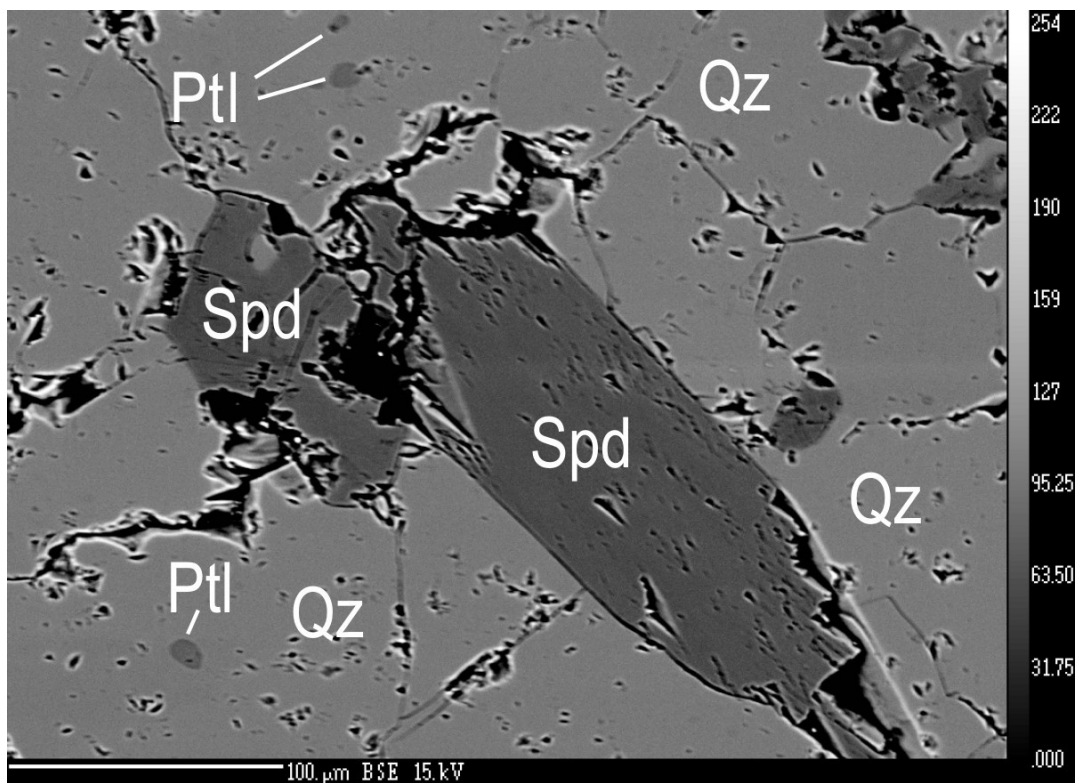
Obr. 19 BSE fotografie vzorku Je2 z pegmatitu u Jeclova

Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.



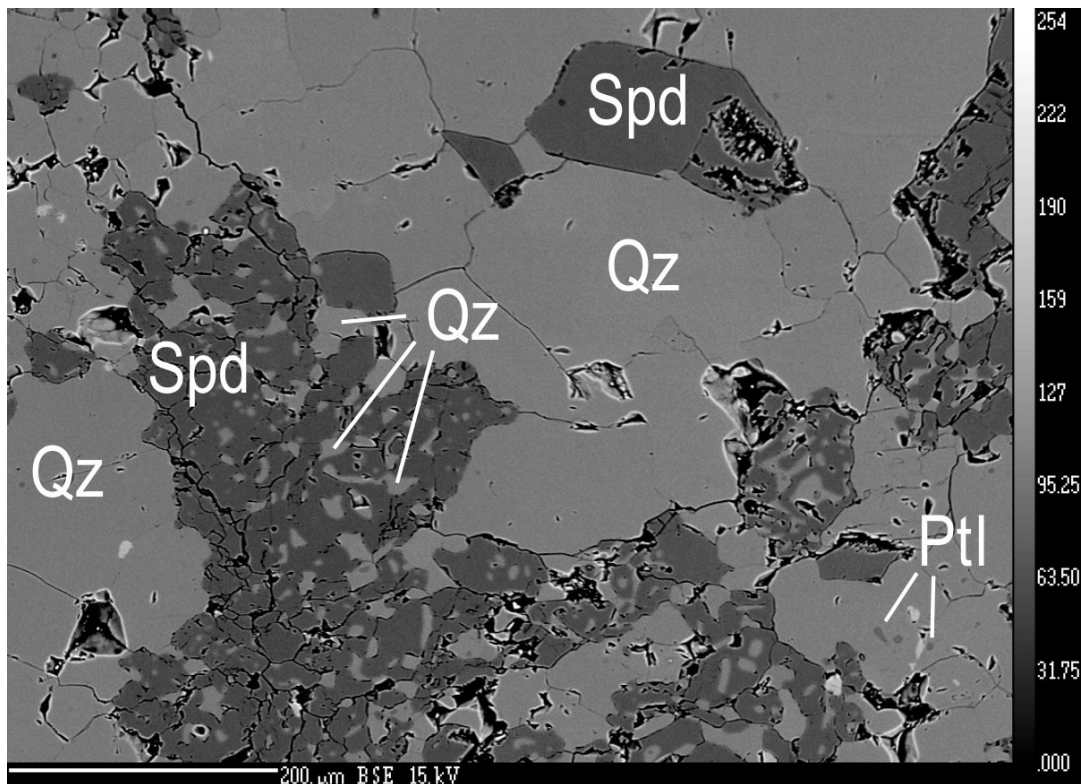
Obr. 20 BSE fotografie vzorku Je2 z pegmatitu u Jeclova

Spd - spodumen; Qz - křemen; Spd+Qz – jemnozrnný spodumen-křemenný agregát.

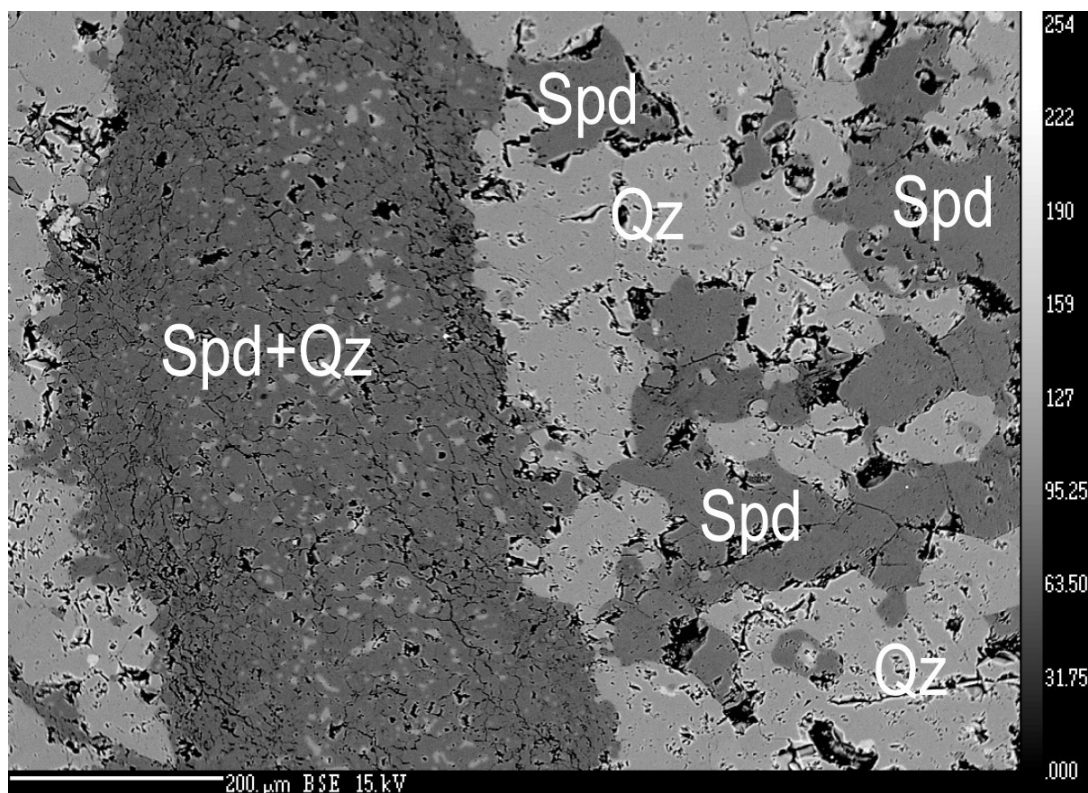


Obr. 21 BSE fotografie vzorku Dv2 z pegmatitu u Dobré Vody

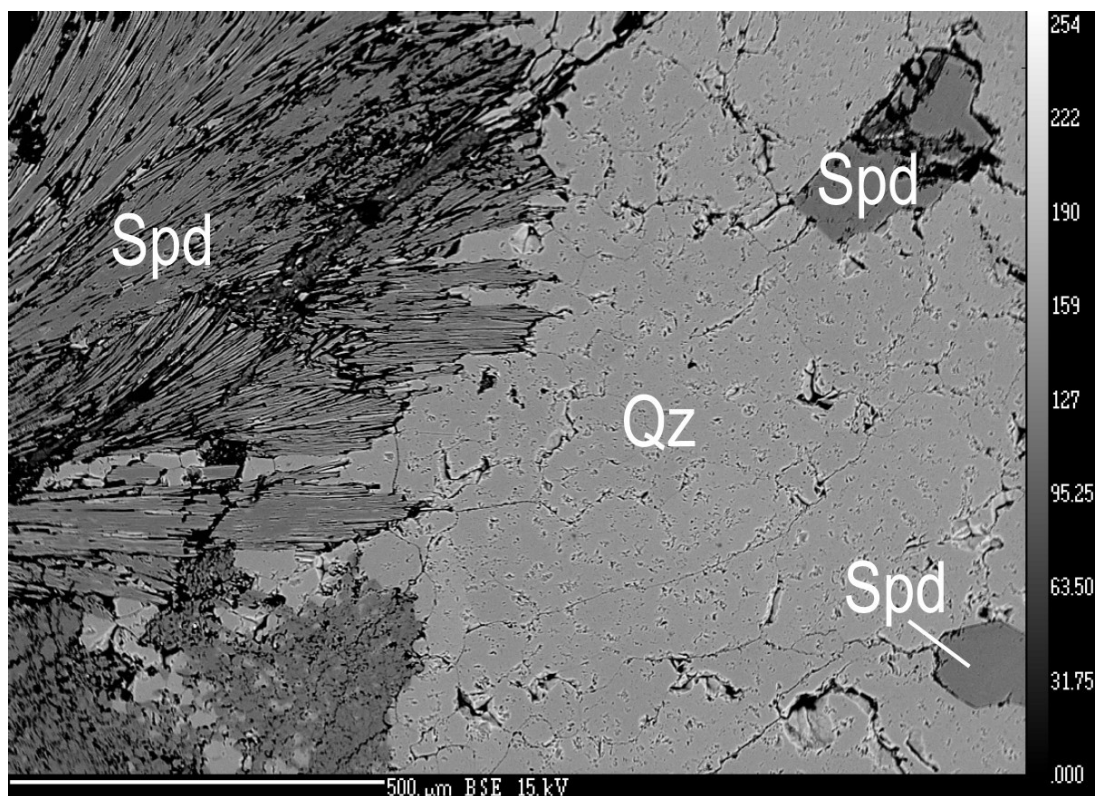
Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.



Obr. 22 BSE fotografie vzorku Dv2 z pegmatitu u Dobré Vody
 Spd - spodumen; Qz - křemen; Ptl - petalit.



Obr. 23 BSE fotografie vzorku Dv2 z pegmatitu u Dobré Vody
 Spd - spodumen; Qz - křemen; Spd+Qz – jemnozrnný spodumen-křemenný agregát.



Obr. 24 BSE fotografie vzorku Dv2 z pegmatitu u Dobré Vody
Spd - spodumen; Qz – křemen.

5.3 Chemické analýzy

Reprezentativní chemické analýzy a krystalochemické vzorce petalitu ze všech studovaných lokalit jsou uvedeny v tabulce 4. Chemické složení petalitů je blízké stechiometrickému vzorci. Obsahy SiO_2 se pohybovaly v rozmezí 78,67-79,80 hm% a Al_2O_3 16,00-16,86 hm%. Obsahy Li byly dopočítány a pohybovaly se v rozmezí 4,70-4,95 hm% Li_2O . Ve vzorku č. 2 z Dobré Vody (analýzy Dv21 a Dv22) a ve vzorku č. 2 z Nové Vsi (analýza Nv23) byly detekovány zvýšené obsahy Na (0,001 - 0,032 apfu). Obsahy ostatních měřených prvků byly pod mezí detekce. Krystalochemické vzorce byly spočítány na 6 kationtů.

Analýzy a krystalochemické vzorce spodumenu ze všech studovaných lokalit jsou uvedeny v tabulce 5. Chemické složení spodumenu je opět blízké stechiometrickému vzorci. Obsahy SiO_2 se pohybovaly v rozmezí 63,55-66,50 hm% a Al_2O_3 27,14-27,95 hm%. Obsahy Li byly dopočítány a pohybovaly se v rozmezí 7,94-8,15 hm% Li_2O . Ve všech vzorcích byl detekován Na v objemu 0,003-0,008 apfu. V jediném případě (vzorek č. 2 z Nové Vsi) byl detekován zvýšený obsah Fe v objemu 0,02 hm% FeO. Ve vzorku č. 2 z Dobré Vody (analýza Dv24) byl zjištěn obsah fosforu v objemu 0,06 hm% P_2O_5 . Ve vzorku č. 2 z Nové Vsi (analýzy Nv21, Nv22 a Nv25) byl detekován F v objemu 0,018-0,055 hm%. Obsahy všech ostatních měřených prvků byly pod mezí detekce. Krystalochemické vzorce byly spočítány na 4 kationty.

Tab. 4 Reprezentativní analýzy a krystalochemické vzorce petalitu z Dobré Vody (Dv), Nové Vsi (Nv) a z Jeclova (Je).

	Dv21	Dv22	Nv21	Nv22	Nv23	Nv24	Je21	Je22
SiO ₂	79,20	79,50	79,33	79,71	78,67	79,80	79,17	79,04
Al ₂ O ₃	16,48	16,86	16,00	16,19	16,08	16,70	16,51	16,69
Li ₂ O	4,89	4,94	4,88	4,91	4,70	4,95	4,90	4,91
Na ₂ O	0,02	0,01	bdl	bdl	0,32	bdl	bdl	bdl
Celkem	100,59	101,30	100,21	100,81	99,77	101,45	100,58	100,63
Počet kationtů								
Si ⁴⁺	4,015	4,000	4,040	4,034	4,029	4,011	4,014	4,004
Al ³⁺	0,985	1,000	0,960	0,966	0,971	0,989	0,986	0,996
Li ⁺	0,998	0,999	1,000	1,000	0,968	1,000	1,000	1,000
Na ⁺	0,002	0,001	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000

bdl – hodnoty pod mezí detekce.

Tab. 5 Reprezentativní analýzy a strukturní vzorce spodumenu z Nové Vsi (Nv), Dobré Vody (Dv) a z Jeclova (Je).

		Nv21	Nv22	Nv23	Nv24	Nv25	Dv11	Dv12	Dv13	Dv21
	SiO ₂	66,08	65,71	66,20	65,71	66,50	65,00	64,78	64,70	64,80
	Al ₂ O ₃	27,14	27,15	27,31	27,14	27,25	27,47	27,65	27,78	27,41
	FeO	0,02	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
	Li ₂ O	8,09	8,07	8,12	8,06	8,15	8,02	8,03	8,02	8,01
	Na ₂ O	0,09	0,06	0,06	0,07	0,05	0,11	0,09	0,11	0,08
	Celkem	101,42	100,99	101,70	100,99	101,96	100,60	100,54	100,61	100,30
Počet kationtů										
T	Si ⁴⁺	2,021	2,018	2,018	2,018	2,023	2,003	1,996	1,992	2,002
M1	Al ³⁺	0,978	0,982	0,982	0,982	0,977	0,997	1,004	1,008	0,998
	Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ M1		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
M2	Li ⁺	0,995	0,997	0,996	0,996	0,997	0,994	0,995	0,993	0,995
	Na ⁺	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	0,006	0,005	0,007	0,005
Σ kat.		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

bdl – hodnoty pod mezí detekce.

Tab. 5 Pokračování.

		Dv22	Dv23	Dv24	Je12	Je21	Je22	Je23	Je24	Je25
	SiO ₂	64,67	64,89	64,96	64,27	64,12	63,98	63,84	63,70	63,55
	Al ₂ O ₃	27,47	27,39	27,68	27,73	27,77	27,82	27,86	27,90	27,95
	FeO	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
	Li ₂ O	7,99	7,99	8,06	7,98	7,97	7,96	7,95	7,95	7,94
	Na ₂ O	0,12	0,13	0,06	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13
	Celkem	100,24	100,40	100,76	101,84	101,39	101,11	101,99	101,89	101,52
		Počet kationtů								
T	Si ⁴⁺	1,999	2,003	1,997	2,006	2,136	2,004	1,997	2,003	2,034
M1	Al ³⁺	1,001	0,997	1,003	0,994	0,864	0,996	1,003	0,997	0,966
	Fe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1		3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
M2	Li ⁺	0,993	0,992	0,996	0,994	0,994	0,992	0,995	0,994	0,994
	Na ⁺	0,007	0,008	0,004	0,006	0,006	0,008	0,005	0,006	0,006
Σkat.		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

bdl – hodnoty pod mezí detekce.

Reprezentativní analýzy a strukturní vzorce slíd ze všech lokalit jsou uvedeny v tabulce 6. Slídy ze vzorku Dv1 (analýzy Dv11 a Dv12) a Nv2 (analýzy Nv21, Nv23 a Nv23) odpovídají muskovitu, slídy ze vzorku Dv2 (analýzy Dv21 a Dv22), Nv2 (Nv22) a Je1 (Je11, Je12) odpovídají trilithionitu. Ve vzorcích z Dobré Vody a Jeclova byly detekovány zvýšené obsahy Rb (0,4-1,68 hm% Rb₂O) a Cs (0,04-0,14 hm% Cs₂O). Obsahy lithia v lepidolitu byly dopočítány a pohybovaly se v rozmezí 4,11-4,31 hm% Li₂O. Pro muskovit byl dopočítán obsah H₂O. Obsah F se pohyboval v rozmezí 0,43-0,95 hm% u muskovitu a 5,68-8,43 u lepidolitu. Nižší obsahy F má lepidolit z Dobré Vody (~6 hm%), nejvyšší z Jeclova (~8,2 hm%).

V tabulce 7 jsou uvedeny chemické analýzy turmalínů z Nové Vsi (vzorek Nv1) a z Jeclova (vzorek Je1 a Je2). Všechny tři turmalíny jsou chemickým složením blízké fluorelbaitu a jsou zonální (složení se mění od středu ke krajům). Turmalín z Nové Vsi má zvýšený obsah Fe (1,534 hm% FeO na okraji až 4,276 hm% ve středu).

Tab. 6 Reprezentativní analýzy a strukturní vzorce slíd z Dobré Vody (Dv), Nové Vsi (Nv) a z Jeclova (Je).

		Dv11	Dv12	Dv21	Dv22	Nv21	Nv22	Nv23	Nv24	Je11	Je12
		Ms	Ms	Lep	Lep	Ms	Lep	Ms	Ms	Lep	Lep
	SiO ₂	45,88	45,99	49,55	49,82	45,25	52,18	47,37	46,80	50,42	50,92
	Al ₂ O ₃	36,19	36,11	29,70	28,98	36,79	24,34	34,57	35,08	25,76	25,05
	FeO	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,12	0,17	bdl	bdl	bdl
	MnO	bdl	0,10	0,22	0,42	bdl	0,23	bdl	bdl	0,93	1,04
	MgO	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,16	bdl	bdl	bdl
	Na ₂ O	0,44	0,50	0,23	0,44	0,73	0,25	0,28	0,22	0,34	0,34
	K ₂ O	10,73	10,61	10,48	10,35	10,26	10,75	10,03	10,55	10,28	10,13
	Li ₂ O	bdl	bdl	4,11	4,14	bdl	4,31	bdl	bdl	4,18	4,21
	Rb ₂ O	0,50	0,40	1,27	1,30	bdl	bdl	bdl	bdl	1,59	1,68
	Cs ₂ O	0,07	0,07	0,05	0,04	bdl	bdl	bdl	bdl	0,14	0,13
	F	0,92	0,95	5,68	6,43	0,43	7,54	0,80	0,75	8,03	8,43
	O=F	-0,39	-0,40	-2,39	-2,71	-0,18	-3,17	-0,34	-0,32	-3,38	-3,55
	H ₂ O	4,01	4,00	nc	nc	4,23	nc	4,06	4,07	nc	nc
	Celkem	98,36	98,33	98,90	99,21	97,51	96,53	97,11	97,15	98,26	98,39
Počet kationtů											
X	K ⁺	0,923	0,912	0,925	0,915	0,885	0,974	0,864	0,911	0,933	0,921
	Na ⁺	0,058	0,065	0,031	0,059	0,096	0,034	0,037	0,028	0,046	0,048
	Rb ⁺	0,022	0,017	0,056	0,058	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,077
	Cs ⁺	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004
Σ X		1,004	0,996	1,014	1,033	0,981	1,008	0,901	0,939	1,056	1,050
M	Al ³⁺	1,968	1,965	1,845	1,821	1,987	1,747	1,950	1,965	1,748	1,732
	Li ⁺	0,000	0,000	1,142	1,154	0,000	1,232	0,000	0,000	1,196	1,205
	Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,000	0,000
	Fe ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,009	0,000	0,000	0,000
	Mn ²⁺	0,000	0,005	0,013	0,025	0,000	0,014	0,000	0,000	0,056	0,063
Σ M		1,968	1,970	3,000	3,000	1,987	3,000	1,975	1,965	3,000	3,000
T	Si ⁴⁺	3,093	3,098	3,425	3,454	3,057	3,709	3,199	3,167	3,588	3,629
	Al ³⁺	0,907	0,902	0,575	0,546	0,943	0,291	0,801	0,833	0,412	0,371
Σ T		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
	F ⁻	0,196	0,202	1,241	1,411	0,092	1,694	0,171	0,161	1,807	1,900
	OH ⁻	1,804	1,798	0,759	0,589	1,908	0,306	1,829	1,839	0,193	0,100

bdl – hodnoty pod mezí detekce.

nc - nekalkulováno

Tab. 7 Reprezentativní analýzy turmalínů z Nové Vsi (Nv) a z Jeclova (Je).

	Nv1		Je1		Je2	
	střed	okraj	střed	okraj	střed	okraj
SiO ₂	37,01	37,56	37,68	39,56	38,08	38,31
Al ₂ O ₃	38,23	40,86	40,07	40,17	42,44	43,27
B ₂ O ₃	10,53	10,53	10,72	10,72	10,41	10,41
FeO	4,28	1,53	bdl	bdl	bdl	bdl
MnO	1,15	0,99	3,81	2,49	bdl	bdl
ZnO	0,60	0,24	bdl	bdl	bdl	bdl
CaO	0,26	0,35	0,12	0,05	0,06	0,10
Na ₂ O	2,59	2,08	2,38	2,12	1,84	1,76
K ₂ O	0,05	0,07	bdl	bdl	bdl	bdl
F	1,56	1,33	1,51	1,24	1,09	0,95
Celkem	96,25	95,54	96,28	96,35	93,92	94,80

bdl – hodnoty pod mezí detekce.

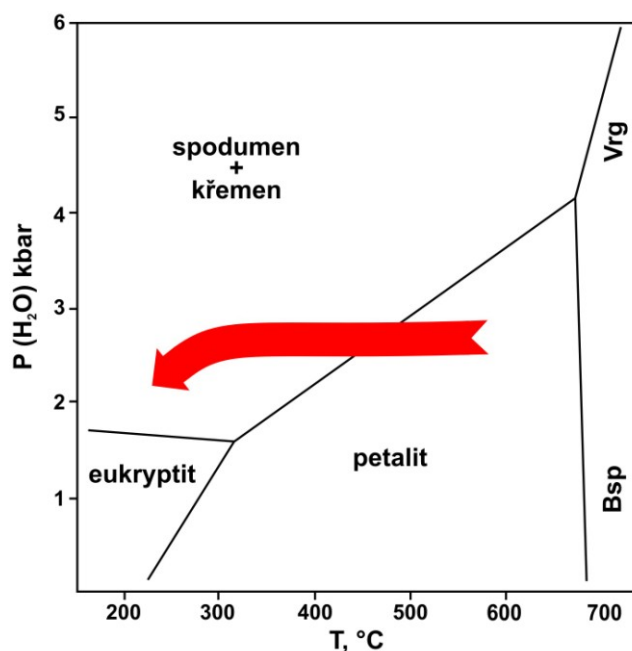
Kromě spodumenu, petalitu a Li-slíd byl ve vzorku z Dobré Vody identifikován topaz, jehož chemismus odpovídá vzorci $(\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}_{1,83} \text{OH}_{0,17}))_{\Sigma=2}$.

5. Diskuse

V současné době je v rámci moldanubika známo pouze šest komplexních pegmatitů s výskytem Li aluminosilikátů (obr. 11). Tyto pegmatity jsou soustředěny do čtyř oblastí - oblast sušická, novovesko-lhenická, jihlavská a velkomeziříčská.

Detailní studium na elektronové mikrosondě potvrdilo ve třech ze čtyř uvedených oblastí (pro studium sušické oblasti se nepodařilo zajistit studijní materiál) výskyt sekundárního spodumenu v podobě jemnozrnného (Jeclov) až hrubozrnného (Nová Ves, Dobrá Voda) spodumen-křemenného agregátu vzniklého rozpadem primárního petalitu podle rovnice $Ptl \rightarrow Spd + 2 Qz$. To znamená, že na všech studovaných lokalitách krystalizoval jako primární petalit. Primární petalit krystalizuje za tlaků nižších než $\sim 2,5-3$ kbar (LONDON 1984), což odpovídá hloubce vmístění pegmatitu přibližně 7-9 km. Stejnou hodnotu pro moldanubické pegmatity uvádějí také např. NĚMEC (1993) a NOVÁK ET AL. (2013). Uvedené podmínky ($P < \sim 2,5-3$ kbar) musely být obdobné napříč celým moldanubikem. To je podpořeno též relativně běžným výskytem andalusitu a sekaninaitu v moldanubických komplexních a méně frakcionovaných LCT pegmatitech (NOVÁK ET AL. 2013).

Na základě posloupnosti krystalizace Li-aluminosilikátů lze pro moldanubické komplexní (Li) pegmatity navrhnout P-T krystalizační dráhu (obr. 25).

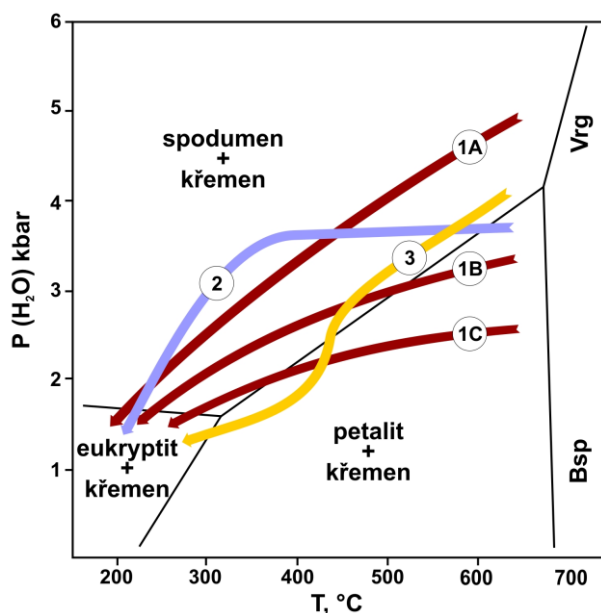


Obr. 25 Krystalizační dráha moldanubických komplexních (Li) pegmatitů

Krystalizace pegmatitů z taveniny započala v poli stability petalitu. Protože pegmatitová tělesa chladnou řádově dny (mocnost ~ 1 m) až maximální jednotky let (mocnost ~ 20 m) (LONDON 2008), chladnutí pegmatitu probíhalo v podstatě izobaricky. Při dosažení hranice stability spodumenu se část, nebo všechny petalit přeměnily na spodumen-křemenný agregát. Hranice stability eukryptitu nebyla

pravděpodobně u moldanubických pegmatitů dosažena, protože v žádném z analyzovaných vzorků nebyl eukryptit identifikován.

Z publikovaných dat odpovídá průběh navržené P-T krystalizační dráhy moldanubických pegmatitů nejvíce datům publikovaným CHAKOUMAKOSEM & LUMPKINEM (1990) pro lithný pegmatit v Hardingu v Novém Mexiku (obr. 26-2). V tomto pegmatitu se však vyskytuje primární spodumen, takže krystalizace probíhala za vyšších tlaků (~ 3-4 kbar). Krystalizační dráhy publikované LONDONEM (1984, obr. 26-1) nejsou izobarické a tudíž příliš neodpovídají realitě. Podobně je málo reálná dráha publikovaná CHAROYEM ET AL. (2001) pro pegmatit Covas de Barroso (obr. 26-3), protože tak rychlý pokles tlaku je v běžných geologických podmínkách nepravděpodobný.



Obr. 26 Publikované P-T krystalizační dráhy některých pegmatitů.

1A – Harding, 1B – Tanco a 1C – Bikita (LONDON 1984); 2 – Harding (CHAKOUMAKOS & LUMPKIN 1990); 3 – Covas de Barroso (CHAROY ET AL. 2001).

Jemnozrný, tektonicky postižený spodumen-křemenný agregát z Jeclova (obr. 18) dokládá citlivost minerální parageneze petalit+spodumen+křemen na orientovaný tlak (NĚMEC 1989).

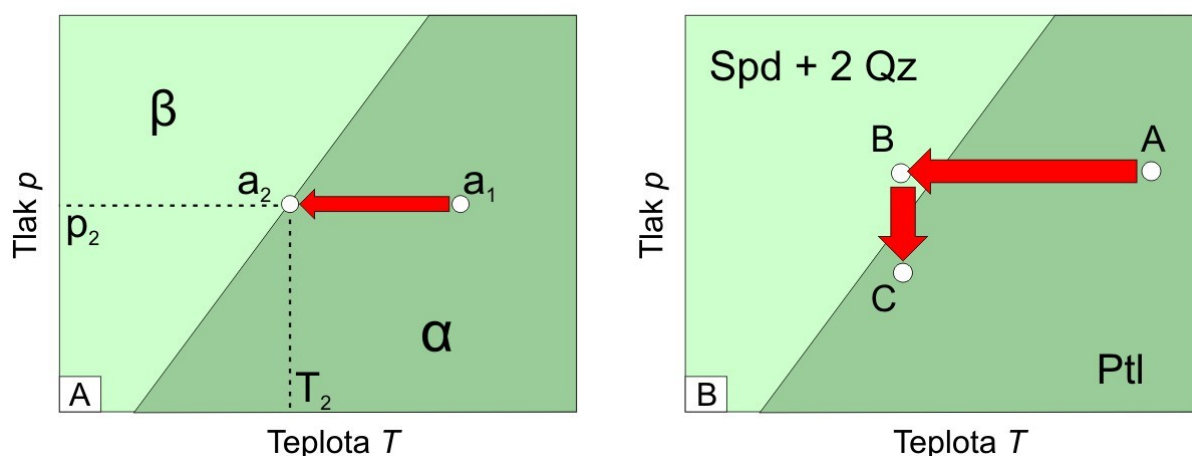
Inkluze petalitu v křemeni a spodumenu (obr. 14-17, 19, 21, 22) mohou reprezentovat relikty původního petalitu, avšak vzhledem k jejich morfologii a skutečnosti, že se nacházejí pouze v blízkosti spodumenu nebo přímo v něm, se může jednat o nově tvořený petalit II vznikající rekrystalizací sekundárního spodumenu a křemene. KRIVOVIČEV (2004) zjistil, že hranice mezi polem stability petalitu a spodumenu není ostrá, ale závisí též na aktivitě SiO_2 . Pokud během reakce $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ dojde ke změně aktivity SiO_2 , hranice mezi poli stability petalitu a spodumenu se posune směrem k nižším teplotám, což umožní zpětnou přeměnu spodumenu a křemene na petalit (ZIKEŠ 2013).

Ke změně stability dojde také při změně tlaku. Srovnáním molárních objemů reaktantu a výsledného produktu při reakci $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ (tab. 8) lze zjistit, že reakce není izochorická, ale že při ní dochází ke zmenšení objemu o $\sim 18,8 \%$ (tab. 8). Podobnou hodnotu, 18,6%, uvádějí také ČERNÝ & FERGUSON (1972). Zmenšení objemu výsledného spodumen-křemenného agregátu dokládají také četné póry (obr. 14-17 a 19-22).

Tab. 8 Porovnání molárního objemu petalitu a spodumen-křemenného agregátu ($\text{Spd} + 2 \text{Qz}$).

	mol. hmotnost [kg · mol ⁻¹]	hustota [kg · m ⁻³]	mol. objem [m ³ · mol ⁻¹]	%
Petalit	$30,63 \cdot 10^{-2}$	2 400	$127,63 \cdot 10^{-6}$	100%
Spodumen	$18,61 \cdot 10^{-2}$	3 184	$58,45 \cdot 10^{-6}$	81,2%
Křemen	$6,01 \cdot 10^{-2}$	2 660	$22,59 \cdot 10^{-6}$	

Pro popis termodynamického chování systému za konstantní teploty (není pravděpodobné, že by během reakce došlo ke skokové změně teploty) lze využít analogické fázové transformace v pevném stavu $A(\alpha) \rightarrow A(\beta)$ (obr. 27 A). Protože platí stavová rovnice, kterou lze v obecném tvaru zapsat jako $f(T,p,V) = 0$, je objem HT-LP fáze α jednoznačně určen teplotou T_1 a tlakem p_1 . Při T_2 a p_2 je splněna rovnovážná podmínka a v rovnováze mohou koexistovat obě fáze α i β . V rovnováze platí $\alpha(T_2, p_2, V_2) = \beta(T_2, p_2, V_2)$. Jestliže platí, že $T_2(\alpha) = T_2(\beta)$ a $V_2(\beta) < V_2(\alpha)$, pak musí být zmenšení objemu kompenzováno poklesem tlaku.



Obr. 27 Termodynamické chování fázové transformace v pevném stavu (A) a krystalizační dráha systému $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (B) při izobarickém chladnutí (z bodu A do bodu B) a při poklesu tlaku vlivem změny objemu (z bodu B do bodu A).

Pokud k poklesu tlaku dojde v blízkosti reakční hranice $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ (obr. 27 B), změní se podmínky stability a systém se dostane z pole stability spodumenu (bod B) do pole stability petalitu (bod C). Tím může dojít ke zpětné rekrystalizaci spodumenu a křemene na petalit.

6. Závěr

Výzkum v rámci diplomové práce prokázal, že krystalizace všech tří studovaných pegmatitů probíhala obdobně. V pegmatitech jako primární Li aluminosilikát krystalizoval petalit, který se při poklesu teploty systému pod $\sim 450^{\circ}\text{C}$ rozpadl na spodumen-křemenný agregát. Výskyt primárního petalitu ve studované oblasti (výskyt primárního spodumenu není znám), reprezentující oblast moldanubika o rozloze přibližně 150 x 60 km, ukazuje na to, že moldanubické komplexní a méně frakcionované LCT pegmatity vznikaly za nižších tlaků $\sim 2,5 - 3$ kbar. Tyto podmínky byly podobné nebo stejné napříč celým moldanubikem. Vznik komplexních pegmatitů v celém regionu je evidentně omezen na poměrně úzký hloubkový rozsah odpovídající hloubce přibližně 7-9 km. To představuje důležitý argument pro studium geneze pegmatitů a pro studium jejich geologické pozice. Tektonicky mylonitizovaný vzorek z Jeclova je potvrzením vysoké citlivosti petalit + spodumen-křemenného agregátu na orientovaný tlak.

Inkluze petalitu ve vzorcích z Nové Vsi a Dobré Vody mohou reprezentovat relikty původního primárního petalitu, ale může se také jednat o nově tvořený petalit II vzniklý rekrystalizací sekundárního spodumen-křemenného agregátu v důsledku snížení objemu o 18-19 % během reakce $\text{Ptl} \rightarrow \text{Spd} + 2 \text{Qz}$ a následného izotermického poklesu tlaku. Pokles tlaku může systém vrátit z pole stability spodumenu do pole stability petalitu a umožnit tak vznik petalitu II. Změny objemu, ke kterým může docházet při fázových transformacích v pevném stavu, tak mohou významně měnit polohu hranic mezi jednotlivými poli stability a měly by být při určování P-T podmínek brány v úvahu.

7. Literatura

- BENEŠ K. ET AL. (1996): Geologická mapa ČR. Mapa předčtvrtohorních útvarů. Měřítko 1 : 200 000. List Jihlava. – Český geologický ústav, Praha.
- ČECH F. & STANĚK J. (1958): Nový lithný pegmatit od Nové Vsi u Českého Krumlova. – Čas. Mineral. Geol., **3**, 407-410.
- ČECH F. & STANĚK J. (1960): Mikrolit z lithného pegmatitu od Nové Vsi u Čes. Krumlova. – Čas. Mineral. Geol., **5**, 235-241.
- ČERNÝ P. (1975): Granitic pegmatites and their minerals: selected examples of recent progress. – Fortschr. Mineral, **52**, 225-250.
- ČERNÝ P. (1991A): Rare element granite pegmatites. I Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. – Geoscience Canada, **18**, 49-67.
- ČERNÝ P. (1991B): Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonics setting or source lithologies? – Precambrian Reserch, **51**, 429-468.
- ČERNÝ P. & ERCIT T. S. (2005): The classification of granitic pegmatites revisited. – Canadian Mineralogist, **43**, 2005-2026.
- ČERNÝ P. & FERGUSON R. B. (1972): The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. IV. Petalite and spodumene relations. – Canadian Mineralogist, **11**, 660-678.
- ČERNÝ P. & LONDON D. (1983): Crystal chemistry and stability of petalite. Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen, **31**, 81-96.
- ČERNÝ P., LONDON D. & NOVÁK M. (2012): Granitic pegmatites as reflection of their sources. – In: London D. & Kontak D.J. (eds): Granitic Pegmatites. Elements, **8**, 289-294.
- ČERNÝ P. & TRUEMAN D. I. (1978): Distribution and petrogenesis of lithium pegmatites in western Superior province of the Canadian shield. – Energy, **3**, 365-377.
- ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA (2015): Geologická mapa 1 : 50 000. – On-line mapový server, <http://mapy.geology.cz>.
- DOSBABA M. & NOVÁK M. (2012): Quartz replacement by „kerolite“ in graphics quartz-feldspar intergrowth from the Věžná I pegmatite, Czech republic: a complex desilication process related to episyenitization. – Canadian Mineralogist, **50**, 1609-1622.
- FILIP J., NOVÁK M., BERAN A. & ZBOŘIL R. (2006): Crystal chemistry and OH defect concentrations in spodumene from different granitic pegmatites. – Phys. Chem. Minerals, **32**, 733-746.
- GRAHAM J. (1975): Some notes on α -spodumen, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$. – American Mineralogist, **60**, 919-923.
- GRYM V. (1975): Geochemická klasifikace žulových pegmatitů Českého masívu. – Geindustria, vybrané práce, technologie a geologie rudních ložisek, **7**, 235-240.
- CHAKOUMAKOS B. C. & LUMPKIN G. R. (1990): Pressure-temperature constraints on the crystallization of the Harding pegmatite, Taos county, New Mexico. – Canadian Mineralogist, **28**, 287-298.

- CHAROY B., NORONHA F. & LIMA A. (2001): Spodumene – petalite – eucryptite: mutual relationship and pattern of alteration in Li-rich aplite-pegmatite dykes from Northern Portugal. – *Canadian Mineralogist*, **39**, 729-746.
- JAHNS R. H. (1982): Internal evolution of granitic pegmatites. – *In: Černý P. (ed.): Granitic pegmatites in science and industry. Short course handbook, Mineralogical association of Canada*, **8**, 293-328.
- KODYM O. ET AL. (1982): Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000, list 32-212 Nová Ves. – Ústřední ústav geologický, Praha.
- KRIVOVIČEV V. G. (2004): Mineralnye ravnovesija s učastiem spodumena, petalita a evkriptita. 1. sistema $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ –termodynamičeskij analiz i geologičeskije prilozhenija. – *Zapiski vsrossijskovo mineralogičeskovo občestva*, **133**, 1.
- LAŠTOVIČKA Z. (1970): Nový nález lithného pegmatitu u Panské Lhoty na Jihlavsku. – *Vlastivědný sborník Vysočiny, oddíl věd přírodních*, **VI**, 15-19, Muzeum Vysočiny v Jihlavě.
- LONDON D. (1984): Experimental phase equilibria in the system $\text{LiAlSiO}_4-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$: a petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites. – *American Mineralogist*, **69**, 995-1004.
- LONDON D. (1986A): The magmatic-hydrothermal transition in the Tanco rare-element pegmatite: evidence from fluid inclusion and phase equilibrium experiments. – *American Mineralogist*, **71**, 376-395.
- LONDON D. (1986B): Formation of tourmaline-rich gem pocket in miarolitic pegmatites. – *American Mineralogist*, **71**, 396-405.
- LONDON D. (2008): Pegmatites. – *Canadian Mineralogist, Special Publication*, 348.
- LONDON D. & BURT D. M. (1982A): Alteration of spodumene, montebrasite and lithiophilite in pegmatites of the White Picacho District, Arizona. – *American Mineralogist*, **67**, 97-113.
- LONDON D. & BURT D. M. (1982B): Chemical models for lithium aluminosilicate stabilities in pegmatites and granites. – *American Mineralogist*, **67**, 494-509.
- LONDON D. & BURT D. M. (1982C): Lithium minerals in Pegmatites. – *In: Černý P. (ed.): Granitic pegmatites in science and industry. Short course handbook, Mineralogical association of Canada*, **8**, 99-133.
- MORGAN G. B & LONDON D. (1999): Crystalization of the Little Three layered pegmatite-aplite dike, Ramona District, California. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **136**, 310-330.
- MUNOZ J. L. (1969): Stability relations of $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ at high pressure. – *Mineralogical Society of America, Special paper*, **2**, 203-209.
- NĚMEC D. (1989): Lithium aluminosilicates in pegmatites affected by stress. – *Chem. Erde* **49**, 167-172.
- NOVÁK M. (2005): Granitické pegmatity Českého masivu (Česká republika); mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam. – *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, **90**, 3-74. Brno.
- NOVÁK M. (2012): Nová nomenklatura skupiny turmalínů. – *Minerál*, **20**, 387-389. České Budějovice.

- NOVÁK M., ERTL A., POVONDRA P., VAŠINOVÁ GALIOVÁ M., ROSSMAN G.R., PRISTACZ H, PREM M., GIESTER G., GADAS P. & ŠKODA R. (2013): Darrellhenryite, $\text{Na}(\text{LiAl}_2)\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_3\text{O}$, a new mineral from the tourmaline supergroup. – *American Mineralogist*, **98**, 1886-1892.
- NOVÁK M. & STANĚK J. (1999): Lepidolitový pegmatit od Dobré Vody u Velkého Meziříčí, Západní Morava. – *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.* **84**, 3-4. Brno.
- NOVÁK V. (1981): Geoelektrický průzkum Li-pegmatitu od Nové Vsi u Českého Krumlova. – Sborník Jihočeského muzea v Českých Budějovicích - Přírodní vědy, **21**, 33-36. České Budějovice.
- RICKWOOD P. C. (1981): The largest crystals. – *American Mineralogist*, **66**, 885-907.
- STANĚK J. (1969): Pegmatity moravské části Českomoravské vrchoviny. – *In: Bernard J. H. (ed): Mineralogie Československa*, 73-94, Academia Praha.
- VRÁNA S. (2013): Otázka dohledání lokality petalit-spodumenového pegmatitu u Rožmberka nad Vltavou. – *Minerál*, 21, 429-430. České Budějovice
- WELSER P., ZIKEŠ J., NOVÁK M., STANĚK J., TRAFINA P. & KAŠPÁREK A. (2007): Lithný pegmatit Nová Ves. – *Minerál Speciál*, 48. České Budějovice.
- ZIKEŠ J. (2013): Alterace petalitu z pegmatitu v Nové Vsi u Českého Krumlova. – MS, bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, Brno.