

STUDIUM KATODOLUMINESCENCE, PETROGRAFIE A LITOLOGIE MRAMORŮ MORAVIKA (JEDNOTKA BÍLÉHO POTOKA, SVRATECKÁ KLENBA, ČESKÝ MASIV)

CATHODOLUMINESCENCE STUDY, PETROGRAPHY AND LITHOLOGY OF MARBLE
IN MORAVICUM (BÍLÝ POTOK UNIT, SVRATKA DOME, BOHEMIAN MASSIF)

STANISLAV HOUZAR, JÚLIA KRŠIAKOVÁ & JAROMÍR LEICHMANN

Abstract

Houzar, S., KršIAková, J., Leichmann, J. (2015): Studium katodoluminescence, petrografie a litologie mramorů moravika (jednotka Bílého potoka, svratecká klenba, Český masiv). – *Acta Musei Moraviae, Sci. geol.*, 100, 1, 43–60.

Cathodoluminescence study, Petrography and Lithology of Marble in Moravicum (Bílý Potok Unit, Svatka Dome, Bohemian Massif)

The contact of the Bílý Potok and Biteš Units (Svatka Dome, Moravo-Silesian Zone) is characterized by presence of marble in the highest lithostratigraphic part of the phyllite complex of the Bílý Potok Unit. The marble contains a mineral assemblage calcite + quartz + albite + muscovite + biotite + titanite ± dolomite ± chlorite, with accessory rutile, tourmaline, and scarce LREE-fluorocarbonates; the assemblage is stable under LP-LT metamorphic conditions, at $T < 520$ °C. The prevailing rock type is a gray fine-grained silicate-rich marble, whereas a white medium-grained silicate-poor marble is less frequent; both types sometimes contain partially deformed carbonate veins, locally with pygmatic folding. The marble is a metamorphic equivalent of limestone with elevated contents of quartz, clay minerals, and organic matter; its sedimentation took place in partially euxenic environment. Using cathodoluminescence microscopy, four calcite types were distinguished: dark orange calcite I and orange calcite II form the marble matrix, whereas pale orange calcite III and rare orange-yellow calcite IV are recrystallization products. Marble from the northern part of the Bílý Potok unit is typically strongly deformed, whereas marble in the southern part is characterized by coarser grain size and intense recrystallization. The studied marble occurrences typically contain postmetamorphic hydrothermal veins (calcite + Fe dolomite ± fluorite). The mineral assemblages and petrographic-lithological contents of the studied marble are equivalent to the marble occurrences in the Upper Lukov Unit in the Dyje Dome of the Moravo-Silesian Zone.

Key words: marble, mineral assemblage, cathodoluminescence, lithology, Bílý Potok Unit, Svatka Dome, Moravo-silesian Zone, Bohemian Massif, Czech Republic.

Stanislav Houzar, Department of Mineralogy and Petrography, Moravian Museum, Zelný trh 6, 659 37 Brno, Czech Republic. e-mail: shouzar@mzm.cz.

Júlia KršIAková, Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic.

Jaromír Leichmann, Department of Geological Sciences, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic. e-mail: leichman@sci.muni.cz

ÚVOD

Moderní studium krystalinika východního okraje Českého masivu v posledních desetiletích přineslo celou řadu nových poznatků o strukturním i metamorfním vývoji jednotli-

vých jednotek (souborně např. CHÁB *et al.* 2008). V rozporu s těmito výsledky je ale dosud relativně nízký stupeň poznání geologické náplně jednotek a tím i přesnější vymezení jejich vzájemných hranic. Tento nedostatek může být řešen studiem litologicky kontrastních hornin, k nimž patří i metamorfované karbonátové horniny.

Předkládaný příspěvek, vycházející z bakalářské práce KRIŠIÁKOVÉ (2015), je věnován charakteristice mramorů jednotky Bílého potoka ve svratecké klenbě moravika a stručně je diskutován jejich vztah k podobným mramorům moravika v dyjské klenbě (svrchní lukovská jednotka).

PŘEHLED GEOLOGICKÉ STAVBY JEDNOTKY BÍLÉHO POTOKA (SVRATECKÁ KLENBA MORAVIKA)

Svratecká klenba moravika, jejíž součástí je jednotka Bílého potoka („vnitřní fylity“ podle SUESSE 1912), patří z regionálně-geologického hlediska do oblasti, která představuje nejzápadnější, varisky přepracovanou část brunovistulika (?); na konkrétní postavení a tedy i hranice jednotlivých jednotek s odlišnou geologickou náplní však nepanuje jednotný názor (SUESSE 1912, DUDEK 1958, CHÁB *et al.* 2008). Rovněž na podíl kadomských vs. variských tektonometamorfních procesů v moraviku existují rozdílné názory, které diskutoval BATÍK (2004).

Jednotka Bílého potoka je vymezena jako komplex hornin spodní části morávního příkrovu (moravosilesika), přesunutého po dřínovském nasunutí přes paraautochton „svrateckého masivu“ s jeho metasedimentárním obalem (obr. 1), řazeným převážně k brunovistuliku (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, KACHLÍK 1989, SCHULMANN *et al.* 1991, HANŽL *et al.* 2007). Při jejich tektonické hranici vystupují paleontologicky doložené devonské sedimenty, zejména rekrystalované a silicifikované heroltické vápence tzv. květnického vývoje a klastika závistské jednotky (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, BOŠÁK 1983, JAROŠ 1991, MÍSAŘ 1995, BATÍK 2004, ŠPAČEK *et al.* 2001), příp. devonská siliciklastika tzv. želetické jednotky (LEICHMANN *et al.* 2006).

Většina současných představ o geologické náplni a metamorfóze jednotky Bílého potoka se opírá, kromě publikací JAROŠE a MÍSAŘE (1976), KACHLÍKA (1989), JAROŠE (1991), SCHULMANNA *et al.* (1991) a MÍSAŘE (1995), pouze o dílčí poznatky z prací WEBERA (1996) a HANŽLA *et al.* (2007) a analogie s podrobněji prostudovanou dyjskou klenbou (BATÍK 1984, HÖCK 1995, ŠTÍPSKÁ a SCHULMANN 1995, ŠTÍPSKÁ *et al.* 2000).

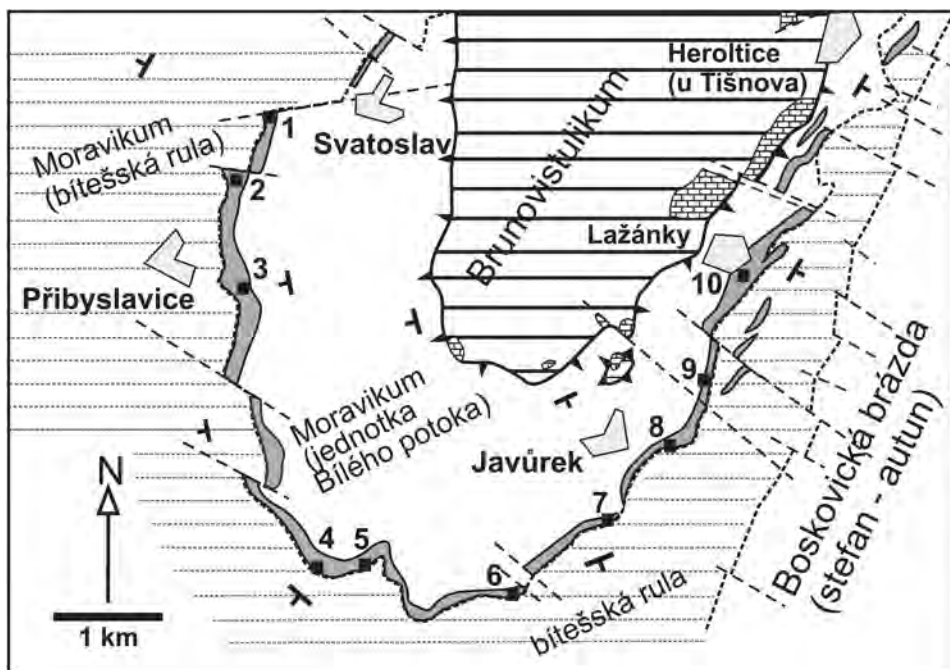
Horninovou náplň jednotky Bílého potoka tvoří převážně metapelity, a to chlorit-muskovitické fylity až svory, lokálně laminované, s biotitem, grafitem, příp. s granátem, s vložkami kvarcitů a metabazitů, a muskovit-biotitické fylity v jejich nadloží (KACHLÍK 1989, HANŽL *et al.* 2007).

Tento, jinak relativně monotónní komplex, je tvořen fylity až drobnozrnnými svory s dominující minerální asociací *křemen + albit (oligoklas) + muskovit + biotit ± chlorit*, k níž lokálně přistupuje *granát (almandin)* a *klinozoisit-epidot*. Z akcesorických minerálů byl zjištěn vedle magnetitu a ilmenitu zejména typický žlutozelený až žlutohnědý turmalin (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, KACHLÍK 1989). Nejvýše, při styku s bitešskou ortorolou, se vyskytuje nápadná mocnější poloha drobnozrnných tmavých mramorů, menší polohy těchto hornin se nacházejí i v nižší pozici. Hlavní složkou mramorů je kalcit, uvádí se též dolomit (KALÁŠEK *et al.* 1952). Vyšší (< 10 %) je podíl nekarbonátové příměsi (biotit a muskovit, křemen, méně albit, ojediněle K-živce, pyrit, magnetit, grafitický pigment, místy titanit; NĚMEC 1961, KACHLÍK 1989, HANŽL *et al.* 2007). Vedle muskovitu a biotitu je akcesoricky zastoupen též rutil, charakteristické jsou žilky Fe-dolomitu s fialovým fluoritem. Na rozdíl od mramorů olešnické jednotky a přilehlého moldanubika jsou relativně chudé Mg a bohaté Fe (Fe, Mg-kalcit, biotit místo flogopitu, Mg-, Fe-muskovit). Na bezprostředním kontaktu s ortorolou mramory často zastupují vápenatosilikátové horniny (SUESSE 1912, JAROŠ a MÍSAŘ 1976,

HOUZAR *et al.* 2012). Při kontaktech s podložními horninami polohy mramorů obsahují menší „útržky“ zavrásněných fylitů. Nejasná je pozice ojedinelých anomálně železnatých „metasideritových“ a magnetit-grunerit-sideritových hornin, které nemají v okolních krystalinických jednotkách obdobu (VÍŠKOVÁ *et al.* 2013). Tento komplex pozvolna přechází do spodní části, odlišné zejména nízkým obsahem biotitu v metapelitech.

Ve spodní části jednotky Bílého potoka převažují chlorit-muskovitické fylity s nízkým obsahem biotitu s hojnějšími vložkami muskovitických kvarcitů, zatímco mramory zde téměř chybějí (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, NOVÁK *et al.* 1991, HANŽL *et al.* 2007). Méně hojnou součástí spodní části fylitového komplexu jsou i „metabazity“ (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, MÍSAŘ 1995); horniny takto označované jsou však převážně chloritické fylity s muskovitem bohaté křemenem, lokálně i magnetitem, s akcesorickým almandinovým granátem s vyšším podílem Mn a Ca-složky (HOUZAR *et al.* 2012), příp. s menším množstvím křemene, s epidotem-zoisitem, biotitem a plagioklasem, původně snad tufity (KACHLÍK 1989).

Strukturní vývoj mramorů moravika v této oblasti studoval podrobně ULRICH *et al.* (2002). Rozlišil 3 mikrostrukturní typy kalcitu, které částečně přiřazuje třem deformačním fázím D1–D3 (D1 je spojena s barrovienskou metamorfózou všech jednotek moravika), zmiňuje vliv slíd na přednostní orientaci kalcitu a uvádí absenci post-kinematické rekrystalizace. Metamorfní podmínky komplexu odpovídají podle WEBERA (1996) převážně biotitové, méně granátové zóně. Typická minerální asociace pro metapelity biotitové zóny křemen + biotit + muskovit (sericit) + chlorit + albit odpovídá $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ při 4 kbar a pro metapelity granátové zóny křemen + biotit + muskovit (sericit) + chlorit + granát + oligoklas + ilmenit byla pro P 4,5–6 kbar určena $T 424\text{--}438\text{ }^{\circ}\text{C}$. ULRICH *et al.* (2002) vychází z údajů WEBERA (1996) a uvádí pro progradní metamorfózu T cca $420\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 1. Geologická pozice mramorů jednotky Bílého potoka (moravikum). Čísla v obrázku odpovídají číselným lokalitám v textu (upraveno podle HANŽLA *et al.* 2007 a MÍSAŘE 1997).

Fig. 1. Geological position of the Bílý Potok Unit marble (Moravikum). The locality numbers match with those in the paper (HANŽL *et al.* 2007 and MÍSAŘ 1997, modified).

a $P = 4,5\text{--}5,5$ kbar, pro retrográdní T cca $300\text{--}350$ °C a $P = 3\text{--}4$ kbar. Metamorfóza jednotky Bílého potoka byla multifázová. Při starší fázi, která odpovídá „střední moravské fázi“ (Frasl in CHÁB a SUK 1977), vznikly typické minerální asociace barrovienského typu. Měla prográdní charakter a podle $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ datování muskovitu a amfibolu v bitešské rule byla variského stáří (DALLMEYER *et al.* 1992). Mladší pozdně variská „mladomoravská fáze“ byla retrográdní a projevila se chloritizací biotitu a granátu a druhou generací muskovitu a vzácně i biotitu, který rostl napříč vzhledem ke starší foliaci (WEBER 1996).

Moderní studium litostratigrafie a petrogenese jednotky Bílého potoka dosud chybí.

V dyjské klenbě je ekvivalentem jednotky Bílého potoka svrchní část lukovské jednotky (JAROŠ a MÍSAŘ 1976, BATÍK 1984) a tato část se v rakouské části označuje jako perneggská formace. Obě části lukovské jednotky, svrchní a spodní, jsou oddělené weitersfeldskou (plessingskou) ortorolou, mají odlišnou litologii a metamorfní vývoj; spodní část je v Rakousku známá jako theasburgská formace (HÖCK 1975).

METODIKA

V terénní etapě byly odebrané vzorky na cca 10 lokalitách po celém obvodu studované jednotky (obr. 1, tab. 1), z nichž byly zhotoveny výbrusy a ve třech případech (lok. 2, 3 a 9) provedeny chemické analýzy. Ve výbrusech byla polarizačním mikroskopem studována minerální asociace mramoru (zčásti v odraženém světle u opakních fází), pouze při určení některých minerálů bylo využito stanovení chemického složení. To bylo stanoveno na elektronové mikrosondě Cameca SX-100 převážně metodou EDX a ojediněle i ve vlnové disperzním módu (WDS) v Laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy, společném pracovišti Masarykovy univerzity a České geologické služby, Brno (analytik P. Gadas). Minerály byly analyzovány při urychlovacím napětí 15 kV při proudu svazku 10 a 10 nA, průměr svazku 2 a 5 μm , u karbonátů 10 μm , za použití následujících standardů: Si, Al, K – sanidín, Mn – spessartín, Mg – pyrop a Mg_2SiO_4 , Na – albit, Ba – baryt, Ca – wollastonit, Fe – almandin, P – fluorapatit, Rb – Rb-leucit, Cs – pollucit, Cr – chromit, Cl, Pb – vanadin, Th – brabantit, Sr, S – SrSO_4 , Sc, V – ScVO_4 , Sn – Sn, Nb – columbit (Ivigtut), Ta – CrTa_2O_6 , Hf – Hf, U – U, Y – YPO_4 , F – topaz, Ti – titanit, Zn – gahnit, Zr – zirkon, REE – příslušné REE-fosfáty. Slídy s hnědým pleochroismem označujeme předběžně souhrnným termínem biotit, protože není ve všech případech známo jejich přesné chemické složení, jednotlivé analýzy odpovídají železnatému flogopitu.

Bylo provedeno podrobné studium katodoluminiscence (CL) na lokalitách 1, 3, 4, 6–8 na katodoluminiscenčním mikroskopu Simon-Neuser s horkou katodou HC2-LM typu, která používá jako zdroj elektronů tenký wolframový drát (srov. HOUZAR a LEICHMANN 2003, KAPINUS 2004). Elektrony jsou urychlené anodovým napětím (do 15 kV), při proudu 10 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$; při dopadu na výbrus pokovený uhlíkem vzniká intenzivní luminiscence (expozice 10 a 30 s).

V AcmeLabs (Analytical Laboratories Ltd., Vancouver, Kanada) byly z stanovené hlavní oxidy metodou ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry). Stopové prvky a REE (rare earth elements) byly analyzované metodou ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Analytické skupiny A4B4 – hlavní oxidy, Ba, Be, Co, Cr, Cs, Ga, Hf, Nb, Ni, Rb, Sc, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zr, REE; 1DX – Ag, As, Au, Bi, Cd, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn; 2ALeco – C_{tot} , S_{tot} (blíže viz. <http://acmelab.com>).

VÝSLEDKY

Makroskopická charakteristika

Mramory ze všech lokalit jsou makroskopicky téměř shodné. Jde převážně o masivní, tmavošedé, drobnozrnné horniny, jen v případech vyššího obsahu usměrněných agregátů slíd

s patrnou foliáci. Světlejší variety mramoru jsou vzácnější a tvoří v tmavých mramorech jen podřízené polohy. Mramory často obsahují hruběji zrnité bílé až světle hnědé, složitě provrásněné agregáty (zčásti žily?) kalcitu a větších deformovaných zrn křemene. Charakteristickým znakem mramorů jednotky Bílého potoka jsou též zřetelné mladší, příčně k foliáci uspořádané žilky Fe-dolomitu a kalcitu s akcesorickým fialovým fluoritem, vzácně s křemenem a ojediněle s jehlicovitým rutilem.

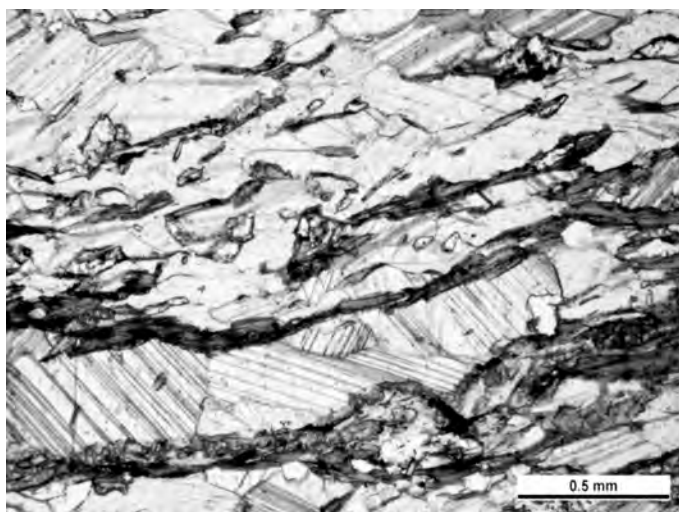
Petrografie mramorů a katodoluminiscenční výzkum

Studované mramory představují z litologického hlediska poměrně monotónní, petrograficky jednotné, drobnozrnné šedé horniny s jednoduchou minerální asociací: kalcit + křemen + albit + muskovit ($\leq 0,062$ apfu Fe a $0,186-0,220$ apfu Mg) + železnatý flogopit ($X_{Fe} \sim 18-20$) + titanit \pm dolomit \pm chlorit, s akcesorickým rutilem a turmalínem dravitového složení (obr. 2). S výjimkou dominujícího kalcitu ($> 90\%$) a akcesorického titanitu odpovídá minerální asociaci okolních metapelitů. Vzájemná hranice obou hornin je ostrá. Z hlediska katodoluminiscence dominuje v mramorech tmavý Fe-kalcit I s úzkými lemy světlého kalcitu II. Kalcit III je světlý, zastoupený v jednotlivých větších zrnech nebo je částí součástí mocnějších provrásněných žilek, vzácnější kalcit IV v něm vyplňuje intergranuláry. Hlavní strukturní a CL-typy studovaných mramorů jsou uvedeny na obr. 3a-h.

Svatoslav (lokality 1, 2)

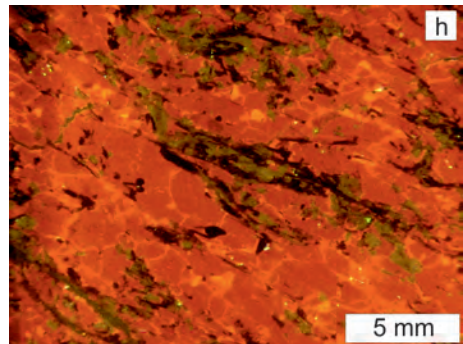
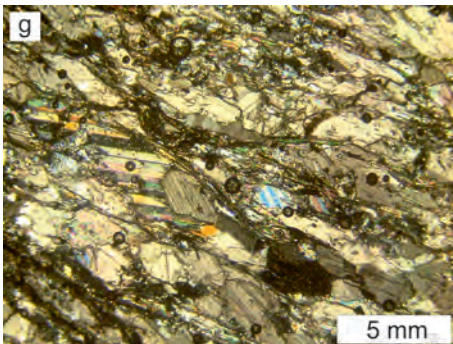
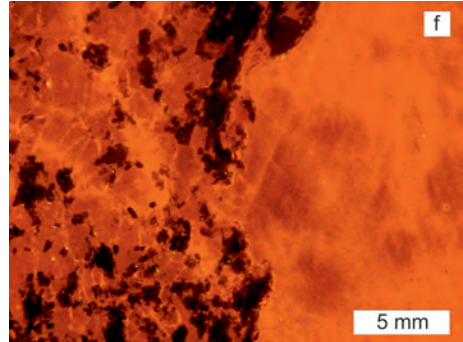
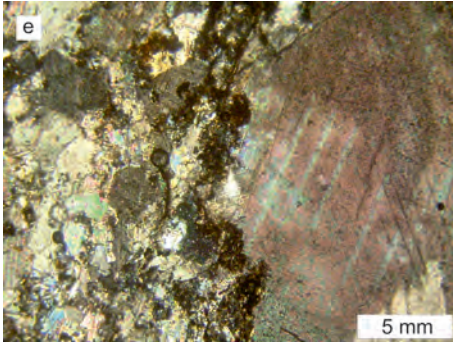
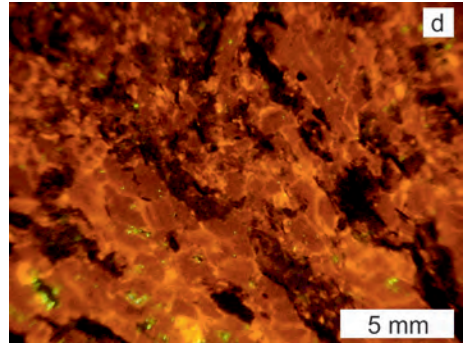
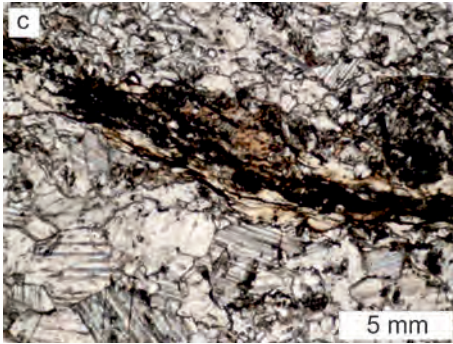
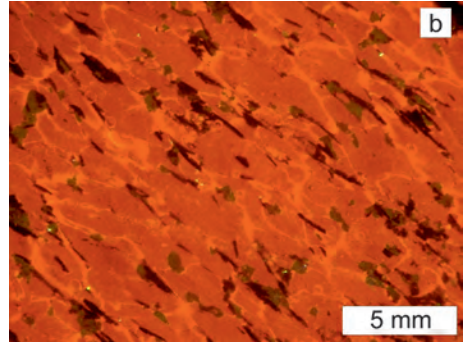
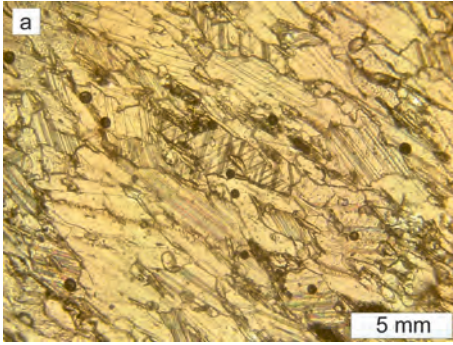
Mramor má heteroblastickou, lepidogranoblastickou strukturu. Na minerálním složení se podílejí hlavně silně usměrněná zrna *kalcitu* a světle hnědý *biotit*, soustředěný do mírně provrásněných nesouvislých proužků uložených ve směru protažení kalcitu (obr. 2). Podél proužků biotitu se nacházejí drobné agregáty *muskovitu* a černý *grafitický pigment*. *Křemen* vytváří izolovaná izometrická i protáhlá anhedrální zrna vyskytující se rovnoměrně v celé hornině. Typickým akcesorickým minerálem je zelenavě žlutohnědý *dravitový turmalín*, v asociaci s biotitem i jako drobná ($< 0,5$ mm) zrna v kalcitu, ojediněle je *zirkon*.

Z hlediska CL má mramor heterogenní stavbu, která je tvořena až 1 mm velkými zrny kalcitu I (tmavě oranžová CL), která je proniknuta tenkými žilkami kalcitu II, příp. III (světle oranžová CL). Křemen se zelenavě šedou CL tvoří anhedrálně omezená zrna, výrazně protažená ve směru foliačních ploch. Slídy ani grafit nejeví žádnou luminiscenci (obr. 3a, b). Mezi kalcitem a ostatními minerály nejsou patrné žádné reakční struktury.



Obr. 2. Biotitický kalcitický mramor (PPL), lokalita Svatoslav.

Fig. 2. Biotite calcite marble (PPL), Svatoslav.



Přibyslavice (3)

Mramor má homoblastickou, lepidogranoblastickou strukturu a výraznou plošně paralelní texturou zvýrazněnou střídáním kalcitem a slídkami bohatých proužků. Převládají protáhlá zrna *kalcitu* a usměrněné agregáty slídk, mezi nimiž převládá hnědě pleochroický *biotit* nad muskovitem. *Muskovit* je lokálně hojnější, doprovázený světle zeleným chloritem. Vzácnější je lištvitý biotit, orientovaný příčně k foliaci. Hojná jsou izometrická i protáhlá zrna undulózně zhašejícího *křemene* (0,2–1 mm), často srůstající s muskovitem a až 0,3 mm velká subhedrálně omezená zrna *albitu*. Akcesorický je *grafit*, někdy v drobných šupinkách (< 0,2 mm) a v některých partiích s muskovitem *rutil*, zřídka obrůstáný *titanitem*; s biotitem je sdružen *dravitový turmalín*. Lokálně hojný je *pyrit* v ojedinělých zrncích a až několik mm velkých agregátech. Drobné žilky vyplňuje hruběji zrnitý kalcit a *Fe-dolomit*, který stejně jako pyrit hojně zvětrává na goethit.

V CL má mramor stavbu velmi podobnou předcházející lokalitě Svatoslav (1), je jen více heterogenní.

Zbraslav (4)

Hornina má granoblastickou strukturu a masivní strukturu s patrnou rekrystalizací kalcitu (srov. NĚMEC 1961). Kromě *kalcitu*, tvořícího v podobě mozaiky složené z izometrických zrn základní matrix, tvoří kalcit (\pm křemen) i hruběji zrnité rekrystalované partie. *Biotit*, někdy chloritizovaný, tvoří drobné lišty a lokálně i protáhlé drobně lupenité agregáty lemující rekrystalovaný kalcit, a běžný je také v tenkých polohách bohatých *grafitickým* pigmentem (obr. 3c). *Křemen* je rovnoměrně rozšířený ve formě drobných izometrických zrn v celé hornině, podobně jako *grafit* – ten však tvoří i relativně mocnější pásy. Ojedinělý *plagioklas* má vysokou bazicitu ($>An_{40}$), zatím nejvyšší v této jednotce. Z akcesorických minerálů byl zjištěn *titanit* s relativně vyšším Al a F (tab. 1), samostatný i obrůstající *rutil*.

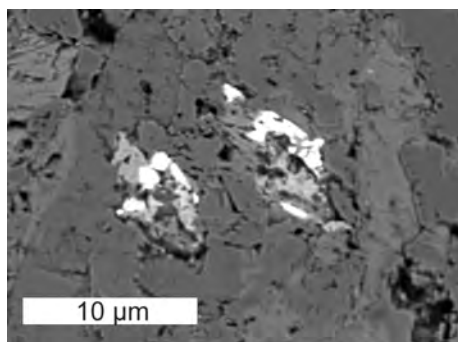
Katodová luminescence zdůrazňuje rekrystalizaci mramoru, proběhlou v několika fázích. Lze rozlišit převládající základní matrix – kalcit I (tmavě oranžová CL), která je rekrystalizovaná za vzniku mladšího kalcitu II (světle oranžová CL). Patrné jsou též drobná zrna a žilky kalcitu III (nejsvětlejší oranžová CL). Mladší kalcit III (makroskopicky bílý) proniká do staršího kalcitu I a II (makroskopicky šedý). V CL jsou patrné i minerály s výraznou modravě a žlutě zelenou luminescencí, avšak velikostí < 5 μ m (obr. 3d a 4). Podle EDX-analýz se jedná o *LREE-fluorokarbonáty (synchysit?)*; v jednotlivých zrncích byl zaznamenán podstatný obsah Ce a zvýšený podíl F a Th.

Rudka (6)

Studovaný mramor je příkladem tektonicky silně porušeného a rekrystalizovaného heteroblastického typu, v němž hlavní složku tvoří *kalcit* ve formě izometrických anhedrálně

Obr. 3. Struktury mramorů: Svatoslav a) asociace kalcit-muskovit-biotit-křemen (PPL), b) dtto (CL); Zbraslav c) rekrystalovaný, příměsmi chudý mramor s agregátem slídk a grafitu, (PPL), d) kalcitický mramor s křemenem a slídkami, vlevo dole REE minerály s jasně žlutozelenou luminescencí (CL); Domašov e) heterogenní rekrystalizovaný mramor (XPL), f) dtto (CL); Javůrek g) usměrněný mramor s fyllosilikáty a křemenem (XPL), h) dtto (CL).

Fig. 3. Optical microphotographs of marble textures in plain-polarized light (PPL), cross-polarized light (XPL) and their cathodoluminescence (CL): PPL (a) and CL images (b) of the assemblage calcite + muscovite + biotite + quartz from Svatoslav; PPL image (c) of mica and graphite aggregate in recrystallized marble from Zbraslav; CL image (d) of calcite marble with quartz, micas, and yellow-green fluorescent REE minerals (in bottom left corner of the image) from Zbraslav; XPL (e) and CL images (f) of heterogeneous recrystallized marble from Domašov XPL (g) and CL images (h) of a foliated marble with phyllosilicates and quartz from Javůrek.



Obr. 4. Anhedrální zrna *LREE*-karbonátů (bílá) v asociaci s kalcitem, křemenem a fylosilikáty; lokalita Zbraslav, (BSE, foto P. Gadas).

Fig. 4. Anhedral grains of *LREE*-fluorocarbonates (white) in calcite+quartz+phyllosilicate matrix; Zbraslav locality (BSE image, photographs by P. Gadas).

omezených zrn i ve formě četných sekundárních hydrotermálních (?) žilek, které jsou orientované napříč foliačními plochami. V části těchto žilek je zastoupen i *Fe-dolomit*, zvětřavající v „limonit“. Jen v nepatrném množství se v hornině nachází grafit, slída, křemen, živce a titanit. *Grafitický pigment* v zrnech kalcitu je jemnozrný a je roztroušený po celé hornině ve formě malých provrásněných čoček a tenkých žilek, které jsou orientované paralelně se stavbou mramoru. V intergranulárách kalcitových zrn je nehojná velmi světle pleochroická hnědá slída (*Fe-flogopit* nebo *fengitický muskovit*?). *Křemen* a slabě alterovaná živce tvoří drobná, rovnoměrně rozptýlená zrna, podobně jako vzácný *titanit*.

Mramor je silně rekrystalizovaný. V CL je patrná převládající jemnozrná matrix mramoru - kalcit I (tmavě oranžová CL), četné světlejší kalcitové žilky (kalcit II se světle oranžovou CL), větší zrna kalcitu III (světlejší oranžová CL), lokálně s dolomitom, a drobná zrna kalcitu IV (oranžově žlutá CL) ve výplni drobných dutin. Mladší světlejší žilky kalcitu II (makroskopicky bílé žilky) přecházejí do matrix kalcitu I (makroskopicky šedý kalcit) a zatlačují ji difúzně podél mikrotrhlín. Kalcit III a kalcit IV se vyskytují uprostřed mocnějších žilek kalcitu II, jde o vícegenerační symetrické hydrotermální žily. Světlejší CL u kalcitu III a zejména IV pravděpodobně souvisí s „vyčištěním“ kalcitu I od Fe, které přednostně vstupovalo do *Fe-dolomitu*. Křemen, živce, flogopit ani grafit nejeví žádnou luminiscenci.

Domašov (7)

Rovněž zdejší mramor je místy velmi silně rekrystalovaný (velikost některých zrn > 1 mm). *Kalcit* vytváří izometrická i protáhlá zrna, je také zastoupený ve formě sekundárních žilek, orientovaných napříč foliací. *Křemen* tvoří anhedrální, vesměs undulózně zřáhající zrna, protáhlé agregáty až úzké žilky. Nehojný je euhedrálně omezený sericitizovaný

Tabulka 1. Přehled studovaných lokalit.

Table 1. List of marble localities studied.

lokality/locality	popis lokality(locality characteristics)	WGS souřadnice/coordinate
Svatoslav (1)	výchoz 10 x 4 m, 2,6 km z. od obce	49.29916 N; 16.28711 E
Svatoslav (2)	opuštěný lomek vpravo od silnice do Přibyslavic	49.29021 N; 16.28212 E
Přibyslavice (3)	opuštěný lom a výchozy 1 km v. od obce, U sv. Františka	49.27980 N; 16.27964 E
Zbraslav (4)	výchozy a opuštěné lomy 1,6 km s. od obce	49.23424 N; 16.29985 E
Zbraslav (5)	opuštěné lomy v prostoru 1,7 km ssv. od obce	49.23603 N; 16.30604 E
Rudka (6)	úločky mramoru 1,5 km jv. od obce	49.23181 N; 16.33803 E
Domašov (7)	malý výchoz mramoru v poli asi 1,5 km v. od obce	49.24248 N; 16.36016 E
Javůrek (8)	opuštěný lomek 0,7 km v. od obce	49.25312 N; 16.37123 E
Javůrek-Bílý potok (9)	výchoz na břehu Bílého potoka, 1 km sv. od obce	49.26211 N; 16.37987 E
Lažánky (10)	výchozy mramoru na jv. okraji obce	49.28231 N; 16.39605 E

albit, *muskovit* ($Mg > Fe$) a nahnědlý *biotit* ve velmi drobných zrnech a lupíncích ($< 0,2$ mm). Opakní hmota je tvořená převážně velmi jemným *grafitickým pigmentem*, který je často sdružen s drobnými polohami bohatými chloritizovaným biotitem a *pyritem*. V mladších žilkách je častý *Fe-dolomit* a ojediněle *fluorit*.

Podobně jako v předešlém případě v CL dominuje převážně kalcit I (tmavě oranžová CL) vázaný na matrix a mladší kalcit II (světle oranžová CL), zatímco nekarbonátové minerály nejeví žádnou luminiscenci. Kalcit II, příp. kalcit III tvoří také i větší bílé žilky, v nichž je grafitický pigment vytlačován k okrajům (obr. 3e, f).

Javůrek (8, 9) – Lažánky (10)

Mramor má lepidogranoblastickou, heteroblastickou strukturu. *Kalcit* v něm vystupuje ve formě relativně velkých, protáhlých, místy však i izometrických zrn (místy i nad > 1 mm). Z nekarbonátové složky dominuje lištovitý hnědý *biotit*, někdy srůstající s křemenem v podobě slabě zavrásněných „útržků“ fylitů. kromě těchto případů jsou slidy, včetně malého množství *muskovitu*, relativně vzácné (obr. 3g). S biotitem je sdružený i opakní *grafitický pigment*. Zjištěna byla i samostatná izometrická zrna *křemene* a alterovaného *albitu*, příp. *K-živce*. Relativně hojným akcesorickým minerálem je v některých případech *titanit*, v subhedrálně až euhedrálně omezených zrnech, místy obrůstající *rutil*. Vzácnější je *pyrit* a žlutohnědý až hnědozelený *dravitový turmalín*. V mladších žilkách je vedle *Fe-dolomitu* i akcesorický *fluorit*. Podobné asociace byly zjištěny i v dnes zaniklém lomku jižně od předchozí lokality, kde za zmínku stojí jen relativně hojnější *fluorit*, a rovněž ve výchozech při Bílém potoce (lokalita 9), kde byla zjištěna i asociace *rutil* + *muskovit*, hojnější *turmalín*, pseudomorfozy *sericitu* po živcích a mladší *fluorit* s *Fe-dolomitem*. Analogická minerální asociace se vyskytuje u severnějších Lažánek (10), jen s poněkud vyšším obsahem slíd, zvláště *muskovitu*, euhedrálním *albitem*, hojným *pyritem* a akcesorickým *turmalínem* a *rutilem*.

Při CL studiu byla zjištěna jako převládající složka větší zrna kalcitu I (tmavě oranžová CL) a drobnější zrna mladšího kalcitu II (světle oranžová CL), který vyplňuje intergranuláry na styku větších zrn kalcitu I nebo se vyskytuje ve formě mladších žilek. Lokálně je ve větším množství přítomna nekarbonátová komponenta, s výjimkou *křemene* (hnědošedá CL) bez patrné luminiscence (obr. 3h).

Petrografie mramorů

Mramory představují výrazný litostratigrafický horizont o průměrné mocnosti cca 10 m v jinak poměrně monotónním komplexu muskoviticko-biotitických, granát-chlorit-biotitických a grafitických fylitů. Protolitem tohoto komplexu byly jílovité sedimenty, lokálně s menší tufitickou příměsí (KACHLÍK 1989). JAROŠ a MÍŠAŘ (1976) uvádějí místy rovněž polohy granátických svorů a vzácněji kvarcitů. Výjimečně se vyskytuje i magnetit-siderit-gruneritová hornina, případně i „metasiderity“ nejasného genetického postavení (VÍŠKOVÁ *et al.* 2013).

Petrografický i katodoluminiscenční výzkum vyčlenil mezi mramory dva hlavní typy: (a) šedé muskovit-biotitické mramory s lepidogranoblastickou strukturou (obr. 5a) a (b) bílé mramory chudší silikáty s heteroblastickou strukturou (obr. 5b).

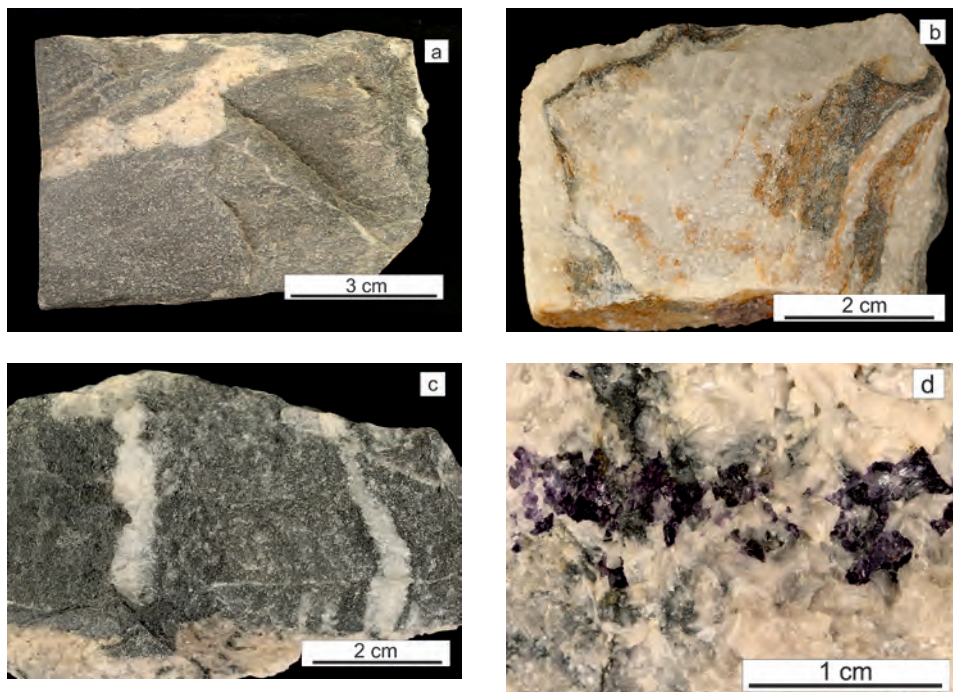
V prvním případě (a) jde o stejnoměrně zrnité tmavé kalcitické mramory bohaté drobnými zrny *křemene* a *živců* s neprůběžnými, mírně zvrásněnými pásy fylsilikátů ($Bt > Ms$), v nichž se vykytuje akcesorický *turmalín*. Stejně minerály jsou obsaženy i v jednotlivých zrnech kalcitu. Častý je grafitický pigment, akcesorický *pyrit*, *rutil* a *titanit*. Mezi kalcitem a nekarbonátovou složkou nejsou patrné žádné reakční textury s výjimkou zatlačování *rutilu* *titanitem* podle reakce (1) $kalcit + křemen + rutil \rightarrow titanit + CO_2$ (HUNT a KERRICK 1977). Rovněž CL studium ukazuje na vznik minerální asociace rekrystalizací primárního kalcitu I a nekarbonátových příměsí.

Pro druhý, vzácnější typ světlého mramoru (b), platí přibližně totéž co pro první typ (a), obsahuje však často až pygmaticky provrásněné bílé partie centimetrových mocnosti

(vrásky toku v silně plastickém prostředí), v nichž podíl relativně hrubozrnnějšího kalcitu převyšuje i 95 %; jejich rozšíření je nepravidelné (obr. 5b, c). Struktura mramoru je heterogenní, organický pigment je převážně soustředěn do agregátů až nesouvislých žilek velikosti < 1 mm na hranicích zrn, slidy jsou vzácnější a často chybí akcesorický dravitový turmalín i titanit. Část karbonátů je produktem rekrystalizace a „vyčištění“ staršího kalcitu I od Fe. To vstupuje zejména do dolomitu, který srůstá s kalcitem III v silněji rekrystalovaných partiích nebo je vázán na zřetelně mladší žilky o složení kalcit+dolomit±fluorit (obr. 5D). Zrna dolomitu jsou rovněž společně s kalcitem II součástí původní horniny. Kromě vzácnějšího titanitu, vzniklého reakcí (1), je patrná pouze rekrystalizace staršího kalcitu I, příp. kalcitu II. Bílé „cukrovité mramory“ mohou souviset s odstraněním grafitického pigmentu při opakované rekrystalizaci (srov. např. SCHMID a FLAMMER 2002, BERGER a HERWEGH 2004) nebo šlo o primárně odlišný protolit.

Chemické složení mramorů

Chemické složení mramorů bylo studováno pouze na třech lokalitách, proto lze údaje pokládat pouze za orientační (Tab. 3). Překvapivá je však shoda všech analýz, která odpovídá přibližně shodnému petrografickému složení mramorů, zjištěnému na všech studo-



Obr. 5. Mramory jednotky Bílého potoka: a) převládající typ mramoru (a), Domašov; b) středně zrnitý ojedinělý mramor typu (b), Příbyslavice, Javůrek; c) střídání šedého (a) a bílého (b) typu, s příčnou žilou nažloutlého mladšího dolomitu s fluoritem (dole), Javůrek; d) fluorit v dolomitu – mladá postmetamorfní žilka v šedém mramoru typu (a), Javůrek. Foto J. Toman.

Fig. 5. Marble types characteristic for the Bílý Potok Unit: a) prevailing marble type (fine-grained gray marble, rich in silicates), Domašov; b) less frequent white medium-grained marble, Příbyslavice; c) alternation of the gray and white marble types, with a younger cross-cutting vein with yellowish dolomite and fluorite (bottom), Javůrek; d) fluorite enclosed in dolomite from a younger postmetamorphic veinlet in gray marble a-type, Javůrek. Photographs by J. Toman.

Tabulka 2. Analýzy silikátů z některých lokalit mramorů jednotky Bílého potoka.

Table 2. Analytical data for silicates from selected marble localities in the Bílý Potok Unit.

lokalita	titanit	biotit		muskovit		andezín	albit	albit
	Zbraslav	Zbraslav	Zbraslav	Příbyslavice	Domašov	Zbraslav	Domašov	Domašov
SiO ₂	30,71	40,85	41,71	46,65	47,48	57,55	68,63	68,44
TiO ₂	34,43	1,03	0,27	0,94	0,25	b.d.	b.d.	b.d.
Al ₂ O ₃	3,02	16,26	13,82	32,25	33,19	26,50	19,43	19,90
FeO	0,11	8,06	7,54	0,99	0,36	0,09	0,04	0,10
MgO	b.d.	17,56	20,27	1,85	2,22	b.d.	b.d.	b.d.
CaO	28,77	0,04	0,14	0,25	0,20	8,57	0,22	0,15
K ₂ O	b.d.	10,00	9,35	10,67	10,77	0,10	0,07	0,29
Na ₂ O	0,03	0,08	0,49	0,38	0,47	6,78	11,97	11,42
Rb ₂ O	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0,06	0,13	0,06
H ₂ O*	-	3,45	3,25	4,34	4,38	-	-	-
F	1,02	1,43	1,84	0,20	0,26	-	-	-
O=F	-0,43	-0,60	-0,77	-0,08	-0,11	-	-	-
Celkem	97,74	98,20	97,91	98,45	99,49	99,65	100,49	100,36
			12 O				8 O	
Si ⁴⁺	1,010	2,967	3,031	3,153	3,162	2,586	2,991	2,982
Ti ⁴⁺	0,852	0,056	0,015	0,048	0,013			
Al ³⁺	0,117	1,392	1,184	2,569	2,605	1,403	0,998	1,022
Fe ²⁺	0,003	0,490	0,458	0,056	0,020	0,003	0,001	0,004
Mg ²⁺		1,901	2,196	0,186	0,220			
Ca ²⁺	1,014	0,003	0,011	0,018	0,014	0,413	0,010	0,007
K ⁺		0,927	0,867	0,920	0,915	0,006	0,004	0,016
Na ⁺	0,002	0,011	0,069	0,050	0,061	0,591	1,011	0,965
Rb ⁺						0,002	0,004	0,002
H ⁺		1,672	1,577	1,957	1,945			
F ⁻	0,106	0,328	0,423	0,043	0,055			
O ²⁻	4,867	11,672	11,577	11,957	11,945			
CATSUM	3,000	7,749	7,830	7,000	7,011	5,010	5,020	4,998

* vypočteno ze stechiometrie, calculated by stoichiometry.

Na hranici a pod hranici stanovení, below detection limits: K, Mg, Na, Nb, REE, Sn, Ta, Th, U, V, Y, Yb, Zr (titanit); Ba, Cl, Cr, Mn, P, V, Zn (slídy, micas); Ba, Cs, P, ≤ 0,27 hm. % SrO (živce, feldspars).

vaných lokalitách. Zmínky o dolomitem bohatých polohách mramorů v jednotce Bílého potoka (např. Domašov), které jsou uvedeny v obsáhlém posudku KALÁŠKA *et al.* (1952), nebyly těmito analýzami potvrzeny, zřejmě byly tehdy analyzovány mramory rekrystalované vlivem mladších hydrotermálních fluid, s častým Fe-dolomitem až ankeritem, nebo šlo o záměnu vzorků, čemuž by nasvědčoval údaj o hojném tremolitu (KALÁŠEK *et al.* 1952).

Z provedených analýz vyplývá, že jde o kalcitické mramory s vyšší nekarbonátovou příměsí, v níž dominuje křemen. I když je část Mg a Fe přítomna v karbonátové formě, jsou jejich nositelem převážně slídy, zejména biotit. Zvýšený obsah Na odpovídá přítomnosti albitu, K může být, podobně jako Ba, kromě slíd zastoupen i v ojedinělých K-živcích. Nositel Ti je kromě biotitu zejména titanit. Podíl ostatních elementů je v průměru velmi nízký a odpovídá zjištěným minerálním asociacím. Výjimkou je Sr (912–1268 ppm), které je typické pro kalcitem bohaté vápence i mramory. Asociace Pb-Zn odpovídá ojedinělým údajům o slabém zrudnění těchto mramorů (HOUZAR *et al.* 2012), Co, Ni a V je patrně vázán

Tabulka 3. Analýzy karbonátů z vybraných lokalit mramorů jednotky Bílého potoka.

Table 3. Analytical data for carbonates from selected marble localities in the Bílý Potok Unit.

lokalita	kalcit I		kalcit II	dolomit		Fe- dolomit**
	Zbraslav	Zbraslav	Domašov	Příbyslavice	Domašov	Příbyslavice
CaO	52,62	53,90	54,95	30,79	30,69	31,98
MgO	1,30	0,63	0,32	16,88	19,05	12,75
FeO	0,80	0,74	0,25	6,78	3,35	11,08
MnO	0,17	0,10	0,03	0,12	0,02	0,05
SrO	0,10	0,08	0,05	0,02	0,07	0,01
CO ₃ *	43,35	43,54	43,67	46,83	46,98	45,84
Celkem	98,34	98,99	99,27	101,42	100,16	101,71
	3 O			6 O		
Ca ²⁺	0,953	0,972	0,988	1,032	1,025	1,095
Mg ²⁺	0,033	0,016	0,008	0,787	0,886	0,607
Fe ²⁺	0,011	0,010	0,004	0,177	0,087	0,296
Mn ²⁺	0,002	0,001		0,003	0,001	0,001
Sr ²⁺	0,001	0,001			0,001	
C ⁴⁺	1	1	1	2	2	2
CATSUM	2	2	2	4	4	4

*vypočteno ze stechiometrie, calculated by stoichiometry; **hydrotermální karbonát, hydrothermal carbonate; Ba, Na, P, Pb, Si, Zn na hranici a pod hranici stanovení, near and below detection limits.

na pyrit nebo na grafitický pigment. Podíl REE je všeobecně nízký (celkem 26–29 ppm), přičemž převládají LREE a Ce > La, což odpovídá sedimentárním vápencům jako nejpravděpodobnějšímu protolitu (VEIZER 1983).

DISKUSE A SROVNÁNÍ S MRAMORY LUKOVSKÉ JEDNOTKY V DYJSKÉ KLENBĚ

a) Litologie a geologická pozice

Protolitem převládajícího šedého typu mramoru (**typ a**) byl jílovito-písčité vápence s podílem organické a železnaté složky, čemuž odpovídá zvýšený obsah Fe v kalcitu, přítomnost B a Ti, vázaných původně na jílové minerály, se sedimentací v mírně redukčním (euxenickém) prostředí. Agregáty fylosilikátů nejsou odrazem přerušení karbonátové sedimentace, ale spíše kolísání produkce karbonátu a tlakového rozpouštění při diagenézi, zdůrazněné následnými tektonometamorfními procesy. Jednotlivá zrna křemene, příp. živce jsou nepravidelně rozmístěna v celé hornině a představují klastickou příměs. Částečně, v případě větších křemenných agregátů až žilek, může jít o import SiO₂ z externího zdroje v podmínkách výrazné deformace, příp. metamorfózy.

Protolit vzácného bílého mramoru (**typ b**) odpovídá převážně slabě písčitému vápenci s kolísajícím, celkově nízkým podílem jílovité a organické složky. Bílý mramor mohl vzniknout z tenkých poloh čistého vápence, příp. s příměsí dolomitu. V některých případech může jít i o silně deformované žíly kalcitu, které byly původně lokální součástí tmavšího sedimentárního vápence.

Mramory v obou dílčích klenbách moravika vystupují ve shodné geologické pozici. Nejvýraznější horizont tvoří nejvyšší část horninového komplexu jak ve svratecké (*jednotka Bílého potoka*), tak i v dyjské (*svrchní lukovská jednotka*) klenbě (Suess 1912). Na jejich styku je s bitešskou ortorulou je vyvinuta vápenatosilikátová hornina (tzv. fugnitzská břidlice) s minerální asociací *kalcit + tremolit + klinozoisit + titanit + křemen*, se zcela alterova-

nými (sericitizovanými) žilci (BERNROIDER 1989). Tato hornina neodpovídá petrograficky skarnům na kontaktu granitoidů a to ani retrogradně metamorfovaným (srov. EINAUDI *et al.* 1981, MEINERT 1992). Je proto velmi málo pravděpodobné, že jde o kontaktní skarn, vázaný na intruzi bítešské ortoruly; ostatně ani v přilehlých mramorech není její kontaktní vliv patrný. V případě této vápenatosilikátové horniny jde nejspíše o produkt výměnných reakcí mezi chemicky kontrastními horninami v podmínkách LT/LP metamorfózy za extrémně nízkého X_{CO_2} ve fluidech, infiltrujících podél vzájemné tektonické hranice; násun bítešské jednotky umožnily deformační vlastnosti mramorů. Souvislá poloha mramorů, vzniklá koalescencí menších mramorových těles, sloužila podle ULRICHA *et al.* (2002) za „lubrikační horizont“, situovaný podél vysoce kompetentní bítešské ortoruly, odhad celkové mocnosti mramorů na 300–400 m je však mnohonásobně přehnaný. Ojedinelé menší polohy mramorů jsou známy i z nižší úrovně obou jednotek (např. jiz. od mlýna Ve Žlebě u Radoškova).

Na rozdíl od starších názorů o litologické podobnosti dvou metapelitických komplexů (olešnická jednotka a jednotka Bílého potoka) oddělených bítešskou jednotkou je zřejmé, že mramory v olešnické jednotce (nadloží bítešské jednotky) jsou zásadně odlišné. Mramory olešnické jednotky, nehledě na její zřetelně vyšší metamorfní postižení (ULRICH *et al.* 2002) a komplikovaný vývoj minerálních asociací (HOUZAR *et al.* 2000), odpovídají výrazně rozdílné litologické sekvenci. Pro olešnickou jednotku je zvláště charakteristický podstatný podíl grafitů, grafitických rul a specifických metapelitů s evaporitickou příměsí (metaalbitity až metaoligoklasity s turmalínem, turmalín-skapolitové ruly), dále páskované mramory, velmi čisté metadolomity, četné kvarcitty a jen lokálně přítomné amfibolity (HOUZAR 2004, OPLETAL *et al.* 2007).

b) Metamorfní vývoj

O metamorfóze jednotky Bílého potoka nebylo v posledních desetiletích takřka nic publikováno. Z metapelitů jsou uváděny pouze minerální asociace odpovídající LP/LT

Tabulka 4. Chemické analýzy mramorů jednotky Bílého potoka.

Table 4. Chemical analyses from selected marble localities in the Bílý Potok Unit.

	Javůrek	Příbyslavice	Svatoslav
SiO ₂	8,7	8,7	12,3
TiO ₂	0,1	0,08	0,13
P ₂ O ₅	0,03	0,02	0,03
Al ₂ O ₃	2,21	1,68	2,72
Fe ₂ O _{3 (tot)}	0,9	0,94	1,16
MnO	0,03	0,03	0,02
Cr ₂ O ₃	0,004	0,003	0,002
MgO	1,7	1,54	2,15
CaO	46,47	48,36	44,96
Na ₂ O	0,56	0,35	0,37
K ₂ O	0,39	0,25	0,49
LOI	38,7	38,79	36,07
TOT/C	11,59	11,07	10,19
TOT/S	0,02	<0,02	0,02
Celkem	99,79	100,71	100,44
Ag	0,2	<0,1	<0,1
As	2,5	<0,5	<0,5
Ba	97	31	90
Cd	<0,1	0,2	0,1
Co	2,2	1,3	2,0
Cs	0,6	0,7	1,4
Cu	4,9	0,6	3,3
Ga	2,4	1,8	3,1
Hf	0,5	0,4	0,8
Mo	0,2	<0,1	<0,1
Nb	1,6	1,0	1,9
Ni	3,5	0,6	1,9
Pb	9,2	21,4	10,4
Rb	16,0	12,6	22,4
Sb	1,5	<0,1	<0,1
Sc	2	<1	<1
Sr	1267,9	1209,6	912,2
Th	1,3	0,7	1,7
Tl	0,2	<0,1	<0,1
U	0,6	0,3	0,5
V	17	<8	12
W	0,6	<0,5	<0,5
Y	7,0	5,8	6,3
Zn	34	25	20
Zr	20,9	13,7	23,4
La	6,7	7,0	6,6
Ce	12,0	12,7	13,4
Pr	1,55	1,53	1,58
Nd	4,9	6,1	6,6
Sm	1,07	1,20	1,21
Eu	0,23	0,20	0,21
Tb	0,19	0,19	0,20
Gd	1,06	1,11	1,21
Dy	1,02	1,06	1,08
Ho	0,23	0,21	0,26
Er	0,68	0,65	0,65
Tm	0,09	0,09	0,10
Yb	0,57	0,56	0,63
Lu	0,08	0,08	0,09

* pod mezí stanovení; below detection limits: Au, Be, Bi, Hg, Se, Sn, Ta.

metamorfóze, zařazující většinu horninového komplexu do „biotitové, příp. granátové zóny“ a je zmiňován vliv retrográdní metamorfózy (CHÁB a SUK 1977, WEBER 1996, SCHULMANN *et al.* 1991). Na základě těchto asociací lze předpokládat, že T metamorfózy dosahovala maximálně 500–520 °C, což odpovídá i zjištěným minerálním asociacím v mramorech (Ms + Qtz + Cal; Phl + Qtz + Cal; Rtl + Cal + Qtz, Cal + Dol, nepřítomnost Tr a Di) (tato práce). Jak ale ukazují publikované údaje z dyjské klenby (BERNROIDER 1989), mohl být celkový vývoj minerálních asociací složitější a to hlavně ve vztahu k složitým tektonickým poměrům. Dosavadním studiem minerálních asociací mramorů Bílého potoka však nebyly doloženy žádné reliktní asociace, které by odpovídaly původně vyššímu stupni metamorfózy, podobně jako v okolních fylitech.

Naopak metamorfóze metapelitů a částečně metakarbonátů lukovské jednotky v dyjské klenbě byla věnována větší pozornost. V metapelitech vymezil HÖCK *et al.* (1990) od V k Z oligoklasovou, granátovou a staurolitovou zónu. Určil teplotu metamorfózy pomocí biotit–granátového termometru pro přechod granát–biotitové zóny do zóny biotit–granát–staurolitové na 580 °C. Izogrady v severní části dyjské klenby protínají lito–tektonické hranice jednotek, což je důsledkem komplikované tektonické stavby (ŠTÍPSKÁ a SCHULMANN 1995, ŠTÍPSKÁ *et al.* 2000). Nejvyšší intenzita metamorfózy lukovské jednotky je uprostřed (při hranici ČR a Rakouska) a klesá směrem k severu, východu a jihu (HÖCK *et al.* 1990, ŠTÍPSKÁ a SCHULMANN 1995). Metamorfózou této jednotky se zabýval také PIVNIČKA (1995) a na základě petrografického studia metapelitů a metapsamitů vyčlenil 4 izometamorfnní zóny: chlorit – muskovitovou (300 °C), biotitovou (400 °C), biotit – granátovou (450 °C) a biotit–granát – staurolitovou (500 °C). Na vybraném vzorku svrchní lukovské jednotky stanovil teplotu metamorfózy na 537 °C při tlaku 7 kbar (PIVNIČKA 1995). Některé detailnější údaje o metamorfóze mramorů publikoval z rakouské části moravika BERNROIDER (1989). Podmínky tam odpovídaly přibližně teplotám < 520 °C a X_{CO_2} 0,16–0,30 pro P = 4 kbar; při kontaktu s bitešskou rulou uvádí z vápenatosilikátové horniny („fugnitzské břidlice“) z asociací s klínozoisitem vysokou aktivitu H₂O (X_{CO_2} < 0,04). V případě mramorů lukovské jednotky uvádí KAPINUS (2004), že metamorfóza mramorů svrchní lukovské jednotky přibližně odpovídá PT podmínkám, které zjistil v metapelitech PIVNIČKA (1995). V CL pozoroval KAPINUS (2004) i rekrystalizaci a zatlačování staršího kalcitu I mladším kalcitem II a vzácněji také kalcit III.

WEBER (1996) konstatuje, že takto vysoce metamorfované horniny nebyly zjištěny v jednotce Bílého potoka a dodává, že porovnatelné podmínky byly jen v její jižnější, nejméně metamorfované části (450–500 °C, p = 4–5 kbar) dyjské klenby (srov. HÖCK *et al.* 1990, HÖCK 1995).

HOUZAR a LEICHMANN (2003) s pomocí katodoluminiscenční mikroskopie zjistili v mramorech lukovské jednotky na lokalitě Horní Dunajovice (dyjská klenba) nehomogenní složení jednotlivých karbonátových zrn, které je výsledkem pravděpodobně nízké metamorfózy v biotitové zóně. Taktéž zdokumentovali chování kalcitických mramorů v přechodné zóně mezi biotitovou až staurolitovou zónou. Hlavní rozdíl, který zaznamenali, byla postupná homogenizace originálních sedimentárních textur, viditelná hlavně v Fe- a Mg-karbonátových zrnech, zatímco žádné metamorfnní reakce mezi nimi a silikáty až na výjimky (tremolit a titanit u Čížova), neproběhly (HOUZAR a LEICHMANN 2003, HOUZAR 2004).

c) Vztah petrografie a katodoluminiscence mramorů

Mramory v obou dílčích jednotkách „vnitřních fylitů moravika“ jsou analogické i po petrografické stránce. Reprezentují je převážně tmavošedé, drobnozrné horniny, lokálně s bílými, detailně provrásněnými a hruběji zrnitými partiemi a četnými zavrásněnými „útržky“ tmavých fylitů. Minerální složení je převážně shodné. Kromě kalcitu a malého množství dolomitu obsahují zejména hnědý Fe-flogopit (biotit), Mg > Fe muskovit, křemen, plagioklas An < 50), grafitický pigment, titanit, rutil, apatit a turmalin, avšak jejich obsah

navzájem kolísá. V jižnější části lukovské jednotky (dyjská klenba) byl navíc zjištěn klinozoidit-epidot, ilmenit a tremolit, ve „fugnitzské břidlici“ i diopsid a ojediněle snad i vesuvian (PRECLIK 1926).

V jednotce Bílého potoka lze v rámci studovaných mramorů rozlišit za pomoci CL dva texturně odlišné typy, kdy mramory v severní části (Svatoslav, Přibyslavice, Javůrek) mají na rozdíl od mramorů v jižní části (Rudka, Zbraslav, Domašov) výraznou foliaci, rozdíl jsou i ve struktuře. Toto regionální rozdělení se neshoduje se strukturami, vymezenými UL-RICHEM *et al.* (2002), který rozlišil v moraviku hruběji zrnité ($\leq 730 \mu\text{m}$) reliktní mikrostruktury typu 1, drobnozrné ($300\text{--}430 \mu\text{m}$) převládající mikrostruktury typu 2 s protáhlými zrny kalcitu a jemnozrné ($14\text{--}57 \mu\text{m}$) mikrostruktury typu 3. Mikrostruktury typu 1 pokládá za reliktní, produkty mladší rekrystalizace kalcitu ani existenci hruběji zrnitých deformovaných žil kalcitu neuvádí.

Mramory ze severní části jsou výrazně deformované, zrna kalcitu jsou zřetelně protažená ve směru foliačních ploch. Podobné protažení a slabé provrásnění má i hnědý biotit v prouzcích s velmi jemným grafitovým pigmentem. Z hlediska katodoluminiscence mají mramory ze severní části heterogenní stavbu a nejsou významně rekrystalizované. Obsahují velká tmavě oranžová zrna Fe-kalcitu I a místy drobnějšího mladšího kalcitu II (Javůrek) se světle oranžovou CL (obr. 3a, b). Nekarbonátová komponenta (biotit, grafitový pigment a křemen) je přítomná v mramoru ve velkém množství na všech třech studovaných lokalitách severní části.

Mramory z jižní části mají typickou granoblastickou strukturu, tvořenou mozaikou převážně izometrických zrn kalcitu několika generací, která je produktem rekrystalizace v několika etapách. Fylosilikáty s grafitickým pigmentem tvoří ale i v tomto typu protáhlé agregáty. Převládá jemnozrná matrix tvořená CL homogenním kalcitem I s tmavě oranžovou luminiscencí, obsahující častá zrna až žilky kalcitu II (světle oranžová CL) a větší zrna kalcitu III (nejsvětlejší oranžová CL) a vzácně i kalcit IV (oranžově žlutá CL). Ve všech studovaných vzorcích mramorů z jižní části jednotky Bílého potoka se vyskytují mladší světlejší kalcitové žilky kalcitu II (makroskopicky bílé žilky), které difúzně přecházejí do matrix kalcitu I (makroskopicky šedý kalcit) a zatlačují ji. Mramor z lokality Domašov obsahuje kalcit II, ve kterém se nachází inkluze grafitického pigmentu. Mramor z lokality Rudka má složitější stavbu a obsahuje navíc kalcit III a kalcit IV, které se vyskytují ve středech mocnějších žilek kalcitu II. Jde tedy o vícegenerační symetrické žíly.

Křemen je (kromě křemene ve slídových agregátech), stejně jako část muskovitu, flogopitu a živce v mramorech rozšířen pravidelně. Vyznačuje se zelenošedou CL, ostatní nekarbonátové minerály jsou bez CL.

Minerální asociaci a katodoluminiscenci v *mramorech lukovské jednotky* studovali detailně HOUZAR a LEICHMANN (2003). Základní matrix tvořená kalcitem I se zvýšeným obsahem Fe ($\sim 1 \text{ hm. \% FeO}$) obsahuje Mg-Fe-bohatý muskovit a železnatý flogopit a patrně odráží charakter struktury výchozích karbonátů (jílovito-písčité vápenec). Zjištěn byl ojediněle i typ bohatší LREE, které jsou patrně vázány na karbonátový podíl a nebyly přineseny mladými fluidy (HOUZAR *et al.* 2004).

d) LREE-mineralizace

Zatím jen ojedinělou akcesorii představují velmi drobná zrna LREE obsahujících karbonátů (lok. Zbraslav). HOUZAR *et al.* (2004) zjistili REE bohaté variety mramoru, které souvisejí s výskytem akcesorického synchysitu na dvou lokalitách v lukovské jednotce (Horní Dunajovice, Plaveč). Domnívají se, že v níže metamorfovaných partiích „vnitřních fylitů“ moravika, tedy i ve svratecké klenbě, může být tento typ metamorfovaných karbonátových hornin rozšířený. Tyto variety se vyznačovaly kromě zvýšeného obsahu LREE také vyšším Fe v karbonátech (Fe-kalcit s $\text{FeO} > 1 \text{ hm. \%}$), Fe-dolomit až ankerit, akcesoricky se vyskytoval fluorit, příp. rutil, a jen vzácně zmíněný synchysit-(Ce), při vyšším stupni metamorfózy zatlačovaný REE-epidotem, příp. allanitem (HOUZAR *et al.* 2004).

Na základě dosavadních výzkumů nemají tyto typy REE-mramorů obdobu v jiných mramorech okolního moravika (včetně olešnické jednotky) ani v přilehlém moldanubiku (HOUZAR 2004).

ZÁVĚR

Mramory představují typické horniny uložené v nejvyšší části jinak relativně monotónní jednotky Bílého potoka ve svratecké klenbě moravika. Tvoří dva petrografické a litologické typy, s převládajícím tmavošedým mramorem bohatým fylosilikáty a minerální asociací *křemen + albit + muskovit + Fe-flogopit + titanit ± chlorit*, s akcesorickým *rutilem* a *dravitovým turmalínem*, která je stabilní v podmínkách LP/LT metamorfózy biotitové zóny. Složení slid (Mg-, Fe-muskovit a železnatý flogopit) je charakteristické pro tuto jednotku a kromě lukovské jednotky v dyjské klenbě moravika nemá analogii v mramorech okolních jednotek na západní Moravě. S výjimkou zatlačování rutilu titanitem nebyly zjištěny žádné reakční struktury ani reliktů starší vyšší metamorfózy. Pozice ojedinělého plagioklasu s An > 40 mol. % v silně rekrystalovaném mramoru ve Zbraslavi není jasná. V menší míře je zastoupen bílý mramor, který je částečně produktem mladší rekrystalizace. Mramor z lokality Zbraslav obsahuje vzácně akcesorické fluorokarbonáty LREE s modrozelenou luminescencí, stejně jako některé mramory lukovské jednotky dyjské klenby. Těto mineralizaci by bylo vhodné věnovat další pozornost. Pro oba typy mramorů jsou charakteristické úzké postmetamorfnní žíly Fe-dolomitu a kalcitu, s akcesorickým fluoritem.

Mramory ze severnější části jednotky se vyznačují výraznější deformací, mají výraznou foliaci a lepidogranoblastickou strukturu s protáhlými zrny kalcitu. Mají heterogenní stavbu bez známek významnější rekrystalizace a lze v nich rozlišit kalcit I a méně deformovaný mladší kalcit II, příp. hrubozrnný kalcit III. Mramory z jižní části jednotky mají naopak méně výraznou foliaci a obsahují silně provrásněné, až 2-3 cm mocné bílé proužky chudé fylosilikáty. Mají heteroblastickou, granoblastickou strukturu a jsou výrazně rekrystalizované. Bylo v nich rozlišeno více generací CL kalcitu s odlišnou velikostí a tvarem zrn různě postižených deformací (kalcit I až IV), zaznamenány byly i hydrotermální postmetamorfnní vícegenerační mladší žíly.

Dosavadní studium mramorů „vnitřních fylitů“ ukazuje i na některé nedořešené problémy tektonostratigrafického pojetí moravika jako celku. Např. na hranici bitešské ortoruly s mramory, přesně sledující jediný (!) málo mocný mramorový horizont na vzdálenost 160 km (srov. ULRICH *et al.* 2002), nebyly zjištěny jakékoliv kontaktní projevy, na hranici granitoidních magmatitů s vápenci jinak zcela běžné. Neméně zajímavým problémem zůstává v moraviku nevyřešený možný výskyt dolomitických mramorů (srov. KALÁŠEK *et al.* 1952) a zejména vztah studovaných mramorů k „metasideritům“ a cummingtonit-gruneritovým břidlicím s magnetitem.

Z výše uvedených údajů i nedostatku spolehlivých údajů v citované literatuře jednoznačně vyplývá, vzhledem k důležitému geologickému postavení moravika v rámci evropských Variscid, nutnost moderního petrologického studia svratecké klenby, které by se opíralo též o detailnější výzkum jeho litostratigrafie a tektonometamorfnního vývoje včetně radiometrického datování.

Poděkování

Předložená práce vychází z bakalářské práce autorky J. Kršiakové, vedené doc. Dr. J. Leichmannem, vypracované na Přírod. fakultě MU v Brně. Výzkum byl podpořen prostředky specifického výzkumu UGV PřF MU. Oběma recenzentům, Mgr. K. Hrdličkové a RNDr. P. Ružičkovi, Ph.D., děkujeme za podnětné připomínky a komentáře k textu. Za další podporu, rady a technickou pomoc při zhotovení výbrusů vděčíme doc. RNDr.

Zdeňkovi Lososovi, CSc, Mgr. Renatě Čopjakové, Ph.D., Mgr. Davidovi Buriánkovi, Ph.D, Petrovi Zaunstöckovi, Libuši Plchové a Stanislavu Šiveňovi.

LITERATURA

- BATÍK, P., 1984: Geologická stavba moravika mezi bitešskou rulou a dyjským masivem. - *Věst. Ústř. úst. geol.*, 59, 6, 321-330.
- BATÍK, P., 2004: The contact between the Variscan and Cadomian blocks in the Svratka Dome (Bohemian Massif, Czech Republic). - *Bull. Geoscience*, 79, 4, 243-250.
- BERGER, A., HERWEGH, M., 2004: Grain coarsening in contact metamorphic carbonates: effects of second-phase particles, fluid flow and thermal perturbations. - *J. Metamorph. Geol.*, 22, 459-474.
- BERNROIDER, M., 1989: Zur Petrogenese präkambrischer Metasedimente und cadomischer Magmatite im Moravikum. - *Jb. Geol. B.-A.*, 132: 349-373.
- BOSÁK, P., 1983: Palinspastická rekonstrukce sedimentačního prostoru tišnovských brunnid. - *Věst. Ústř. úst. geol.*, 58, 341-347.
- DALLMEYER, R. D., NEUBAUER, F., HÖCK, V., 1992: Chronology of late Paleozoic tectonothermal activity in south-eastern Bohemian Massif, Austria (Moldanubian and Moravo-Silesian zones): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral age controls. - *Tectonophysics*, 210, 135-153.
- DUDEK, A., 1958: Přehled geologických a petrografických výzkumů Českomoravské vrchoviny a dolnorakouské Lesní čtvrti. - *Knih. Ústř. Úst. Geol.*, 33, 173 p.
- EINAUDI, M. T., MEINERT, L. D., NEWBERRY, R. J., 1981: Skarn deposits. - *Econ. Geol.*, 75th Anniversary Vol., 317-391.
- HANZL, P., (ed.), HRDLÍČKOVÁ, K., ČTYROKÁ, J., ČURDA, J., GILÍKOVÁ, H., GÜRTLEROVÁ, P., KABÁTNIK, P., KRATOCHVÍLOVÁ, H., MANOVÁ, M., MAŠTERA, L., NEUDERT, O., OTAVA, J., TOMANOVÁ PETROVÁ, P., ŠALANSKÝ, K., ŠRÁMEK, J., ŠVECOVÁ, J., VÍT, J., 2007: Základní geologická mapa ČR 1:25 000 s Vysvětlivkami, list 24-321 Tišnov. - Česká geologická služba, Praha. 84 s.
- HÖCK, V., 1975: Mineralzonen in Metapeliten und Metapsamiten der Moravischen Zone in Niederösterreich. - *Mitt. Geol. Gesell.* 66-67, 49-60.
- HÖCK, V., 1995: Moravian Zone: Metamorphic evolution. In: Dallmeyer R. D. - Franke W. - Weber K. (eds.): Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe. - Springer Verlag, 541-553.
- HÖCK, V., MARSCHALLINGER, R., TOPA, D., 1990: Granat-Biotit-Geothermometrie in Metapeliten der Moravischen Zone in Österreich. - *Beitr. Meteor. Geophys. Österreich*, H3, 149-167.
- HOUZAR, S., 2004: Metamorfované karbonátové horniny v geologické stavbě a vývoji jihovýchodní části Českégeologického masivu. - MS, Disertační práce. Ústav geologických věd PřF, MU, Brno.
- HOUZAR, S., LEICHMANN, J., 2003: Application of Cathodoluminescence to the study of metamorphic textures in marbles from the eastern part of the Bohemian Massif. - *Bulletin of Geosciences*. 78, 3, 241-250.
- HOUZAR, S., KOCOURKOVÁ, E., HRAZDIL, V., TOMAN, J., CEMPÍREK, J., 2012: Topografie historického dolování a rudní mineralizace v oblasti Bílého potoka, západní Morava. - *Acta Mus. Morav., Sci. geol.*, 97, 2, 3-45.
- HOUZAR, S., LEICHMANN, J., KAPINUS, A., VÁVRA, V., 2004: Mramor s obsahem REE z Horních Dunajovic v lukovské jednotce moravika, Západní Morava. - *Acta Mus. Morav., Sci. geol.* 84, 139-148.
- HOUZAR, S., NOVÁK, M., NĚMEČKOVÁ, M., 2000: Distribuce tremolitových mramorů v Českém masivu. - *Acta Mus. Morav., Sci. geol.*, 85, 105-123.
- HUNT, J. A., KERRICK, D. M., 1977: The stability of sphene, experimental redetermination and geological implications. - *Geochem. Cosmochem. Acta*, 41, 279-288.
- CHÁB, J., BREITER, K., FÁTKA, O., HLADIL, J., KALVODA, J., ŠIMÚNEK, Z., ŠTORCH, P., VAŠÍČEK, Z., ZAJÍC, J., ZAPLETAL, J., 2008: Stručná geologie základu Českého masivu a jeho karbonského a permského pokryvu. - Česká geologická služba, Praha, 283 p.
- CHÁB, J., SUK, M., 1977: Regionální metamorfóza na území Čech a Moravy. - *Ústř. úst. geol.*, Praha, 156 p.
- JAROŠ, J., 1991: Postavení a tektonický styl brunovistulika v jádře svratecké klenby. - *Acta Univ. Carol., Geol., Kettner Vol.*, 3-4, 225-238.
- JAROŠ, J., MISAŘ, Z., 1976: Nomenclature of the tectonic and lithostratigraphic units in the Moravian Svratka Dome (Czechoslovakia). - *Věst. Ústř. úst. geol.*, 51, 113-122.
- KACHLÍK, V., 1989: A contribution to tectono-magmatic history of the Moravian unit in the core of the Svratka dome. - *Krystalinikum* 20, 49-64.
- KALÁŠEK, J., VAVŘINOVÁ, M., POLÁK, A., 1952: Ložiska krystalických vápenců na Českomoravské vrchovině. A. Moldanubikum. - MS, Geofond, P 3842, Praha.

- KAPINUS, A., 2004: Katodoluminiscenční vlastnosti mramorů moravika: diagenetické vs. metamorfni procesy. – *MS*, Diplomová práce. Ústav geologických věd, PřF MU, Brno.
- KRŠIAKOVÁ, J., 2015: Mramory tzv. vnitorných fylitů moravika. – *MS*, Diplomová práce. Ústav geologických věd, PřF MU, Brno 45 p.
- LEICHMANN, J., KAPINUS, A., PIVNÍČKA, L., WEBER, R., 2006: Želčice group: Very low-grade Palaeozoic sequence at the base of Moravicum, Czech Republic. – *J. Czech geol. Soc.*, 51, 3–4, 189–199.
- MEINERT, L. D., 1992: Skarns and Skarn Deposits. – *Geoscience Canada*, 19, 4, 145–162.
- MÍŠAR, Z., 1995: Moravosilesian Zone; Allochthonous Units; VIIIIC Stratigraphy. – In: Dallmeyer, R. D., Franke, F., Weber, K. (eds): *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*. 521–529, Springer Verlag, Berlin.
- MÍŠAR, Z. (red.), 1997: Geologická mapa ČR List 24-31 Velké Meziříčí. – Český geologický ústav, Praha.
- NĚMEC, D., 1961: Mikrostavba kalcitu v moraviku a přilehlém moldanubiku západní Moravy. – *Věst. Ústř. Úst. Geol.*, 36, 23–34.
- NOVÁK, Z., DVOŘÁK, J., HAVLÍČEK, P., MUSIL, R., NEKOVARÍK Č., JAROŠ, J., 1991: Geologická mapa ČR 1 : 50 000, list 24-32 Brno. – Ústřední ústav geologický, Praha.
- OPLETAL, V., HOUZAR, S., LEICHMANN, J., 2007: Muskovit-plagioklasové polohy v dolomitickém mramoru u Prosetína, olešnická jednotka, moravikum – ložni intruze apelitů nebo metaevapority? – *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.*, 92, 131–142.
- PIVNÍČKA, L., 1995: Metamorfóza lukovské skupiny moravika dyjské klenby. – *MS*, Diplomová práce. Katedra geologie a paleontologie, PřF MU, Brno.
- PREGLIK, K., 1926: Die moravische Phyllitzone im Thaytale. – *Sbor. Stát. geol. Úst.*, 6, 221–280.
- SCHMID, J., FLAMMER, I., 2002: How grey limestones become white marbles. – *Eur. J. Mineral.*, 14, 837–848.
- SCHULMANN, K., LEDRU, P., AUTRAN, A., MELKA, R., LARDEAUX, J. M., URBAN, M., LOBKOWITZ, M., 1991: Evolution of nappes in the Bohemian Massif: a kinetic interpretation. – *Geol. Rdsch.*, 80, 73–92.
- SUESS, F. E., 1912: Die moravischen Fenster und ihre Beziehung zum Grundgebirge des Hohen Gesenkes. – *Denkschriften d. math. - naturw. Klasse d. Akademie d. Wissenschaften in Wien*. 541–631.
- ŠPAČEK, P., KALVODA, J., FRANČŮ, E., MELICHAR, R., 2001: Variation of deformation mechanisms within the progressive-retrogressive mylonitization cycle of limestones: brunovistulian sedimentary cover (the Variscan orogeny of the southeastern Bohemian Massif). – *Geol. Carpathica*, 52, 5, 263–275.
- ŠTÍPSKÁ, P., SCHULMANN, K., 1995: Inverted metamorphic zonation in a basement-derived nappe sequence, eastern margin of the Bohemian Massif. – *Geological Journal*, 30, 385–413.
- ŠTÍPSKÁ, P., SCHULMANN, K., HÖCK, V., 2000: Complex metamorphic zonation of the Thaya dome: result of buckling and gravitational collapse of an imbricated nappe sequence. In: Cosgrove, J. W., Ameen, M. S. (eds.): *Forced Folds and Fractures*. – *Geological Soc. London, Special Publications 1999*, 169, 197–211.
- ULRICH, S., SCHULMANN, K., CASEY, M., 2002: Microstructural evolution and rheological behaviour of marbles deformed at different crustal levels. – *J. Struct. Geol.*, 24, 979–995.
- VEIZER, J., 1983. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates. In: R. J. Reeder (ed.) *Carbonates: Mineralogy and Chemistry*. – *Reviews in Mineralogy*, 11, 265–299.
- VÍŠKOVÁ E., FOJT, B., HRAZDIL, V., HOUZAR, S., 2013: Mineralogie magnetit-grunerit-sideritového zrudnění z Radošova (jednotka Bílého potoka, svratecká klenba, Moravikum). – *Acta Musei Moraviae, Sci. geol.*, 98, 2, 39–50.
- WEBER, R., 1996: Metamorfóza skupiny Bílého potoka moravika svratecké klenby. – *MS*, Diplomová práce, PřF MU, Brno.