

## NOVÝ VÝSKYT GRANDIDIERITU, OMINELITU, BORALSILITU A Fe-BOHATÉHO WERDINGITU V HORNÍCH BORECH - PŘEHLED

NEW OCCURRENCE OF GRANDIDIERITE, OMINELITE, BORALSILITE AND Fe-RICH  
WERDINGITE IN HORNÍ BORY, CZECH REPUBLIC - OVERVIEW

CEMPÍREK J.<sup>1</sup>, NOVÁK M.<sup>2</sup>, DOLNÍČEK Z.<sup>3</sup>

### Abstract

Cempírek J., Novák M., Dolníček Z. (2010): Nový výskyt grandidieritu, ominelitu, boralsilitu a Fe-bohatého werdingitu v Horních Borech – přehled. - Acta Mus. Moraviae, Sci. geol., 1, 95, 61-70.

*New occurrence of grandidierite, ominelite, boralsilite and Fe-rich werdingite in Horní Bory, Czech Republic - overview*

A new occurrence of four anhydrous borosilicates (grandidierite, ominelite, boralsilite, Fe-rich werdingite) was found in Horní Bory quarry, Bory Granulite Massif, Moldanubicum, Czech Republic. The borosilicates were found associated with dumortierite, tourmaline and corundum. They occur in a thin veinlet (Kfs + Qtz ± Pl) cross-cutting a leucocratic, garnet- and kyanite-bearing granulite. Primary grandidierite to ominelite is enclosed in quartz; its crystals are locally overgrown by prismatic aggregates of boralsilite and Fe-rich werdingite. Boralsilite also occurs as separate radial aggregates with Fe-rich werdingite in quartz. Grandidierite-ominelite is commonly rimmed by a narrow zone of secondary tourmaline or is partially replaced by the assemblage tourmaline + corundum ± hercynite. Other accessory minerals in the veinlet involve monazite-(Ce), ilmenite, rutile to Nb-rich rutile, ferberite to Nb,Sc-rich ferberite, srilankite, löllingite, arsenopyrite and apatite.

*Key words:* borosilicates, grandidierite, ominelite, boralsilite, Fe-rich werdingite, granulite, partial melting, Moldanubicum, Bohemian Massif.

Jan Cempírek, Mineralogicko-petrografické oddělení, Moravské zemské muzeum, Zelný trh 6, 65937 Brno  
Milan Novák, Ústav geologických věd, Masarykova univerzita, Kotlářská 2, 611 37 Brno  
Zdeněk Dolníček, Katedra geologie, Palackého univerzita, třída 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc

### 1. Úvod

Metamorfované horniny Českého masivu (především moldanubické zóny) jsou poměrně častým nositelem bórových mineralizací (např. CEMPÍREK a NOVÁK 2006, ČOPIJKOVÁ *et al.* 2009). Relativně hojné jsou rovněž granity a pegmatity s minerály bóru (přehled viz. BURIÁNEK a NOVÁK 2007, NOVÁK 2005), méně časté jsou pak bórové minerály v hydrotermální žilách (např. BURIÁNEK *et al.* 2002). Mezi daleko nejčastější nositele bóru patří turmalín, nepoměrně vzácněji se objevuje např. dumortierit, axinit, datolit, danburit, boromuskovit nebo boráty (tusionit, hambergit). Mezi mimořádně vzácné patří v Českém masivu výskyty kornerupinu-prismatinu (okolí Waldheimu, Sasko; GREW 1986, 1989) a donedávna zde byly neznámé bórové mineralizace s bezvodými borosilikáty (např. grandidierit, ominelit, boralsilit, werdingit). Tato práce popisuje nový výskyt a mine-

rální asociace výše uvedených bezvodých borosilikátů v granulitech z kamenolomu v Horních Borech. O výskytu bylo již stručně referováno na dvou konferencích (CEMPÍREK *et al.* 2009a,b) a chemické složení a geneze celé asociace byly detailně studovány (CEMPÍREK *et al.* 2010).

Bezvodé borosilikáty patří k poměrně vzácným ale geologicky významným fázím, ve většině případů vázaným na metamorfované peraluminické horniny (GREW 1996). Stabilita těchto a asociujících fází byla v minulosti poměrně detailně studována (SCHREYER a WERDING 1997). Nejběžnější z nich je grandierit,  $MgAl_3(BO_4)(SiO_4)O$ , který je známý z více než 40 světových lokalit, obvykle v oblastech prekambričských štítů (např. Madagaskar, Norsko, Antarktida, Kanada; přehled viz GREW 1996). Byl rovněž popsán z Helpy (jz. od Popradu) na Slovensku (např. KODĚRA *et al.* 1986), ale tento výskyt je vzhledem k nedostatečnému určení pochybný (GREW 1996). Poměrně vzácnou fází je ominelit,  $FeAl_3(BO_4)(SiO_4)O$  (Fe-analog grandieritu), který byl vedle typové lokality v Japonsku zjištěn pouze v abysálním pegmatitu Almgjotheii v Norsku (HUIJSMANS *et al.* 1982, HIROI *et al.* 2001, DZIKOWSKI *et al.* 2007). Mezi velmi vzácné bezvodé borosilikáty pak patří werdingit, boralsilit a boromullit. Werdingit pochází z granulitových hornin v JAR, Zimbabwe a Austrálii (MOORE *et al.* 1990, GREW *et al.* 1997, BUICK *et al.* 2008) a z abysálních pegmatitů na Madagaskaru, v Norsku a Antarktidě (GREW *et al.* 1998b). Boralsilit byl dosud nalezen jen na dvou místech, v Antarktidě a v Norsku (GREW *et al.* 1998a), zatímco boromullit je známý pouze z granulitových hornin na Mount Safford v Austrálii (BUICK *et al.* 2008, GREW *et al.* 2008).

Nový výskyt grandieritu, ominelitu, boralsilitu a Fe-bohatého werdingitu v Horních Borech je prvním výskytem těchto minerálů v celém variském orogénu. Tento přehled doplňuje práci CEMPÍRKA *et al.* (2010) o detailní popis tohoto unikátního výskytu a fotografickou dokumentaci.

## 2. Geologie borského granulitu

Borský granulitový masív je součástí strážeckého moldanubika. Tvoří čočkovité těleso o rozměrech cca  $10 \times 3,5$  km, protažené ve směru ZJZ–VSV. Granulitové těleso je tvořeno především (a) světlými jemnozrnnými felsickými granulity (křemen + K-živce + plagioklas + granát + kyanit/sillimanit ± biotit), které se v páscích a polohách mocných od několika cm do prvních metrů střídají s (b) tmavými granulity bohatými na granát a biotit, vzácněji s cordieritem (někdy uváděné jako „rohovcové granulity“), a nebo s (c) granulitovými rulami (křemen + K-živce + plagioklas + granát + cordierit + kyanit/sillimanit) s masivní nebo plošně usměrněnou texturou (KOTKOVÁ a MELICHAR 2003). Mezi hlavní akcesorické minerály těchto hornin patří rutil, hercynit, apatit, ilmenit, zirkon a monazit, vzácně zde byl zjištěn i dumortierit (KOTKOVÁ a MELICHAR 2003, osobní sdělení J. KOTKOVÁ). Další typickou horninou vázanou na tmavé granulity je K-živcem bohatý leukosom s cordieritem (POVONDRA *et al.* 1992, KOTKOVÁ *et al.* 2003).

Borským granulitovým masívem a horninami v jeho blízkém okolí proráží velké množství pegmatitových žil, které jsou nejčastěji zastoupeny primitivními pegmatity, méně se objevují zonální žíly se sekaninaitem a fosfáty, vzácně pak komplexní pegmatity s Li-mineralizací (DUDA 1986, STANĚK 1991, NOVÁK *et al.* 1992, NOVÁK 2005). Jejich typickým nositelem bóru je turmalín, jehož složení je odlišné v primitivních (dravit-skorylfoitit) a v komplexních (skorylfoitit a elbait-rossmanit) pegmatitech (SELWAY *et al.* 1999, NOVÁK *et al.* 2004, NOVÁK a TAYLOR 2000), ale objevuje se v nich i akcesorický dumortierit (CEMPÍREK 2003). Nepoměrně méně než pegmatity byly v Horních Borech studovány hydrotermální žíly a alpská mineralizace, ŠPINAREM (1995) byl zkoumán jejich možný vztah k pegmatitům, dravit z křemen-karbonátových hydrotermálních žil zde

(vedle pegmatitů) uvádí PAULIŠ a CEMPÍREK (1997). Fluidní inkluze v karbonátech hydrotermálních asociací pegmatitových žil studovali DOLNÍČEK (2003) a DOLNÍČEK *et al.* (2003).

### 3. Metodika

Složení minerálů bylo studováno s pomocí elektronové mikrosondy Cameca SX-100 (Laboratoř elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, společné pracoviště Masarykovy univerzity a České geologické služby; operátor R. ŠKODA), za podmínek uvedených CEMPÍRKEM *et al.* (2010). Zkratky minerálů použité v textu a obrázcích jsou podle KRETZE (1983).

Vzorce minerálů v tab. 1 byly vypočítány na základě sumy kationtů pro každý minerál ( $\Sigma$  cat. norm.) a ideálního stechiometrického obsahu bóru. Vzorec dumortieritu v tab. 2 byl vypočítán na základě sumy kationtů ( $\Sigma$  cat. norm.) za předpokladu  $Fe_{tot} = Fe^{2+} + B^{3+} = 1$ . Obsah  $H_2O$  byl dopočten na základě ideální celkové sumy aniontů ( $\Sigma$  an. = 18) v elektro-neutrálním vzorci. Vzorce turmalínu byly vypočítány na základě sumy kationtů ve struktur-ních pozicích T, Z a Y ( $\Sigma$  cat. norm.) za předpokladu  $Fe_{tot} = Fe^{2+} + B^{3+} = 3$ . Obsah  $H_2O$  byl dopočítán na základě ideální celkové sumy aniontů ( $\Sigma$  an. = 31) v elektro-neutrálním vzorci.

### 4. Výskyt a minerální asociace

Vzorky s bezvodými borosilikáty byly nalezeny na 2. patře kamenolomu v Horních Borech, v suti po odstřelech, jednak v levé a jednak ve střední části lomu (obr. 1). Vždy se jednalo o ojedinělé nálezy ve velkém množství běžného granulitového materiálu. Původní vzorky byly objeveny v roce 2007, ale i přes opětovné pokusy již nebyl nový materiál nalezen.

Žilky s grandidieritem a dalšími borosilikáty se vyskytují v jemnozrnném leukokratickém granulitu (akcesorický granát + kyanit + sillimanit + hercynit). Ten je na lokalitě poměrně častý, nicméně ve většině případů obsahuje hojný retrográdní biotit, který v hornině s borosilikáty chybí. Granulit má makroskopicky usměrněnou texturu, která je tvořena protaženými zrny křemene a vlákny sillimanitu.

Leukokratický granulit má jednoduchou minerální asociaci (CEMPÍREK *et al.* 2010): křemen + perthitický K-živce ( $Or_{91}Ab_9-Or_{83}Ab_{16}An_1$ ) + plagioklas ( $Ab_{86}An_{12}Or_2-Ab_{84}An_{14}Or_2$ ) + granát ( $Alm_{74}Sps_8Prp_{14}Grs_4-Alm_{79}Sps_{12}Prp_8Grs_1$ ) + kyanit/sillimanit. Zrna kyanitu, sillimanitu a granátu jsou obvykle lemována plagioklasem, alumosilikát je často zatlačován symplektity tvořenými plagioklasem a hercynitem ( $Hc_{89}Spl_{10}Gx_1$ ) nebo je částečně kaolinizován. Akcesoricky se objevují rutil, ilmenit, sfalerit, apatit a monazit.

Grandidierit, ominelit, boralsilit a Fe-bohatý werdingit (dále pro jednoduchost uváděn jako Fe-werdingit) byly nalezeny v tenké žilce, max. 10 mm mocné, která proráží leukokratickým granulitem (obr. 2A). Makroskopicky má žilka tmavě modrou až modročernou barvu. Pod lupou jsou pozorovatelné dlouze sloupečkovité tmavě zelené krystaly grandidieritu-ominelitu až 3 mm dlouhé, uzavřené v křemeni a v masivním černém turmalínu (obr. 2B). Boralsilit ani Fe-werdingit nejsou makroskopicky patrné.

Ve výbrusech tvoří grandidierit-ominelit dlouze prismatické krystaly s výrazným pleochroismem (modrozelená - světle žlutá), uzavřené v křemeni a K-živci. Někdy jsou obrůstány agregáty jehlicovitých krystalů boralsilitu, které se ale mohou vyskytovat i samostatně spolu s Fe-werdingitem. Prismatické agregáty boralsilitu a werdingitu samostatně často tvoří křížovité srostlice (obr. 3). Grandidierit-ominelit je často lemován a zatlačován jemnozrnnou asociací turmalín + korund  $\pm$  dumortierit  $\pm$  hercynit nebo je kaolinizo-

ván. Agregáty boralsilitu a Fe-werdingitu jsou pouze vzácně zatlačovány Al-bohatým turmalínem, velmi často ale podlehly částečné kaolinizaci. CEMPÍREK *et al.* (2010) identifikovali následující primární a sekundární asociace:

### Primární asociace

- 1) K-živec + křemen ± plagioklas + grandidierit-ominelit ± boralsilit
- 2) K-živec ± plagioklas + křemen + boralsilit ± Fe-bohatý werdingit

### Sekundární asociace

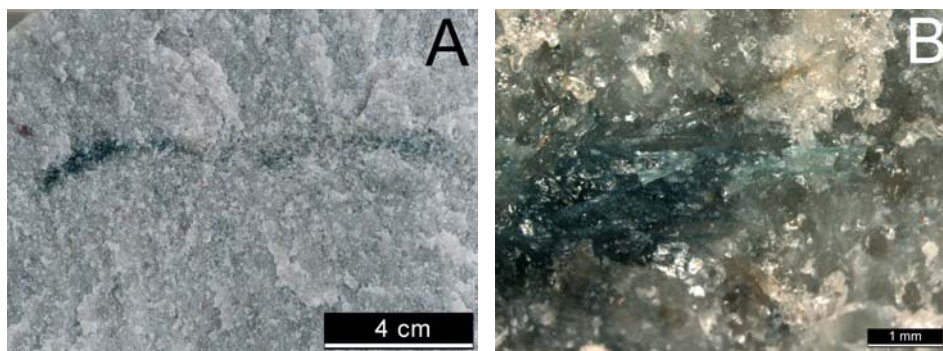
- 3) turmalín + korund ± dumortierit ± hercynit (po grandidieritu)
- 4) Al-turmalín (po agregátech boralsilitu a Fe-bohatého werdingitu)
- 5) jílové minerály - kaolinit, illit (po grandidieritu / boralsilitu)

Primární asociace (1) se objevuje již od kontaktu žilky s okolním granulitem. Směrem do jejího středu se zvyšuje obsah křemene a velikost krystalů grandidieritu-ominelitu. Asociace (2) se nepravidelně objevuje ve středních částech žilky bez grandidieritu.



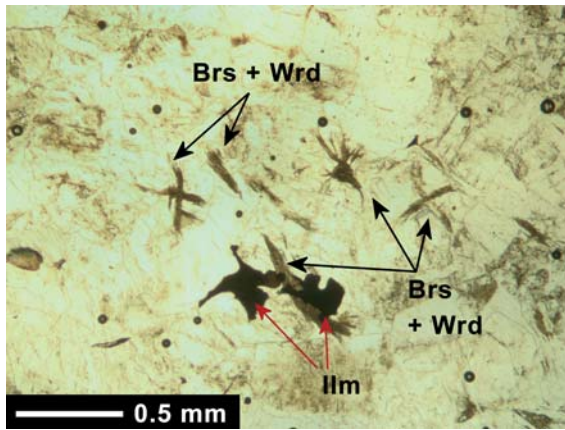
Obr. 1. Kamenolom v Horních Borech s vyznačenými místy nálezů bezvodých borosilikátů (stav z dubna 2009; foto J. Cempírek).

Fig. 1. Quarry at Horní Bory with marked finding places of anhydrous borosilicates (photo J. Cempírek, April 2009).



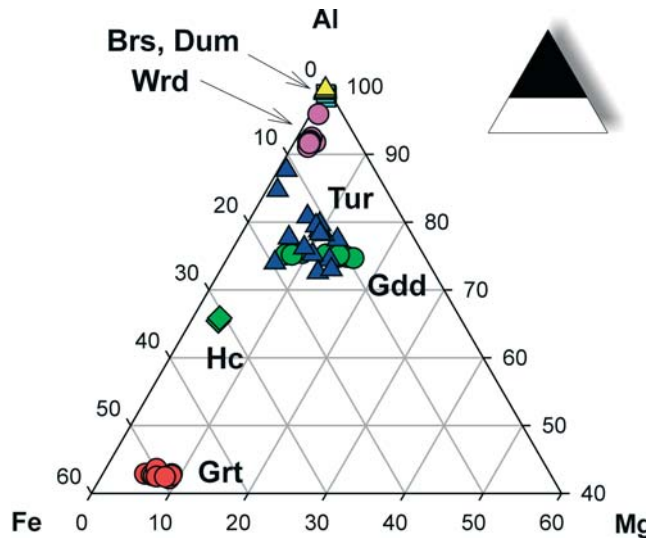
Obr. 2. Makroskopické fotografie borosilikátové žilky. A - žilka protínající granulit napříč foliaci; B - detail, zelené jehlice grandidieritu zarostlé v šedém křemeni a černém turmalínu.

Fig. 2. Photographs of the borosilicate veinlet. A - The borosilicate veinlet crosscuts the granulite foliation. B - Detail, green grandidierite needles are enclosed in grey quartz and black tourmaline.



Obr. 3. Srostlice prismatických agregátů boralsilitu (Brs) a werdingitu (Wrd) spolu s ilmenitem (Ilm), uzavřené v křemení a K-živci. Fotografie z výbrusu v procházejícím polarizovaném světle.

Fig. 3. Intergrowth of boralsilite (Brs) and werdingite (Wrd) prismatic aggregates, together with ilmenite (Ilm), enclosed in quartz and K-feldspar. Thin section photograph in transmitted plane-polarized light.



Obr. 4. Diagram složení Al-fází z borosilikátové žilky. Grt - granát, Hc - hercynit, Gdd - grandidierit a ominelit, Tur - turmalín, Wrd - Fe-bohatý werdingit, Brs - boralsilit, Dum - dumortierit.

Fig. 4. Compositional diagram of Al-phases from the borosilicate veinlet. Grt - garnet, Hc - hercynite, Gdd - grandidierite and ominelite, Tur - tourmaline, Wrd - Fe-rich werdingite, Brs - boralsilite, Dum - dumortierite.

## 5. Mineralogie borosilikátové žilky

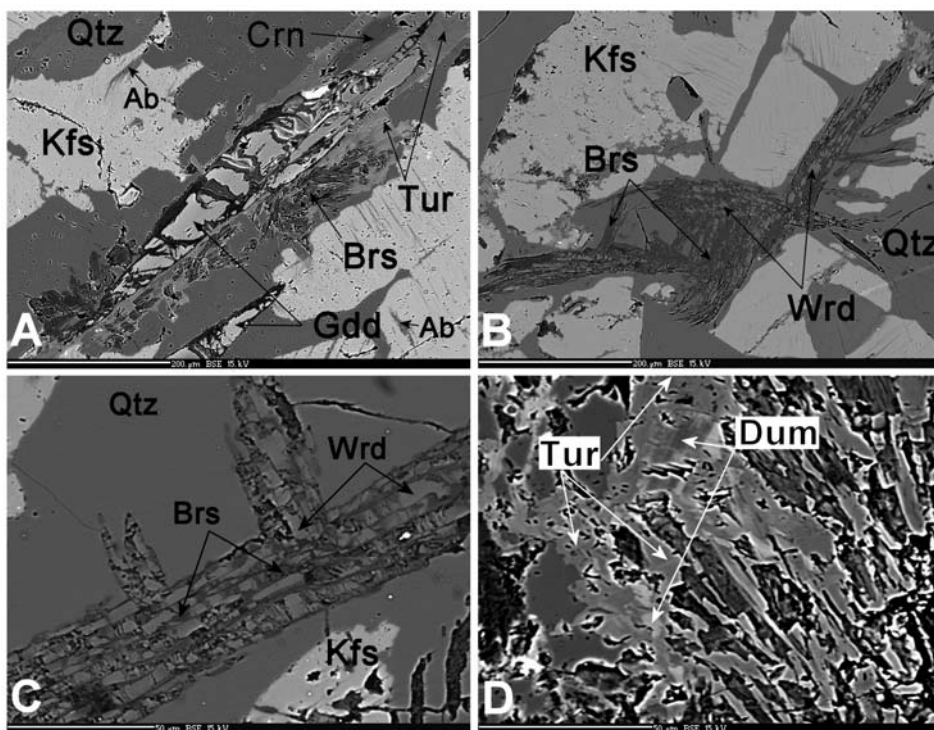
Detailní popis mineralogického složení včetně analytických dat přinesli CEMPÍREK *et al.* (2010). Zde proto uvádíme jen stručný přehled, zájemce o detailní informace, především ohledně chemického složení jednotlivých fází, odkazujeme na výše uvedenou práci.

**K-živec** ( $Or_{94}Ab_6-Or_{85}Ab_{14}An_1$ ) tvoří mírně deformovaná a drcená zrna obklopená křemenem a plagioklasem. Je téměř vždy perthitický, složení exsolučních lamel se pohy-



buje mezi  $Ab_{94}An_5Or_1$  a  $Ab_{97}An_2Or_1$ . Někdy je spolu s borosilikáty zatlačován směsí jemnozrnných fylosilikátů a křemene. Složení K-živce je velmi podobné K-živci v okolním leukogranulitu. **Plagioklas** ( $Ab_{92}An_7Or_1$ – $Ab_{97}An_2Or_1$ ) je v borosilikátových asociacích poměrně vzácný. Tvoří nepravidelná zrna obrůstající K-živce. Na větších zrnech jsou patrné exsoluční lamely. Na kontaktu s grandidieritem se obvykle objevuje jeho zatlačování asociací tourmalín + korund ± hercynit. **Křemen** tvoří xenomorfní zrna s laločnatými výběžky, někdy tvoří červíkovité uzavřeniny v K-živci. Obsahuje hojné fluidní inkluze. Obvykle uzavírá grandidierit a ostatní bezvodé borosilikáty.

**Grandidierit** a **ominelit** tvoří čočkovité až jehlicovité krystaly uzavřené v křemenu a K-živci (obr. 4A). V řezu kolmém na prismatickou zónu mají zrna kosočtvercový nebo kostrovitý průřez. Obsah Fe roste směrem k okrajům krystalů,  $X_{Fe}$  se ve středu zrn pohybuje mezi 0,36 a 0,47 (minerál tak odpovídá grandidieritu), zatímco na okrajích krystalů dosahuje až 0,71 a minerál tak již odpovídá ominelitu (obr. 4, tab. 1). Krystaly jsou často lemovány tenkou zónou sekundárního **turmalínu** nebo jsou zcela přeměněna na asociaci turmalín + korund ± hercynit (obr. 5A, tab. 2). Turmalín vykazuje nepravidelnou zonál-



Obr. 5. BSE-mikrografie borosilikátů uzavřených v křemenu (Qtz) a K-živci (Kfs) s odmišleným albitem (Ab). A - Částečně kaolinizovaný grandidierit (Gdd) obrůstáný boralsilitem (Brs) a zatlačovaný turmalínem (Tur) a korundem (Crn); B - srostlice prismatických agregátů boralsilitem (Brs) a werdingitem (Wrd); C - detail agregátu tvořeného boralsilitem (Brs) a werdingitem (Wrd); D - dumortierit (Dum) uzavřený v turmalínu (Tur), vedle zcela kaolinizovaného borosilikátu (černošedý).

Fig. 5. BSE-photomicrographs of borosilicates enclosed in quartz (Qtz) and K-feldspar (Kfs) with albite (Ab). A - Partially kaolinized grandidierite (Gdd) overgrown by boralsilite (Brs) and replaced by tourmaline (Tur) and corundum (Crn); B - intergrowth of prismatic boralsilite (Brs) and werdingite (Wrd) aggregates; C - detailed photograph of boralsilite + werdingite aggregate; D - dumortierite (Dum) enclosed in tourmaline (Tur), close to completely kaolinized borosilicate (dark gray).

Tabulka 1. Vybrané mikrosondové analýzy grandidieritu, ominelitu (Gdd, Oml), Fe-bohatého werdingitu (Fe-Wrd) a boralsilitu (Brs).

Table 1. Selected electron-microprobe analyses of grandierite, ominelite (Gdd, Oml), Fe-rich werdingite (Fe-Wrd) and boralsilite (Brs).

	Gdd	Oml	Fe-Wrd	Brs
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,02	0,02	0,00
SiO <sub>2</sub>	20,07	19,59	18,11	12,22
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	11,54	11,22	11,56	18,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50,57	49,23	63,45	69,19
MgO	7,45	4,74	1,14	0,11
FeO	10,29	14,15	6,10	0,42
MnO	0,19	0,33	0,07	0,01
ZnO	0,04	0,02	0,02	0,00
F	0,00	0,00	0,00	0,09
-O=F	-	-	-	-0,02
Celkem	100,23	99,41	100,51	100,27
P <sup>3+</sup>	0,001	0,001	0,003	0,000
Si <sup>4+</sup>	1,008	1,012	3,631	2,332
B <sup>3+</sup> *	1	1	4	6
Al <sup>3+</sup>	2,993	2,997	14,992	15,564
Mg <sup>2+</sup>	0,558	0,365	0,340	0,032
Fe <sup>2+</sup>	0,432	0,611	1,022	0,066
Mn <sup>2+</sup>	0,008	0,014	0,012	0,001
Zn <sup>2+</sup>	0,001	0,001	0,003	0,000
F <sup>-</sup>	0,000	0,000	0,000	0,051
O <sup>2-</sup>	9,011	9,019	37,143	37,091
Fe / (Fe+Mg)	0,436	0,626	0,751	0,672
Σ cat. (norm.)	5	5	20	18

\* vypočteno

\* calculated

Tabulka 2. Vybrané mikrosondové analýzy dumortieritu (Dum) a turmalínu (Tur).

Table 2. Selected electron-microprobe analyses of dumortierite (Dum) and tourmaline (Tur).

	Dum	Dum	Tur	Tur
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,20	0,40	0,08	0,01
SiO <sub>2</sub>	29,12	23,19	35,25	36,79
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,44	-	-
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	10,76	-	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	5,95	5,64	10,57	10,49
TiO <sub>2</sub>	0,03	3,24	0,00	0,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	59,41	53,88	37,12	33,06
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,13	0,00	0,01
MgO	0,28	0,15	3,96	4,53
FeO	0,65	0,42	7,55	9,51
MnO	0,00	0,02	0,05	0,05
ZnO	0,01	0,00	0,00	0,02
CuO	0,03	0,00	0,00	0,00
CaO	0,03	0,00	0,23	0,04
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	1,55	1,70
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,05
F	0,07	0,12	0,06	0,03
H <sub>2</sub> O*	1,36	1,56	3,24	3,39
-O=F	-0,01	-0,01	-0,00	-0,00
Celkem	97,17	100,02	99,69	99,67
P <sup>3+</sup>	0,017	0,035	0,012	0,011
Si <sup>4+</sup>	2,835	2,382	5,930	5,948
As <sup>3+</sup>	0,000	0,028	-	-
Sb <sup>3+</sup>	0,000	0,456	-	-
B <sup>3+</sup> *	1	1	3	3
Ti <sup>4+</sup>	0,002	0,251	0,003	0,002
Al <sup>3+</sup> (tot)	6,818	6,523	6,815	6,888
V <sup>5+</sup>	0,002	0,011	0,000	0,000
Mg <sup>2+</sup>	0,041	0,022	0,960	0,817
Fe <sup>2+</sup>	0,053	0,036	1,283	1,331
Mn <sup>2+</sup>	0,000	0,001	0,009	0,010
Zn <sup>2+</sup>	0,001	0,000	0,003	0,002
Cu <sup>2+</sup>	0,002	0,000	0,000	0,000
Ca <sup>2+</sup>	0,003	0,000	0,025	0,015
Na <sup>+</sup>	0,001	0,003	0,577	0,523
K <sup>+</sup>	0,000	0,000	0,002	0,006
F <sup>-</sup>	0,020	0,038	0,025	0,012
OH*	0,882	1,070	3,589	3,573
O <sup>2-</sup>	17,096	16,892	27,382	27,413
Σ cat.	9,75	9,75	15	15
Σ an.	18	18	31	31

\* vypočteno

\* calculated

nost, která je rozsahem i složením podobná zonálnosti původního grandidieritu (obr. 4). Jeho složení odpovídá směsi koncových členů dravit-(skoryl)-foitit-olenit. **Korund** vždy tvoří xenomorfní zrna uzavřená v turmalínu. **Hercynit** ( $\text{Hc}_{8-7}\text{Spl}_{10}\text{Gx}_3$ ) byl vzácně pozorován v malých (~ 20  $\mu\text{m}$ ) xenomorfních zrnech spolu s grandidieritem, uzavřený v turmalínu spolu s korundem.

**Boralsilit** a **Fe-bohatý werdingit** tvoří agregáty vzájemně prorostlých prismatických krystalů, max. 0,2 mm velkých (obr. 5B, C), které někdy obrůstají krystaly grandidieritu. Prismatické agregáty obou minerálů rovněž tvoří křížovité srostlice uzavírané v křemeni a K-živci (obr. 5B). Poměr boralsilitu a Fe-werdingitu v agregátech se mění od poměrně čistého boralsilitu až po agregáty s převahou Fe-werdingitu. Vzácně jsou zatlačovány Al-bohatým turmalínem foitit-olenitové řady. Boralsilit je někdy přeměněn na jílové minerály, Fe-werdingit se zdá být v těchto případech stabilní. Chemické složení boralsilitu i werdingitu je značně variabilní především v poměru Al/Si, werdingit naproti tomu vykazuje stabilní poměr Fe/(Fe + Mg) přibližně 0,75 (tab. 1).

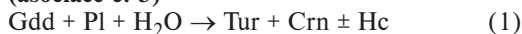
Vzácně byla v sekundárním turmalínu spolu s kaolinizovaným boralsilitem nalezena zonální zrna **dumortieritu** (obr. 5D, tab. 2), kde některé zóny byly nabohaceny o Sb (až 0,46 apfu) a Ti (až 0,25 apfu). Není zřejmé, zda se jedná o primární minerál nebo o produkt přeměny primárních borosilikátů.

Z akcesorických minerálů našli CEMPÍREK *et al.* (2010) v borosilikátové žilce především **ilmenit**, vzácně obsahující inkluze exsolučních fází, které složením odpovídají **sriankitu** s empirickým vzorcem  $(\text{Ti}_{0,63}\text{Zr}_{0,28}\text{Nb}_{0,02}\text{U}_{0,02}\text{Hf}_{0,02}\text{Fe}^{3+}_{0,01}\text{Si}_{0,01})_{1,00}\text{O}_2$ , dále **Nb-bohatému rutilu** (až 9,85 hm. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) a **Nb, Sc-bohatému ferberitu** (až 12,48 hm. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  a 7,40 hm. %  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ ). Dále zde byl nalezen **monazit-(Ce)**, **rutil**, **ferberit**, **löllingit**, **arzenopyrit** a **fluorapatit**, obvykle v zrních o velikosti prvních desítek mikrometrů.

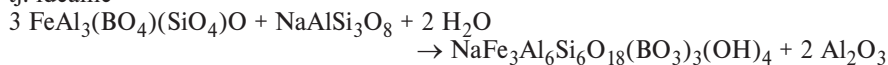
## 6. Vznik borosilikátových asociací

Na základě texturních znaků probíhala krystalizace primárních minerálů v pořadí: K-živce → grandidierit-ominelit → boralsilit + Fe-werdingit → křemen → sekundární asociace s borosilikáty a akcesorie (ilmenit, rutil, monazit) → jílové minerály (CEMPÍREK *et al.* 2010). Vznik sekundárních borosilikátových asociací mohl proběhnout podle následující reakce:

### (asociace č. 3)



tj. ideálně



### (asociace č. 4)



Rozklad grandidieritu a boralsilitu na jílové minerály je pravděpodobně časově vázán na částečnou sericitizaci K-živce. K rozkladu mohlo dojít buď za nízkých teplot v důsledku retrográdních procesů v granulitu a nebo k němu mohlo dojít při vzniku asociace Tur + Crn, při kterém již byla v systému přítomna voda.

Vznik žilky je evidentně mladší než vznik foliace v granulitu. CEMPÍREK *et al.* (2010) její vznik přisuzují parciálnímu tavení během dekomprese okolního granulitu, podobně jako v případě vzniku leukosomů s cordieritem (KOTKOVÁ a MELICHAR 2003). Na základě experimentálních prací (SCHREYER a WERDING 1997) lze odhadnout podmínky vzniku primární asociace na  $P < 8$  kbar a  $T > 700$  °C (CEMPÍREK *et al.* 2010).



## 7. Závěr

Vzhledem k výskytu špatně vyvinutých pegmatitových (zvětšování zrna křemene do středu žilky) nebo nerovnovážných textur (srůst křemene a živce v podobě červíkovitých uzavřenin) lze borosilikátovou žilku z Horních Borů s určitým odstupem považovat za metamorfogenní, tj. abysální pegmatit (resp. „proto-pegmatit“), u kterého nedošlo k delšímu přesunu taveniny a k výraznější frakcionaci, jak je obvyklé u většiny granitických pegmatitů. Horniny metamorfované v granulitové facii a abysální pegmatity jsou na světových lokalitách nejčastějším prostředím vzniku bezvodých borosilikátů. Hlavním důvodem je relativně nízký obsah H<sub>2</sub>O ve fluidech a vysokoteplotní (popř. i vysokotlaký) původ těchto hornin.

Výskyty grandidieritu, ominelitu, boralsilitu a werdingitu jsou vzhledem k jejich nenápadnému vzhledu (boralsilit a werdingit jsou makroskopicky i opticky nerozeznatelné od sillimanitu) dosud poměrně řídké. Nicméně, vzhledem ke specifickým podmínkám vzniku, lze na jejich přítomnost v hornině do jisté míry usuzovat. Klíčovým faktorem pro jejich vznik může být především přítomnost „suchých“ (CO<sub>2</sub>-bohatých) fluid při parciálním tavení horniny, nebo nerovnoměrná distribuce fluid v systému.

## Poděkování

Autoři děkují P. Tománkové za asistenci při terénním výzkumu. Příprava textu byla podpořena výzkumnými projekty MK00009486201 (JC), MSM0021622412 (MN) a GAČR 205/07/P130 (ZD).

## LITERATURA

- BUICK, I. S., GREW, E. S., ARMBRUSTER, T., MEDENBACH, O., YATES, M. G., BEBOUT, G. E., CLARKE, G. L., 2008: Boromullite, Al<sub>3</sub>BSi<sub>2</sub>O<sub>19</sub>, a new mineral from granulite-facies metapelites, Mount Stafford, central Australia: a natural analogue of a synthetic “boron-mullite”. – *Eur. J. Mineral.*, 20, 935–950.
- BURIÁNEK, D., FILIP, J., NOVÁK, M., 2002: Tourmalines of the Metabasite Zone, Brno Batholith. – *Geolines*, 16, 19.
- BURIÁNEK, D., NOVÁK, M., 2007: Compositional evolution and substitutions in disseminated and nodular tourmaline from leucocratic granites: Examples from the Bohemian Massif, Czech Republic. – *Lithos* 95, 1–2, 148–164.
- CEMPÍREK, J., 2003: Minerální asociace a chemismus dumortieritu z granitických pegmatitů. – MS, diplomová práce, PŘF MU Brno.
- CEMPÍREK, J., NOVÁK, M., 2006: Mineralogy of dumortierite-bearing abyssal pegmatites at Starkoč and Běstvína, Kutná Hora Crystalline Complex. – *J. Czech Geol. Soc.*, 51, 3–4, 259–270.
- CEMPÍREK, J., NOVÁK, M., DOLNÍČEK, Z., 2009a: Abyssal pegmatite with anhydrous borosilicates from the Bory granulite, Moldanubicum, Czech Republic. – In: *Peg 2009 Brazil*, 4<sup>th</sup> International Symposium on Granitic Pegmatites, book of abstracts. *Estudos Geologicos*, Recife, 19, 2, 89–94.
- CEMPÍREK, J., NOVÁK, M., DOLNÍČEK, Z., 2009b: Grandidierite-ominelite, boralsilite and Fe-werdingite from the Bory Granulite Massif, Czech Republic. – In: *Granulites & Granulites 2009* (Granulites, partial melting and rheology of orogenic lower crust), Hrubá Skála chateau, July 13–15, 2009. Book of abstracts, 10.
- CEMPÍREK, J., NOVÁK, M., DOLNÍČEK, Z., KOTKOVÁ, J., ŠKODA, R., 2010: Crystal chemistry and origin of grandidierite, ominelite, boralsilite and werdingite from the Bory Granulite Massif, Czech Republic. – *Amer. Mineralogist*, (v review).
- ČOPIJKOVÁ, R., BURIÁNEK, D., ŠKODA, R., HOUZAR, S., 2009: Tourmalinites in the metamorphic complex of the Svratka Unit (Bohemian Massif): a study of compositional growth of tourmaline and genetic relations. – *J. Geosciences* (Praha) 54, 2, 221–243.
- DOLNÍČEK, Z., 2003: Fluidní inkluze v dolomitu z Horních Borů. – *Studentská geologická konference 2003*, Brno, sborník abstraktů, 11–12.
- DOLNÍČEK, Z., MALÝ, K., DVOŘÁK, J., 2003: Origin of the dolomite mineralization from a pegmatite dike at Horní Bory, Moldanubicum, Czech Republic. – *Mitt. Österr. Miner. Ges.*, 148, 124–125.

- DUDA, J., 1986: Pegmatites in the Bory granulite massif. - *Sborník geologických Věd, Ložisková geologie a mineralogie*, 27, 157-202.
- DZIKOWSKI, T. J., GROAT, L. A., GREW, E. S., 2007: The geometric effects of  $VFe^{2+}$  for  $VMg$  substitution on the crystal structures of the grandidierite-ominelite series. - *Amer. Mineralogist*, 92, 863-872.
- GREW, E. S., 1986: Petrogenesis of Kornerupine at Waldheim (Sachsen), German Democratic Republic. - *Z. geol. Wiss.*, 14, 5, 525-558.
- GREW, E. S., 1989: A Second Occurrence of Kornerupine in Waldheim, Saxony, German Democratic Republic. - *Z. geol. Wiss.*, 17, 1, 67-76.
- GREW, E. S., 1996: Borosilicates (exclusive of tourmaline) and boron in rock-forming minerals in metamorphic environments. - *Rev. Mineral.*, 33, 387-502.
- GREW, E. S., YATES, M. G., SHEARER, C. K., WIEDENBECK, M., 1997: Weringite from the Urungwe district, Zimbabwe. - *Mineral. Mag.*, 61, 713-718.
- GREW, E. S., MCGEE, J. J., YATES, M. G., PEACOR, D. R., ROUSE, R. C., HUIJSMANS, J. P. P., SHEARER, C. K., WIEDENBECK, M., THOST, D. E., SU, S.-C., 1998a: Boralsilite ( $Al_{16}B_6Si_2O_{37}$ ): a new mineral related to sillimanite in pegmatites from granulite-facies rocks. - *Amer. Mineralogist*, 83, 638-651.
- GREW, E. S., YATES, M. G., HUIJSMANS, J. P. P., MCGEE, J. J., SHEARER, C. K., WIEDENBECK, M., ROUSE, R. C., 1998b: Weringite, a borosilicate new to granitic pegmatites. - *Canad. Mineralogist*, 36, 399-414.
- GREW, E. S., GRAETSCH, H., PÖTER, B., YATES, M. G., BUICK, I., BERNHARDT, H.-J., SCHREYER, W., WERDING, G., CARSON, C. J., CLARKE, G. L., 2008: Boralsilite,  $Al_{16}B_6Si_2O_{37}$ , and "boronmullite": compositional variations and associated phases in experiment and nature. - *Amer. Mineralogist*, 93, 283-299.
- HIROI, Y., GREW, E. S., MOTOYOSHI, Y., PEACOR, D. R., ROUSE, R. C., MATSUBARA, S., YOKOYAMA, K., MIYAWAKI, R., MCGEE, J. J., SU, S. C., HOKADA, T., FURUKAWA, N., SHIBASAKI, H., 2001: Ominelite,  $(Fe, Mg)Al_3BSiO_9$  ( $Fe^{2+}$  analogue of grandidierite), a new mineral from porphyritic granite in Japan. - *Amer. Mineralogist*, 87, 160-170.
- HUIJSMANS, J. P. P., BARTON, M., VAN BERGEN, M. J., 1982: A pegmatite containing Fe-rich grandidierite, Ti-rich dumortierite and tourmaline from the Precambrian, high-grade metamorphic complex of Rogaland, S. W. NORWAY. - *N. Jb. Mineral., Abh.*, 143, 249-261.
- KODĚRA, M., A KOL., 1986: Topografická mineralogia Slovenska I. - *Veda*, Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied.
- KOTKOVÁ, J., MELICHAR, R., 2003: Stop 3 - Horní Bory. Structural and metamorphic evolution of the high-T/high-P Gföhl Unit (Moldanubicum). - In KOTKOVÁ, J. (ed.): *No Frontiers 2003*. Excursion guide, 34-39.
- KOTKOVÁ, J., NOVÁK, M., POVONDRA, P., 2003: Locality No. 6: Horní Bory near Velké Meziříčí. Granulite, migmatite and granitic pegmatite. - In NOVÁK, M. (ed.): *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003*, Nové Město na Moravě, Czech Republic. Field trip guidebook, 47-52.
- KRETZ, R., 1983: Symbols for rock-forming minerals. - *Amer. Mineralogist*, 68, 277-279.
- MOORE, J. M., WATERS, D. J., NIVEN, M. L., 1990: Weringite, a new borosilicate mineral from the granulite facies of the western Namaqualand metamorphic complex, South Africa. - *Amer. Mineralogist*, 75, 415-420.
- 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.
- NOVÁK, M., TAYLOR, M. C., 2000: Foitite: Formation during late stages of evolution of complex pegmatites at Dobrá Voda, Czech Republic, and Pala, California, USA. - *Canadian Mineralogist*, 38, 1 399-1 408.
- NOVÁK, M., ČERNÝ, P., ČECH, F., STANĚK, J., 1992: Granitic pegmatites in the territory of the Bohemian and Moravian Moldanubicum. - In NOVÁK, M., ČERNÝ, P. (eds.): *International symposium on mineralogy, petrology and geochemistry of granitic pegmatites Lepidolite 200*, Nové Město na Moravě, Czech Republic. Field trip guidebook, 11-20.
- NOVÁK, M., POVONDRA, P., SELWAY, J. B., 2004: Schorl-oxy-schorl to dravite-oxy-dravite tourmaline from granitic pegmatites; examples from the Moldanubicum, Czech Republic. - *Eur. J. Mineral.*, 16, 323-333.
- PAULÍŠ, P., CEMPÍREK, J., 1997: Dravít z pegmatitů z Horních Borů u Velkého Meziříčí. - *Bull. min.-petr. odd. NM v Praze*, 4-5, 225.
- POVONDRA, P., STANKOVÁ, J., STANĚK, J., 1992:  $CO_2$ -bearing cordierite of Moldanubian leptynite rock series from Horní Bory, Czech Republic. - *Acta Univ. Carol., Geol.*, 331-349.
- SCHREYER, W., WERDING, G., 1997: High-pressure behaviour of selected boron minerals and the question of boron distribution between fluids and rocks. - *Lithos*, 41, 251-266.
- SELWAY, J. B., NOVÁK, M., ČERNÝ, P., HAWTHORNE, F. C., 1999: Compositional evolution of tourmaline in lepidolite-subtype pegmatites. - *Eur. J. Mineral.*, 12, 569-584.
- STANĚK, J., 1991: Paragenese minerálů pegmatitových žil z Hatí u Dolních Borů na západní Moravě. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. natur.*, 76, 19-49.
- ŠPINAR, P., 1995: Vztah mezi pegmatity a alpskými žilami v kamenolomu u Horních Borů. - *Vlastiv. Sbor. Jysociny, Odd. Věd přír.*, 12, 3-18.