

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Department of Geochemistry, Mineralogy and Natural Resources**

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Ph.D. study program: Applied geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



Mafické a intermediální intruze jako průvodci peraluminických granitů
krušnohorského batolitu.

Mafic and intermediate intrusions accompanying peraluminious granites of the
Krušné hory Mts. batholit.

Pavla Holečková

Školitelé/Supervisors: Doc. RNDr. Emil Jelínek, CSc.
Prof. RNDr. Miroslav Štemprok, CSc.

Praha 2012

Abstrakt

Mafické a intermediální intruze doprovázejí granitoidní plutony v evropské variské soustavě. Zahrnují pestrou škálu hornin od křemenných gaber přes diority, granodiority až k monzonitům. Většinou tvoří drobná intruzivní tělesa nebo žíly, v granodioritech a některých granitech se vyskytují jako mafické mikrogranulární enklávy (MME). Jsou charakteristické relativně vysokými obsahy litofilních prvků (Rb, Sr, Ba, Cs, LREE), zároveň mají i vyšší obsahy prvků kompatibilních (Ni, Cr, V a Co). Izotopické poměry $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se v jednotlivých oblastech příliš neliší, pohybují se okolo průměrného složení Země (0,704 – 0,708). Hodnoty ϵNd se pohybují od více korových hodnot (až -8) až po hodnoty pozitivní (do +4), což svědčí o přispěvku bazických magmat. Svým stářím odpovídají dioritické intruze stáří granitů, s kterými se vyskytují, což dokumentuje současnost mafických a kyselých magmat.

Terénní pozorování, geochemické a izotopické charakteristiky a některé mikrostrukturální znaky v horninotvorných minerálech naznačují, že dioritické intruze jsou hybridní horniny, které vznikly interakcí kyselého a bazického magmatu. Nejvýznamnějšími procesy bylo mísení bazického a kyselého magmatu následované nebo doprovázené frakcionovanou krystalizací. Vzhledem k vysokým obsahům nekompatibilních prvků v dioritických intruzích a k jejich smíšeným izotopickým charakteristikám, musel být zdrojem bazického magmatu obohacený plášť. Výpočtem teoretického bazického magmatu vhodného pro vznik dioritických intruzí bylo zjištěno, že se jedná o magma blízké svým složením lamprofytům nebo gabrům pocházejícím z metasomaticky obohaceného pláště.

Summary

Mafic and intermediate intrusions accompany variscan granitoid plutons in Europe. They comprise wide petrographic varieties from quartz gabbros, diorites, granodiorites to monzonites. They usually constitute small bodies or veins, they often occur as mafic microgranular enclaves (MME) in granodiorites and in some granites. They are characterized by a relatively high amounts of lithophile elements (Rb, Sr, Ba, Cs, LREE), and they are simultaneously high in compatible elements (Ni, Cr, V a Co). Their isotopic ratios $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ are close to the Bulk Earth (0,704 – 0,708). ϵNd values show larger scatter, some intrusions have more crustal composition (to -8), another intrusions have ϵNd positive (to +4), that points to a contribution of mafic magma. Ages of dioritic intrusions respond to the ages of granites, with them dioritic intrusions occur. This documents the contemporaneity of mafic and acid magmas.

Field study, geochemical and isotopical properties and some microcrustural features of rockforming minerals suggest that dioritic intrusions are hybrid rocks and originated by an interaction of acid and basic magma. The most important processes were mixing of mafic and granitic magma followed or accompanied by a fractional crystalization. Pointing to the high amounts of incompatible elements in dioritic intrusions and to their mixed isotopic characteristics, the enriched mantle had to be the source of mafic magma. Calculation of the hypothetical mafic parental magma suitable for dioritic intrusions evolution showed, that the composition of such parental magma was close to the composition of lamprophyre or gabbro, that originated from the metasomatically enriched mantle.

1. Úvod

Mohutné granitoidní intruze v evropské variské soustavě jsou doprovázeny tělesy bazických až intermediálních hornin, většinou malých objemů. Byly popsány a detailně studovány zejména v různých částech Evropy – Portugalsku, Španělsku, ve francouzském Centrálním masívu, ve Schwarzwaldu, v Českém masívu, v Rumunsku, Řecku, na Korsice a Sardinii.

Většinou se jedná o hrubozrnné až jemnozrnné, místy porfyrické horniny od křemenných gaber přes diority, granodiority až k monzonitům. Typickými tmavými minerály jsou amfibol a biotit. Z živců dominuje plagioklas ($An_{70} - An_{30}$), méně se vyskytuje K-živec, dále křemen, pyroxen, titanit, apatit a postmagmatické Ca-Al minerály jako uralit a chlorit (Freiberger *a kol.* 2001). Častou akcesorií je zirkon a ilmenit, méně se objevuje allanit. Oproti asociovaným granitům mají nízké SiO_2 , nižší A/CNK a vysoké obsahy TiO_2 . Mají také zvýšené obsahy nekompatibilních stopových prvků blízké korovým horninám. I hodnoty poměrů Sr a Nd izotopů jsou podobné korovým a blízké celkovému složení Země ($Nd_{325 Ma} = +1$ až -4 a $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{325 Ma} = 0,706 - 0,708$; Siebel *a kol.* 2003). To může indikovat jako možný zdroj magmatu heterogenní obohacený plášť, který byl dále modifikován procesy AFC (asimilace a frakcionované krystalizace), různým stupněm frakcionované krystalizace a/nebo mísením s granitickým magmatem. Stáří vmístění dioritických intruzí bývá datováno mezi 340 – 320 Ma (Dörr *a kol.* 1998, Siebel *a kol.* 2003, Kovářiková *a kol.* 2007), ale v některých oblastech se objevují i starší intruze (Holub *a kol.* 1997a, Janoušek *a kol.* 2004).

Variské (gabro)dioritické až granodioritické horniny se vyskytují převážně jako drobné intruze v asociaci se stejně nebo podobně starými granity, místy se dioritické intruze nacházejí v metasedimentárních pláštích

variských granitů. V granodioritech nebo vápenato-alkalických monzogranitech se často vyskytují mafické mikrogranulární enklávy (MME), které mají převážně dioritické složení. MME a dioritické intruze bývají považovány za důkaz hybridního původu a odraz procesu míšení (Castro 1990). Přisun plášťového magmatu nemusel být jen zdrojovým materiálem pro vznik hybridních hornin či MME, ale mohl také být zdrojem tepla pro natavení korových hornin, což vedlo ke vzniku kyselých granitických magmat.

Geochemické vlastnosti mafických a intermediálních intruzí včetně MME naznačují, že bazické magma podílející se na jejich vzniku pocházelo z metasomaticky obohaceného pláště. Obohacené plášťové domény jsou dokumentovány z různých částí iberského masivu (Moreno-Ventas *a kol.*, 1995; Galán *a kol.*, 1996), ve francouzském Centrálním masívu (Downes a Duthou, 1988; Pin a Duthou, 1990; Shaw *a kol.*, 1993), ve Schwarzwaldu (Altherr *a kol.* 1999) a v Českém masívu (Gerdes *a kol.*, 1998; Janoušek *a kol.*, 1995, 2000a).

Studium terénních vztahů, petrologie, mineralogie a geochemie ukazuje, že míšení bazického a kyselého magmatu je významným procesem pro vznik vápenato-alkalických granitoidů po celém světě. Tento proces je doprovázen a ovlivňován řadou dalších petrogenetických pochodů různého významu. Proto je vždy nutné komplexní studium tělesa a využití různých geochemických modelů pro ilustraci vzniku a vývoje mafických intruzí.

2. Cíle práce

Práce je soustředěna na podrobné studium variských mafických intruzí na několika lokalitách (Abertamy, Slavkovský les, okolí Mariánských Lázní) v krušnohorském batolitu. Přináší petrologické charakteristiky těchto hornin včetně studia v optickém mikroskopu, nové chemické analýzy hlavních prvků a většiny stopových prvků včetně prvků vzácných zemin. Součástí je i analýza chemického složení jednotlivých minerálů ve výbrusu pomocí elektronové mikrosondy. Metodou Pb-evaporace jednotlivých zrn zirkonů bylo stanoveno stáří vybraných vzorků mafických intruzí i asociovaných granitů.

Všechna tato stanovení, spolu s terénním pozorováním a mapováním, slouží jako podklady pro vytvoření různých geochemických modelů a výpočty frakcionované krystalizace, linií mísení bazického a kyselého magmatu nebo teoretického bazického magmatu, které se podílelo na vzniku mafických intruzí.

Výsledky studia mafických intruzí v krušnohorském batolitu jsou porovnány s podobnými variskými intruzemi v dalších částech Českého masívu i v jiných oblastech evropských variscid.

Studium bazických a intermediálních intruzí vede k lepšímu pochopení geologického vývoje Evropy v době formování variského horstva a snaží se objasnit roli bazických plášťových magmat při vzniku variských granitoidních plutonů.

3. Materiál a metodika

Vzorky bazických a intermediálních hornin a asociovaných granitů (5 – 15 kg) byly odebírány přímo z výchozů nebo velkých balvanů. Přibližně polovina množství odebrané horniny byla rozdrcena a kvartována na cca. 100g, které byly namlety na analytickou jemnost. Druhá část odebraného vzorku byla použita pro separaci jednotlivých minerálů, především zirkonů.

Chemické analýzy byly provedeny v Laboratořích geologických ústavů na Přírodovědecké fakultě univerzity Karlovy v Praze. Hlavní oxidy byly stanoveny silikátovou analýzou, stopové prvky (včetně REE) na ICP-MS nebo pomocí AAS (Ba, Be, Cs, Co, Cr, Ni, Pb, Rb, Sr, V a Zn). V Centrálních laboratořích České geologické služby v Praze bylo provedeno stanovení fluoru a také zde byly analyzovány starší vzorky z Abertam (silikátové analýzy pro hlavní oxidy, OES, XRF, AAS a ICP-MS pro stopové prvky). Chyba stanovení pro hlavní oxidy a fluor je < 1,5 %, pro stopové prvky analyzované AAS < 1 %, pro stanovení na ICP-MS to je 5 % pro stopové prvky a 3 % pro REE.

Těžké minerály byly separovány v Centrálních laboratořích České geologické služby. Z rozdrcených vzorků byly frakce těžkých minerálů separovány v těžkých kapalinách, zirkony pro geochronologické stanovení byly dále vybírány ručně.

U vybraných vzorků byly analyzovány jednotlivé minerály pomocí elektronové mikrosondy v Institutu geologie na Akademii Věd v Praze (CAMECA SX-100), v Centrálních laboratořích České geologické služby (CamScan S-4 Link ISIS 300) a na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze (CamScan S-4 Link ISIS EDX). Měření byla doplněna studiem většího počtu vzorků v optickém mikroskopu.

Pro stanovení stáří metodou Pb-evaporace jednotlivých zrn zirkonů (Kober 1986, 1987) byla vybrána chemicky neovlivněná zrna zirkonů a byla měřena na hmotovém spektrometru Finnigan MAT 262 se sekundárním elektronovým násobičem na Univerzitě v Tübingenu. Měřené poměry $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ byly opraveny na neradiogenní olovo podle vzorce (Cocherie *a kol.* 1992), který vychází z modelu Staceyho a Kramerse (1975). Na hmotovou frakcionaci oprava dělána nebyla. Střední stáří vzorku je dáno jako vážený průměr a chyba ukazuje 95 % úroveň spolehlivosti. Pro vyloučení chyb a dosažení realistického stáří byla opakovaně prováděna měření na dvou interních zirkonových standardech obdobného stáří jako je většina analyzovaných vzorků.

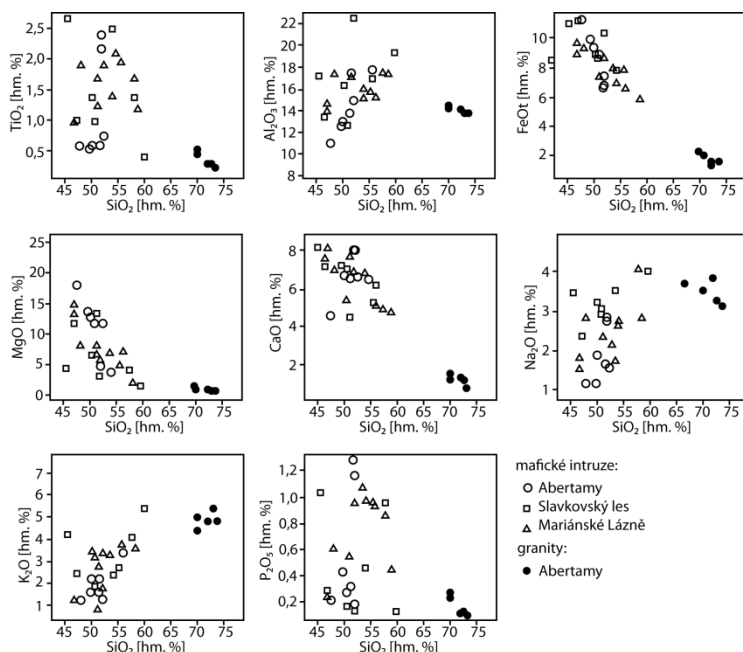
4. Výsledky a diskuse

Bazické a intermediální variské intruze byly studovány na několika lokalitách v krušnohorském batolitu - v Abertamech, Slavkovském lese a v okolí Mariánských Lázní. Zahrnují horniny od gabrodioritů přes křemenné diority až po granodiority. Na všech lokalitách si jsou podobné svými petrologickými i geochemickými charakteristikami a jsou si blízké svým stářím. Bazičtější vzorky (gabronority a gabrodiority) jsou tvořeny biotitem, amfibolem a plagioklasem ($\text{An}_{72} - \text{An}_{26}$), v menší míře se objevují pyroxen, křemen a draselný živec. Plagioklasy jsou hypidiomorfní až idiomorfní a jsou výrazně zonální. Jádra jsou obvykle tvořena labradoritem až bytownitem, okrajové zóny kolísají mezi kyselým oligoklasem a intermediálním andesinem. Amfiboly jsou světle zelené, ve svém složení se pohybují od aktinolitu po magnesiohornblend s nízkým obsahem Al. Častý je výskyt sekundárního amfibolu, který pravděpodobně vzniknul na úkor starší generace pyroxenů.

Biotity jsou místy poikiliticky prorostlé se zrny plagioklasu. Lupínky biotitu jsou často chloritizované. Méně časté draselné živce jsou převážně idiomorfni a bývají pertitické. Zrna křemene jsou oválná, xenomorfni a vykazují undulózni zhášení. Mafické intruze jsou bohaté akcesorickými minerály. Hojně se vyskytují ilmenit a apatit, méně zirkon a titanit, vzácný je allanit. Z opakních minerálů se objevují pyrhotin a pyrit.

Kyselejší vzorky (granodiority až křemenné diority) neobsahují pyroxen a mají jen malé množství amfibolu a méně biotitu. Plagioklas ($An_{52} - An_{29}$) u nich převažuje nad draselným živcem a obsahují více křemene. Plagioklasy jsou jen mírně zonální, jádra tvořená kyselým labradoritem přecházejí k okrajům do andesinu. Z akcesorických minerálů obsahují navíc turmalín.

V Harkerových diagramech (Obr. 1) je možné sledovat trendy jdoucí od granitů přes intermediální vzorky až ke vzorkům nejbazičtějším. Železo a vápník korelují s SiO_2 negativně, sodík a draslík pozitivně. U titanu, hliníku a hořčíku je zřejmá výrazná inflexe u hodnoty 54 – 56 hm. % SiO_2 . To může znamenat změnu ve frakcionované krystalizaci, např. ukončení krystalizace titanitu nebo ilmenitu nebo změna krystalizace z amfibolu na pyroxen. Hodnoty v grafu pro fosfor vyčleňují dvě skupiny vzorků: první s vysokými obsahy P_2O_5 a středními hodnotami SiO_2 , druhá skupina zahrnuje vzorky s nízkými obsahy P_2O_5 a s velkým rozpětím hodnot SiO_2 .



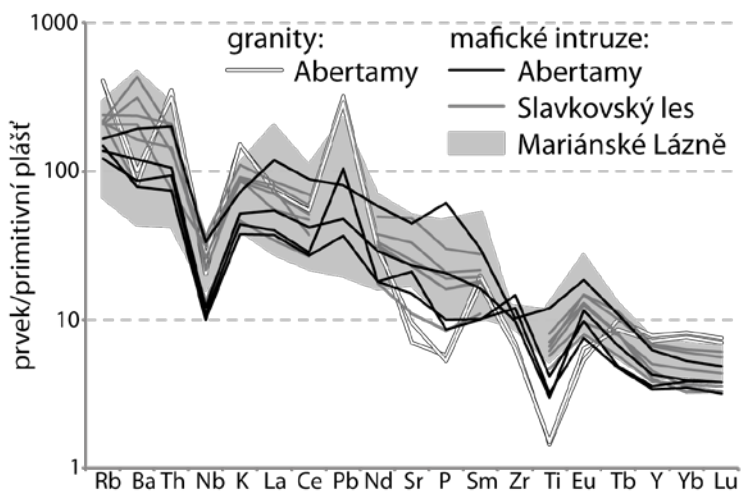
Obr. 1. Harkerovy diagramy pro dioritické intruze a granity krušnohorského batolitu.

Horniny s podobnými petrologickými i geochemickými charakteristikami se vyskytují i v dalších částech Českého masívu (středočeský plutonický komplex (Holub *a kol.* 1997b, Janoušek *a kol.* 1995, 2000a, b), rastenburgský pluton (Gerdes *a kol.* 2000), krkonošský pluton (Słaby 2002, Słaby a Martin 2008), míšeňský masív (Wenzel *a kol.* 1997)), v ostatních evropských Variscidách (Iberský poloostrov (např. Galán *a kol.* 1996, Villaseca *a kol.* 2009, Fernández-Suárez *a kol.* 2011), francouzský Centrální masív (Shaw *a kol.* 1993), oberkirchský pluton ve Schwarzwaldu (Altherr *a kol.* 1999), sardinsko-korsický batolit (Poli a Tommasini 1999, Ferré a Leake

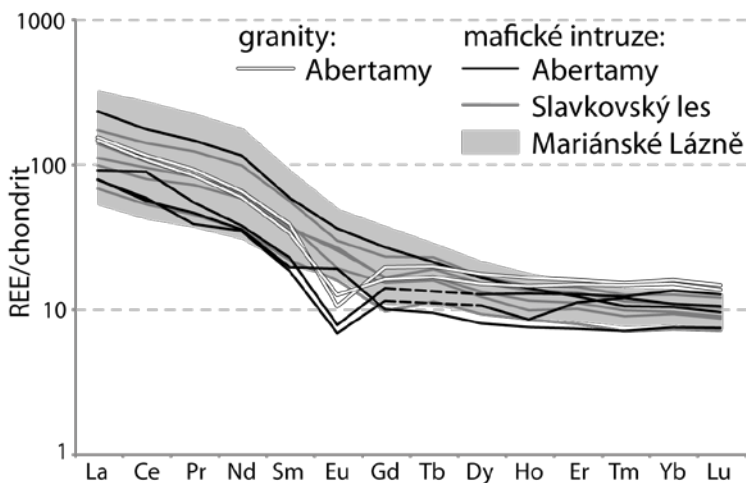
2001)), a také jako variské intruze v karpatském getickém příkrovu v Rumunsku (Duchesne *a kol.* 2008).

Po vynesení vzorků z uvedených oblastí do Harkerových diagramů je možné sledovat stejné trendy jako u samostatného krušnohorského batolitu. Patrná je i inflexe okolo 54 – 56 hm. % SiO₂, která je nejvíce zřejmá u titanu a vápníku a sledovatelná je i u hořčíku, vápníku a sodíku.

Bazické a intermediální intruze jsou typické vysokými obsahy litofilních prvků (Cs, Rb, Ba, Sr, Th, LREE) a tzv. pevně vázaných prvků (Zr, Y), zároveň mají zvýšené množství tranzitních kovů (Cr, Co, Ni). Při vynesení hodnot do spidergramů (Obr. 2) mají nejbazičtější vzorky krušnohorského batolitu (gabrodiority a gabronority) nižší obsahy Rb (62 – 87 ppm), Th (6 – 8,6 ppm) a LREE a výraznou negativní anomálii Nb. Naopak oproti kyselejším vzorkům mají vyšší obsahy Ba (až 2200 ppm) a Sr (až 800 ppm). Mají vyšší obsahy tranzitních kovů, které pozitivně korelují s MgO. Model distribuce REE (Obr. 3) je u bazičtějších vzorků plošší ($(La/Yb)_N = 6,7 - 13,8$), mají nezatelnou nebo mírně pozitivní Eu anomálii. Výjimkou jsou dva vzorky gabrodiority z Abertam, které mají Eu anomálii negativní. Kyselejší intruze (křemenné diority a granodiority) mají ve srovnání s bazickými vyšší Rb (104 – 154 ppm), Th (11,26 – 20,82 ppm) a také obsahy LREE. Mají nižší Ba (okolo 1000 ppm), Sr (393 – 539 ppm), HREE a obsahy tranzitních kovů. Mají strmější distribuci REE ($(La/Yb)_N = 9,0 - 23,4$), obvykle vykazují negativní Eu anomálii.



Obr. 2. Diagram stopových prvků normalizovaných k primitivnímu plášti.



Obr. 3. Distribuce prvků vzácných zemin normalizovaných k chondritu. Tb nebylo u dvou vzorků z Abertam stanoveno (přerušovaná čára).

I ostatní dioritické intruze v Českém masívu i variské Evropě mají podobné charakteristiky stopových prvků. Ukazují shodné chování stopových prvků vnesených ve spidergramech normalizovaných k primitivnímu pláští, kde jsou výrazné negativní anomálie Nb a Ti. I modely distribuce prvků vzácných zemin jsou u všech intruzí shodné: bazičtější vzorky (gabry, gabrodiority) ukazují plošší distribuce REE a většinou neznatelné nebo mírně pozitivní Eu anomálie, vzorky kyselejší (křemenné diority, monzonity, granodiority) mají vyšší obsahy LREE a nižší HREE, převážně mají negativní Eu anomálie. Zajímavostí je pozitivní anomálie Gd, která se objevuje u vzorků z německé části krušnohorského batolitu a u blatenské suity a Čertova břemene středočeského plutonického komplexu. Naopak u vzorků Slavkovského lesa a u některých vzorků z okolí Mariánských Lázní je tato anomálie negativní. U intruzí Iberského poloostrova není tato anomálie zřejmá. Mírně odlišné chování ukazují MME z granodioritů Iberského poloostrova, které mají ploché modely rozložení REE blízké bazickým intruzím, ale zároveň vykazují výrazné negativní Eu anomálie, což může být způsobeno interakcí s okolním kyselejším magmatem. Opakem jsou MME z hornin sázavské suity středočeského plutonického komplexu, které mají chování REE shodné s bazickými vzorky – plochou distribucí a zároveň pozitivní Eu anomálie.

Stanovení izotopů Sr a Nd nebyla na studovaných lokalitách provedena. Literатурní data ukazují, že hodnoty izotopových poměrů dioritických intruzí (ϵ_{Nd} a $^{87}Sr/^{86}Sr$) jsou ve všech oblastech podobné a jsou většinou blízké okolo průměrného složení Země. Poměry $^{87}Sr/^{86}Sr$ se pohybují mezi typickými krustálními a plášťovými hodnotami (0,704 – 0,708). Hodnoty ϵ_{Nd} vykazují větší rozptyl \pm okolo 0 (-8 – +4). Některé intruze (většinou s vyššími obsahy

SiO₂) mají více korové složení (až -8), jiné (převážně bazičtější vzorky) naopak mají hodnoty ϵNd pozitivní, což svědčí o příspěvku bazických magmat.

Stáří dioritických intruzí se v jednotlivých oblastech výrazně liší. V krušnohorském batolitu jsou dioritické intruze v rámci Českého masívu nejmladší, jejich stáří se pohybuje mezi 322 – 327 Ma (Siebel *a kol.* 1995, Kovářiková *a kol.* 2007, 2010). Starší intruze jsou v míšeňském masívu (340 – 355 Ma; Wenzel *a kol.* 1997) a ve středočeském plutonickém komplexu (336 – 361 Ma; Matte *a kol.* 1990, Holub *a kol.* 1997a, Dörr *a kol.* 1998, Janoušek *a kol.* 2004). Ještě starší intruze jsou ve francouzském Centrálním masívu (361 – 365 Ma; Shaw *a kol.* 1993), naopak nejmladší jsou na Iberském poloostrově (310 – 312 Ma; Galán *a kol.* 1996, Villaseca *a kol.* 2009, Fernández-Suárez *a kol.* 2011). Stáří bazických a intermediálních intruzí jsou zároveň shodná nebo jen nepatrně vyšší jako stáří granitů, s kterými se tyto intruze vyskytují, což dokládá současnost bazických a kyselých magmat.

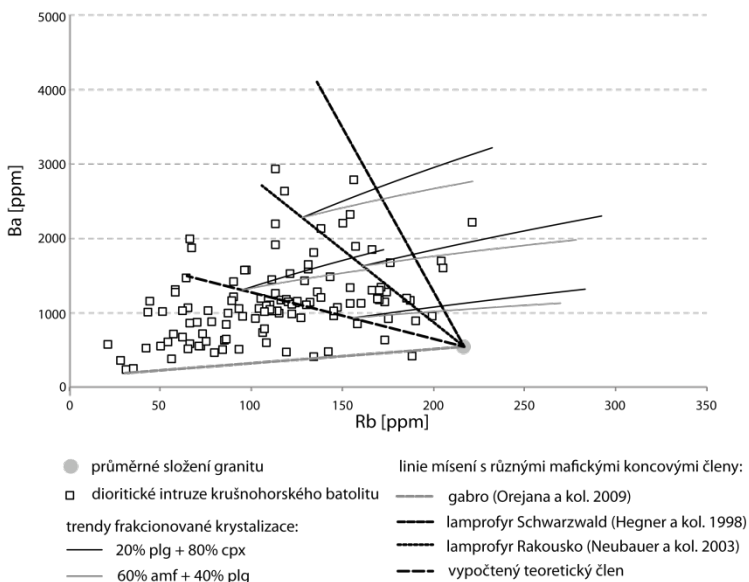
Terénní pozorování, geochemické a izotopické charakteristiky dioritických intruzí naznačují, že se jedná o hybridní horniny, a významnou roli při jejich vzniku hrála interakce bazického a kyselého magmatu. Někteří autoři (Bea *a kol.* 1999, Dias *a kol.* 2002) považují mafické intruze za prekuzory variských granitů, které znamenaly nejen přínos materiálu, ale i tepla potřebného k natavení korových hornin. Vývoj mafických intruzí byl zřejmě složitý a zahrnuje více petrogenetických procesů (mísení magmat, asimilace a frakcionovaná krystalizace), které probíhaly společně a vzájemně se ovlivňovaly. Izotopické hodnoty blízké pláště (kladné hodnoty ϵNd a nízké poměry $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), vysoké obsahy nekompatibilních prvků i tranzitních kovů některých intruzí ukazují na existenci metasomaticky obohaceného pláště ve všech oblastech v době formování variských granitoidních plutonů. Výpočtem

teoretického bazického magmatu bylo zjištěno, že skutečné bazické magma, které se podílelo na vzniku mafických intruzí, bylo svým chemickým složením blízké metasomaticky obohaceným gabrům nebo lamprofytům, které jsou však ve variských plutonech přítomny jen vzácně a v malých objemech (Hegner *a kol.* 1998, Neubauer *a kol.* 2003, Barbarin 2005, Orejana *a kol.* 2009).

Lineární trendy jdoucí od kyselých hornin k bazickým v Harkerových diagramech naznačují podstatnou roli mísení bazického a kyselého magmatu při vzniku mafických intruzí. Ovšem inflexe v grafu, která je nejvíce zřejmá u titanu, hliníku a hořčíku, ukazuje spíše na frakcionovanou krystalizaci. Pro studium vzniku a vývoje mafických intruzí jsou využívány různé modely. Většina autorů (Bea *a kol.* 1999, Janoušek *a kol.* 2000a, López-Moro a López-Plaza 2004, Moita *a kol.* 2005) přikládá větší význam frakcionované krystalizaci a mísení bazického a kyselého magmatu považují za méně podstatný proces. Jiní autoři (Siebel *a kol.* 1995, Janoušek *a kol.* 1997, Słaby a Martin 2008) naopak upřednostňují mísení magmat jako podstatný proces při vzniku intruzí.

Kombinaci dvou procesů běžných při vzniku granitoidních hornin dokumentují obrázky 4 a 5. V prvním případě (Obr. 4) předpokládáme nejprve mísení dvou odlišných magmat. V grafu Rb vs. Ba jsou vykresleny linie mísení pro čtyři různá bazická zdrojová magmata – variská gabra (Orejana *a kol.* 2009), lamprofyty z Německa (Hegner *a kol.* 1998) a Rakouska (Neubauer *a kol.* 2003) a vypočtený teoretický mafický člen. Jako kyselé magma bylo pro výpočet použito průměrné složení starších krušnohorských granitů. Jednotlivé dávky vzniklého hybridního magmatu následně podstupují frakcionovanou krystalizaci a vzniká celá škála hybridních hornin. V grafu jsou naznačeny trendy pro dva různé případy frakcionované krystalizace: a) 20% plagioklas +

80% klinopyroxen a b) 40% plagioklas a 60% amfibol. Vynesené vzorky dioritických intruzí krušnohorského batolitu vykazují značný rozptyl podél linií mísení, částečně však sledují trendy pro frakcionovanou krystalizaci.

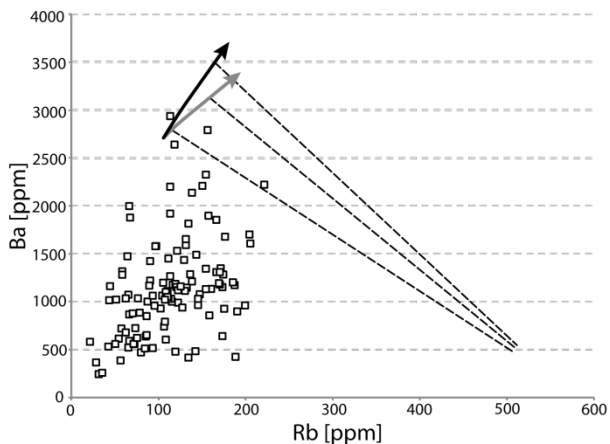


Obr. 4. Model binárního mísení, které je následováno frakcionovanou krystalizací vzniklého hybridního magmatu. plg – plagioklas, cpx – klinopyroxen, anf – amfibol.

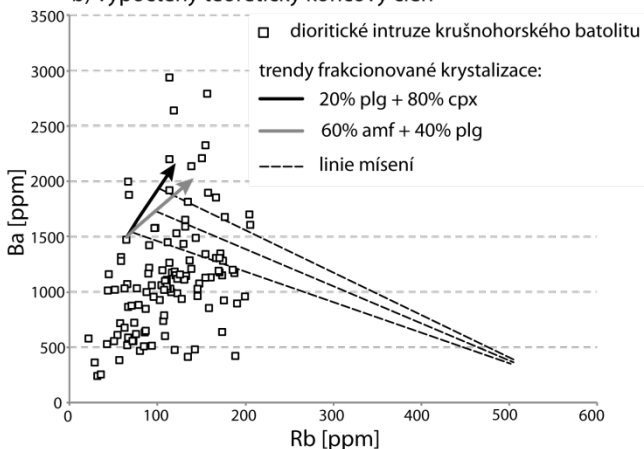
Druhý případ (Obr. 5) je zcela opačný. Frakcionovanou krystalizací vystupujícího bazického magmatu (v grafech pro výpočet použit lamprofyry (Hegner *a kol.* 1998) a teoretický mafický člen) vznikají nová magmata, která se následně mísí s koexistujícím kyselým magmatem (k výpočtu použito průměrné složení staršího krušnohorského granitu). Zvláště v grafech pro Rb vs. Ba trendy frakcionované krystalizace dobře vystihují rozložení vynesených vzorků krušnohorských dioritických intruzí. Jejich rozptyl do šířky pak vysvětlují zakreslené linie pro mísení. I přes značné zjednodušení a oddělení

obou procesů od sebe, což je v přírodě vysoce nepravděpodobné, se zdá, že právě toto by mohl být správný scénář vzniku hybridních dioritických intruzí.

a) lamprofyry (Hegner a kol. 1998)



b) vypočtený teoretický koncový člen



Obr. 5. Trendy frakcionované krystalizace dvou různých bazických magmat a následného mísení vzniklých dávek magmatu s kyselým granitickým magmatem. plg – plagioklas, cpx – klinopyroxen, anf – amfibol.

5. Závěry

Bazické a intermediální intruze běžně doprovázejí variské granitoidní plutony v Evropě. V základních petrologických a geochemických rysech si jsou podobné a na základě jejich studia a srovnání je možné konstatovat:

1) mafické intruze, včetně MME, jsou v evropských variscidách různého staří,

2) vyskytují se jen v malých objemech, protože účast mafického magmatismu na vzniku granitů byla malá,

3) vznikly zčásti mísením s mafickým magmatem blízkým metasomaticky obohaceným gabrům, lamprofyry jako zdroj bazického magmatu jsou méně pravděpodobné kvůli svým malým objemům,

4) jejich výsledné chemické složení bylo dále ovlivněno frakcionovanou krystalizací,

5) dědí (částečně nebo úplně) geochemický obraz metasomatického pláště, ze kterého mafické magma vznikalo.

6. Použitá literatura

- Altherr, R., Henjes-Kunst, F., Langer, C., Otto, J. (1999): Interaction between crustal-derived felsic and mantle-derived mafic magmas in the Oberkirch Pluton (European Variscides, Schwarzwald, Germany). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 137, 304-322.
- Barbarin, B. (2005): Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80, 155-177.
- Bea, F., Montero, P., Molina, J. F. (1999): Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Avila Batholith: a model for the generation of Variscan batholiths in Iberia. *J. Geol.*, 107, 399-419.
- Castro, A. (1990): Microgranular enclaves of the Quintana Granodiorite (Los Pedroches Batholith). Petrogenetic significance. *Rev. Soc. Geol. España* 3, 7-21.
- Cocherie, A., Guerrot, C., Rossi, P. (1992): Single-zircon dating by stepwise Pb evaporation: comparison with other geochronological techniques applied to the Hercynian granites of Corsica. *Chem. Geol.*, 101, 131-141.
- Dias, G., Sirnões, P. P., Ferreira, N., Leterrier, J. (2002): Mantle and Crustal Sources in the Genesis of Late-Hercynian Granitoids (NW Portugal): Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints. *Gondwana Research*, 5(2), 287-305.
- Dörr, W., Fiala, J., Franke, W., Haack, U., Philippe, S., Schastock, J., Scheuven, D., Vejnar, Z., Zulauf, G. (1998): Cambrian vs. Variscan tectonothermal evolution within the Teplá -Barrandian: evidence from U-Pb zircon ages of syntectonic plutons (Bohemian massif, Czech Republic). *Acta Univ. Carolinae Geol.*, 42, 229-230.
- Downes, H., Duthou, J. L. (1988): Isotopic and trace element arguments for the lower-crustal origin of Hercynian granitoids and pre-Hercynian orthogneisses, Massif Central (France). *Chem. Geol.*, 68, 291-308.

- Duchesne, J.-C., Liègeois, J.-P., Iancu, V., Berza, T., Matukov, D. I., Tatu, M., Sergeev, S. A. (2008): Post-collisional melting of crustal sources: constraints from geochronology, petrology and Sr, Nd isotope geochemistry of the Variscan Sichevita and Poniasca granitoid plutons (South Carpathians, Romania). *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 97, 705-723.
- Fernández-Suárez, J., Gutierrez-Alonso, G., Johnston, S. T., Jeffries, T. E., Pastor-Galán, D., Jenner, G. A., Murphy, J. B. (2011): Iberian late-Variscan granitoids: Some considerations on crustal sources and the significance of “mantle extraction ages”. *Lithos*, 123, 121-132.
- Ferré, E. C., Leake, B. E. (2001): Geodynamic significance of early orogenic high-K crustal and mantle melts: example of the Corsica Batholith. *Lithos*, 59, 47-67.
- Freiberger, R., Hecht, L., Cuney, M., Morteani, G. (2001): Secondary Ca–Al silicates in plutonic rocks: implications for their cooling history. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141, 415-429.
- Galán, G., Pin, C., Duthou, J. L. (1996): Sr-Nd isotopic record of multi-stage interactions between mantle-derived magmas and crustal components in a collision context. The ultramafic-granitoid association from Vivero (Hercynian belt, NW Spain). *Chemical Geology*, 131, 67-91.
- Gerdes, A., Warner, G., Friedrich, E. (1998): Late-orogenic magmatism in the southern Bohemian Massif – geochemical and isotopic constraints on possible sources and magma evolution. *Acta Univ. Carolinae – Geologica*, 42, 41-45.
- Gerdes, A., Wörner, G., Finger, F. (2000): Hybrids, magma mixing and enriched mantle melts in post-collisional Variscan granitoids: the Rastenberg Pluton, Austria. In: Franke, W., Haak, V., Oncken, O., Tanner, D. (Eds.): *Orogenic Processes: Quantification and Modeling in the Variscan Belt of Central Europe*. Geological Society, London, Special Publication, 179, 415-431.
- Hegner, E., Kölbl-Ebert, M., Loeschke, J. (1998): Post-collisional Variscan lamprophyres (Black Forest, Germany): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating, Nd, Pb, Sr isotope, and trace element characteristics. *Lithos*, 45, 395-411.

- Holub, F. V., Cocherie, A., Rossi, P. (1997a): Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Moldanubian-Barrandien boundary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Sciences*, 325, 19-26.
- Holub, F. V., Machart, J., Manová, M. (1997b). The Central Bohemian Plutonic Complex: geology, chemical composition and genetic interpretation. *Sbor. Geol. Věd, Ložisk. Geol. Mineral.*, 31, 27-50.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D.R. (1995): Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Geol. Rundsch.*, 84, 520-534.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D. R., Vaňková, V. (1997): Cryptic trace-element variation as an indicator of reverse zoning in a granitic pluton: the Říčany granite, Czech Republic. *Journal of the Geological Society, London*, 154, 807-815.
- Janoušek, V., Bowes, D. R., Braithwaite, C. J. R., Rogers, G. (2000a): Microstructural and mineralogical evidence for limited involvement of magma mixing in the petrogenesis of a Hercynian high- K calc-alkaline intrusion: the Kozárovce granodiorite, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 91, 15-26.
- Janoušek, V., Bowes, D. R., Rogers, G., Farrow, C. M., Jelínek, E. (2000b): Modelling diverse processes in the petrogenesis of a composite batholith: the Central Bohemian Pluton, Central European Hercynides. *J. Petrol.*, 41, 511-543.
- Janoušek, V., Braithwaite, C. J. R., Bowes, D. R., Gerdes, A. (2004): Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos*, 78, 67-99.
- Kober, B. (1986): Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 481-490.
- Kober, B. (1987): Single-zircon evaporation combined with Pb+ emitter-bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations using thermal

- ion mass spectrometry, and implications to zirconology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96, 63-71.
- Kováříková, P., Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2007): Petrology, geochemistry and zircon age for redwitzite at Abertamy, NW Bohemian Massif (Czech Republic): tracing the mantle component in Late Variscan intrusions. *Chemie der Erde*, 67, 151-174.
- Kováříková, P., Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2010): Dioritic intrusions of the Slavkovský les (Kaiserwald), Western Bohemia: their origin and significance in late Variscan granitoid magmatism. *International Journal of Earth Sciences*, 99(3), 545-565.
- López-Moro, F.-J., López-Plaza, M. (2004): Monzonitic series from the Variscan Tormes Dome (Central Iberian Zone): petrogenetic evolution from monzogabbro to granite magmas. *Lithos*, 72, 19-44.
- Matte, P., Maluski, H., Rajlich, P., Franke, W. (1990): Terrane boundaries in the Bohemian Massif: result of large-scale Variscan shearing. *Tectonophysics*, 177, 151-170.
- Moita, P., Santos, J. F., Pereira, M. F. (2005): Tonalites from the Hospitais massif (Ossa-Morena Zone, SW Iberian Massif, Portugal) II: Geochemistry and petrogenesis. *Geogaceta*, 37, 55-58.
- Moreno-Ventas, I., Rogers, G., Castro, A. (1995): The role of hybridization in the genesis of Hercynian granitoids in the Gredos Massif, Spain: inferences from Sr-Nd isotopes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 137-149.
- Neubauer, F., Dallmeyer, R. D., Fritz, H. (2003): Chronological constraints of late- and post-orogenic emplacement of lamprophyre dykes in the southeastern Bohemian Massif, Austria. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 83, 317-330.
- Orejana, D., Villaseca, C., Pérez-Soba, C., López-García, J. A., Billström, K. (2009): The Variscan gabbros from the Spanish Central System: A case for crustal recycling in the sub-continental lithospheric mantle? *Lithos*, 110, 262-276.

- Pin, C., Duthou, J.-L. (1990): Sources of Hercynian granitoids from the French massif Central: inferences from Nd isotopes and consequences for crustal evolution. *Chem. Geol.*, 83, 281-196.
- Poli, G. E., Tommassini, S. (1999): Geochemical modeling of acid–basic magma interaction in the Sardinia – Corsica Batholith: the case study of Sarrabus, southeastern Sardinia, Italy. *Lithos*, 46, 553-571.
- Shaw, A., Downes, H., Thirlwall, M. E. (1993): The quartz-diorites of Limousin: elemental and isotopic evidence for Devonian–Carboniferous subduction in the Hercynian belt of the French massif Central. *Chem. Geol.*, 107, 1-18.
- Siebel, W., Höhndorf, A., Wendt, I. (1995): Origin of late Variscan granitoids from NE Bavaria, Germany, exemplified by REE and Nd isotope systematics. *Chem. Geol.*, 125(3-4), 249-270.
- Siebel, W., Chen, F., Satir, M. (2003): Late-Variscan magmatism revisited: new implications for Pb-evaporation zircon ages on the emplacement of redwitzites and granites in NE Bavaria. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 36-53.
- Słaby, E. (2002): Porphyritic granite facies Szklarska Poręba Huta. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 20, 245-247.
- Słaby, E., Martin, H. (2008): Mafic and felsic magma interaction in granites: The Hercynian Karkonosze Pluton (Sudetes, Bohemian Massif). *Journal of Petrology*, 49(2), 353-391.
- Stacey, J. S., Kramers, J. D. (1975): Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 207-221.
- Villaseca, C., Bellido, F., Perez-Soba, C., Billstrom, K. (2009): Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt. *Mineralogy and Petrology*, 96, 197-211.
- Wenzel, T., Mertz, D. F., Oberhänsli, B., Becker, T., Renne, P. R. (1997): Age, geodynamic setting, and mantle enrichment processes of a K-rich intrusion from the Meissen massif (northern Bohemian massif) and implications for related occurrences from the mid-European Hercynian. *Geol. Rundsch.*, 86, 556-570.

1. Introduction

Voluminous granitoid intrusions in the European Variscides are accompanied by intrusions of small volumes that are composed by basic to intermediate rocks. These mafic intrusions were described and detailed studied mainly in different parts of Europe – Portugal, Spain, in the French Massif Central, in Schwarzwald, in the Bohemian massif, Romania, Greece, Sardinia and Corsica.

Mafic intrusions are mostly coarse- to fine-grained rocks, porphyritic in places, ranging from quartz gabbros, diorites, granodiorites to monzonites. Typical dark minerals are amphibole and biotite. Plagioclase (An₇₀ – An₃₀) is predominant feldspar. Less common are quartz, K-feldspar, pyroxene, titanite and apatite as well as postmagmatic Ca–Al minerals like uralite and chlorite (Freiberger *et al.*, 2001). Zircon and illmenite are common accessory minerals, orthite is rare. In comparison with the associated granites they have lower SiO₂, lower A/CNK and high TiO₂. They have high amounts of incompatible elements similarly to crustal rocks. Their isotopic ratios indicate heterogenous enriched mantle as possible source material ($\epsilon\text{Nd}_{325\text{ Ma}} = +1$ to -4 a $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{325\text{ Ma}} = 0,706 - 0,708$; Siebel *et al.* 2003) modified by a various degree of AFC (assimilation and fractional crystallization) processes and mixing with crustal derived magmas. The age of mafic intrusions is usually determined between 320 and 340 Ma (Dörr *et al.* 1998, Siebel *et al.* 2003, Kovářiková *et al.* 2007), however older intrusions were dated in some localities (Holub *et al.* 1997a, Janoušek *et al.* 2004).

Variscan (gabbro)dioritic to granodioric rocks occur mainly as small intrusions associated with granites of similar age. Locally they occur in the metasedimentary envelopes of Variscan granites. Granodiorites and calc-

alkaline monzogranites often host mafic microgranular enclavas (MME) that are mostly of dioritic composition. MME and mafic intrusions are often considered as the evidence of hybrid origin and the reflection of magma mixing (Castro 1990). Intrusion of mafic magma brought the material to form hybrid rocks as well as the heat suitable for melting of crustal rocks which led to origin of acid magmas.

Geochemical features of basic and intermediate intrusions and MME indicate that basic magma, participating on mafic intrusions evolution, originated from metasomatically enriched mantle. Enriched mantle domains are documented from different parts of Iberian massif (Moreno-Ventas *et al.* 1995; Galán *et al.* 1996), in French Massif Central (Downes and Duthou, 1988; Pin and Duthou 1990; Shaw *et al.* 1993), in Schwarzwald (Altherr *et al.* 1999) and in the Bohemian massif (Gerdes *et al.* 1998; Janoušek *et al.* 1995, 2000a).

Field observations and study of petrology, mineralogy and geochemistry show that mixing of mafic and acid (granitic) magma is a significant process in origin of calc-alkaline granitoids all over the world. Magma mixing is accompanied and affected by other petrogenetic processes such as fractional crystallization or assimilation of varying importance. That is why the complex study of mafic intrusion is needed. For illustration of origin and evolution of mafic intrusions is further suitable the use of different geochemical models that can demonstrate fractional crystallization or magma mixing.

2. Aims of the study

The aim of the study is a detailed knowledge of Variscan mafic intrusions from several localities (Abertamy, Slavkovský les, and surroundings of Mariánské Lázně) in the Krušné hory batholit. This work brings petrological characterization of these rocks, study of thin sections by optical microscopy, new chemical analyses of main oxides and most trace elements, including REE. Chemical analyses of individual minerals by electron microprobe are presented as well. Single zircon Pb-evaporation was used to determine the age of selected samples of mafic intrusions and associated granites.

Results of all these determinations together with field observations and mapping are used as a base for several geochemical models and calculations of fractional crystallization, trends of mixing of basic and acid magma or calculation of theoretical mafic magma that participated in the origin of mafic intrusions.

Obtained results of study of mafic intrusions in the Krušné hory batholit are compared with similar Variscan intrusions in other parts of the Bohemian Massif as well as in other regions of European Variscides.

The study of basic and intermediate intrusions leads to the better understanding of geological evolution of Europe during Variscan orogeny and tries to explain the role of basic mantle magmas in the origin of Variscan granitoid plutons.

3. Material and methods

Samples of basic and intermediate intrusions and associated granites (5 to 15 kg) were taken from sections or from large boulders. About half of each sample was crushed and gradually split into smaller volume and the amount of about 50–100 g was pulverized in an agate mortar for chemical analyses. The rest of the sample was used for separation of individual minerals, especially zircons.

Major and trace element analyses on selected whole-rock samples were made in the laboratories of the Geological Institute at the Faculty of Science, Charles University, Prague by wet chemical methods (major elements), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) (REE and trace elements) and atomic absorption spectrometry (AAS) (Ba, Be, Cs, Co, Cr, Ni, Pb, Rb, Sr, V and Zn). Analyses of fluorine were made in the Central Laboratories of the Czech Geological Survey in Prague. In the same laboratories were analyzed older samples from Abertamy. The accuracy for major oxides and F determination is $< 1.5\%$ and for trace elements determined by AAS $< 1\%$. The maximum deviations for ICP-MS analyses are 5% for trace elements and 3% for REE.

Heavy mineral fractions were prepared in the laboratories of the Czech Geological Survey. The crushed samples were separated using heavy liquids and zircons were handpicked from the heavy mineral assemblage after magnetic separation.

Selected samples were analyzed by electron microprobe (CAMECA SX-100) at the Institute of Geology, Academy of Science, Prague, in the Central Laboratories of the Czech Geological Survey in Prague (CamScan S-4 Link ISIS 300) and in the laboratories of the Geological Institute at the Faculty

of Science, Charles University, Prague (CamScan S-4 Link ISIS EDX). Microprobe analyses were supplemented by optical microscope observation of larger amount of samples.

For single-zircon Pb-evaporation (Kober 1986, 1987) chemically untreated zircon grains were analyzed with a Finnigan MAT 262 mass spectrometer equipped with a secondary electron multiplier (SEV) at the University of Tübingen. Measured $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ratios were corrected for common Pb according to the formula given in Cocherie *et al.* (1992) following the Pb evolution model of Stacey and Kramers (1975). No correction was made for mass fractionation. The mean zircon age is given as weighted average and the error refers to the 95% confidence level. Repeated measurements on two internal standard zircons of similar age as most of the studied samples were performed for geologically realistic age and error treatment.

4. Results and discussion

Basic and intermediate Variscan intrusions were studied at several localities in the Krušné hory batholit – in Abertamy, Slavkovský les and around Mariánské Lázně. They include rocks ranging from gabbrodiorites, quartz diorites to granodiorites. Mafic intrusions at all localities are similar in their petrological and geochemical characteristics. They are similar in their age as well. More basic samples (gabbrogranites and gabbrodiorites) consist of biotite, amphibole and plagioclase ($\text{An}_{72} - \text{An}_{26}$), to a lesser extent, appear pyroxene, quartz and K-feldspar. Plagioclases are hypidiomorphic to idiomorphic and are markedly zoned. Cores are usually made up of bytownite to labradorite, boundary zones vary between acid oligoclase and intermediate andesine. Amphiboles are light green, they vary from actinolite to magnesiohornblende

in their composition with low Al content. Frequent is occurrence of secondary amphibole, which probably originated at the expense of the older generation of pyroxene. Biotite is locally poikilitically intergrown with grains of plagioclase. Sheets of biotite are often chloritized. Less abundant K-feldspars are mainly idiomorphic and are usually perthitic. Quartz grains are oval, xenomorphic and show undulatory extinction. Mafic intrusions are rich in accessory minerals. Ilmenite and apatite are abundant, zircon and titanite occur to a lesser extent, allanite is rare. The opaque minerals are represented by pyrite and pyrrhotite.

More acid samples (quartz diorites and granodiorites) do not contain pyroxene and have only small amount of amphibole and biotite. Plagioclase ($An_{52} - An_{29}$) prevails over K-feldspar and they contain more quartz. Plagioclases are only slightly zoned, consisting of an acid labradorite cores which pass marginal andesine. They have the same accessory minerals and moreover contain tourmaline.

Linear trends from granites through intermediate samples to basic samples are obvious in Harker diagrams (Fig. 1). Iron and calcium correlate negatively with SiO_2 , sodium and potassium positively. There is an obvious inflection of the trend at 54 to 56 wt. % SiO_2 in diagrams for titanium, aluminum and magnesium. This may be explained by the change in the fractional crystallization, eg. completion of crystallization of titanite or ilmenite, or change of the crystallization from pyroxene to amphibole. In the diagram for phosphorus are two groups of samples: one with high contents of P_2O_5 and mean values of SiO_2 , the second group includes samples with low P_2O_5 and with a large scatter of SiO_2 values.

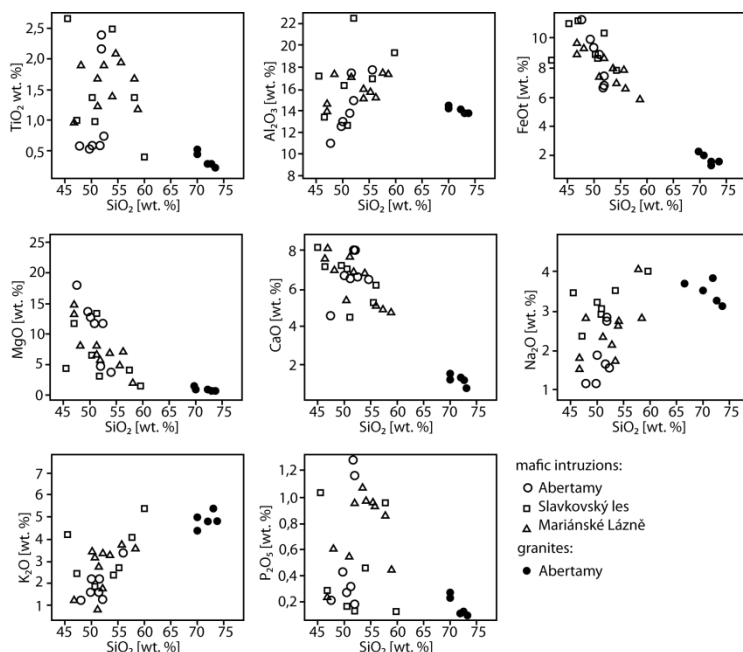


Fig. 1. Harker diagrams for dioritic intrusions and granites from the Krušné hory batholith.

Rocks with similar petrological and geochemical features are found in other parts of the Bohemian Massif (Central Bohemian pluton (Holub *et al.* 1997b, Janoušek *et al.* 1995, 2000a, b), Rastenburg pluton (Gerdes *et al.* 2000), Krkonoše pluton (Słaby 2002, Słaby and Martin 2008), Meissen massif (Wenzel *et al.* 1997)), in other European Variscides (the Iberian Peninsula (eg. Galán *et al.* 1996, Villaseca *et al.* 2009, Fernández-Suárez *et al.* 2011), French Massif Central (Shaw *et al.* 1993), Schwarzwald (Altherr *et al.* 1999), Sardinian-Corsican batholit (Poli and Tommasini 1999, Ferré and Leake

2001)), and as Variscan intrusions well as in the Carpathian gethic nappe in Romania (Duchesne *et al.*2008).

If the samples from these areas are pictured in the Harker diagrams, they follow the same trends as samples from the Krušné hory batholit. The inflection of the trend is visible around 54 to 56 wt. % SiO₂. Most evident is in diagrams for titanium and calcium and is also visible in diagrams for magnesium, calcium and sodium.

Basic and intermediate intrusions are characterized by high contents of lithophile elements (Cs, Rb, Ba, Sr, Th, LREE) and HFSE (Zr, Y), they have also increased amounts of transition metals (Cr, Co, Ni). In spidergrams (Fig. 2) the most basic samples from Krušné hory batholit (gabbrodiorites and gabbronorites) have lower contents of Rb (62 – 87 ppm), Th (6.0 – 8.6 ppm) and LREE and a significant negative Nb anomaly. On the contrary, compared to more acidic samples they have higher contents of Ba (up to 2200 ppm) and Sr (up to 800 ppm). They have higher amounts of transition metals, that positively correlate with MgO. REE distribution model (Fig. 3) is flatter for more basic samples ((La / Yb)_N = 6.7 to 13.8), they have a weak or slightly positive Eu anomaly. Exceptions are two samples of gabbrodiorite from Abertamy that have a negative Eu anomaly. More acid intrusions (quartz diorites and granodiorites) have in comparison with basic samples higher Rb (104 – 154 ppm), Th (from 11.26 to 20.82 ppm) and LREE contents. They have lower Ba (about 1000 ppm), Sr (393 – 539 ppm) and HREE contents, and lower amounts of transition metals. They have a steeper REE patterns ((La / Yb)_N = 9.0 to 23.4), usually show a negative Eu anomaly.

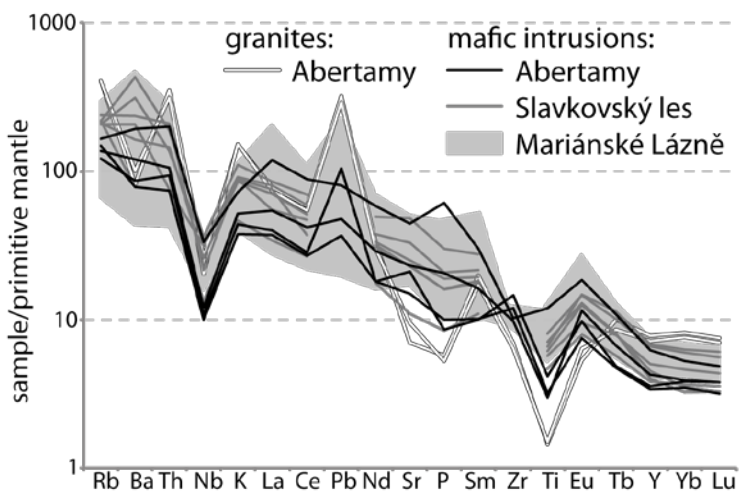


Fig. 2. Spidergram normalized to primitive mantle.

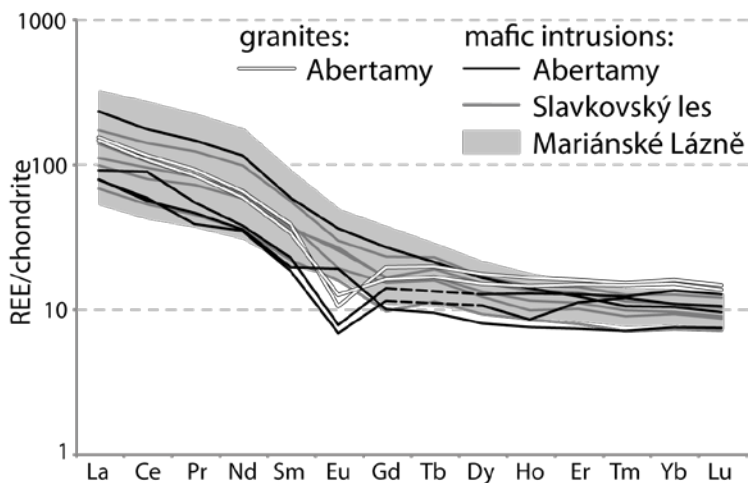


Fig. 3. REE distribution normalized to chondrite. Tb was not analysed in two samples from Abertamy.

Other dioritic intrusions in the Bohemian Massif as well as mafic intrusions in Variscan Europe have similar trace element characteristics. They show the same behavior of trace elements plotted in the spidergrams normalized to the primitive mantle. Markedly are significant negative Nb and Ti anomalies. Distribution of REE are identical for all intrusion: more basic samples (gabbros, gabbrodiorites) show a flatter distribution of REE and mostly weak or slightly positive Eu anomalies, acid samples (quartz diorites, monzonites, granodiorites) have higher contents of LREE and lower HREE, they have mostly negative Eu anomalies. Worth mentioning is the interesting positive Gd anomaly for samples from the German part of the Krušné hory batholit and for Blatenská and Čertovo břemeno suites of the Central Bohemian pluton. In contrast, samples from Slavkovský les and some samples from the surrounding of Mariánské Lázně have negative Gd anomaly. The intrusions of the Iberian Peninsula are free from this Gd anomaly.

MME from granodiorites from Iberian Peninsula show slightly different behavior, they have flat REE distribution patterns close to the basic intrusions, however they show strong negative Eu anomalies, which may be caused by interactions with the acid magma. The opposite behaviors show MME from rocks of Sázavská suite in the Central Bohemian pluton that have REE patterns consistent with basic samples – a flat distribution and positive Eu anomalies.

Determination of Sr and Nd isotopes was not performed at studied localities. Literature data show that isotopic ratios (ϵNd and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of dioritic intrusion are similar in all areas and are usually close to the Bulk Earth. Ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ range between typical mantle and crustal values (0.704 to 0.708). ϵNd values show a larger scatter around ± 0 (-8 - +4). Some intrusions (mostly with higher contents of SiO_2) have more crustal composition (up to -8),

other (mostly more basic samples), have positive ϵNd values, suggesting the contribution of basic magma.

The age of dioritic intrusions distinctly vary in different areas. The youngest intrusions in the Bohemian Massif are in the Krušné hory batholit, their age ranges between 322 to 327 Ma (Siebel *et al.* 1995, Kovářiková *et al.* 2007, 2010). Older intrusions are in the Meissen massif (340 – 355 Ma; Wenzel *et al.* 1997) and in the Central Bohemian pluton (336 – 361 Ma; Matte *et al.* 1990, Holub *et al.* 1997a, Dörr *et al.* 1998, Janoušek *et al.* 2004). Even older intrusions are in the French Massif Central (361 to 365 Ma, Shaw *et al.* 1993), while the youngest are in the Iberian Peninsula (310 – 312 Ma; Galán *et al.* 1996, Villaseca *et al.* 2009, Fernández-Suárez *et al.* 2011). The age of basic and intermediate intrusions is identical or only slightly older than the age of granites, with them mafic intrusions occur. This documents the contemporaneity of basic and acid magmas.

Field observations, geochemical and isotopic characteristics of dioritic intrusions suggest that they are hybrid rocks. Important role in their origin played an interaction of basic and acid magma. Some authors (Bea *et al.* 1999, Dias *et al.* 2002) regarded mafic intrusions as precursors of Variscan granites, that brought not only material but also the heat required for melting of crustal rocks. Origin and evolution of mafic intrusions were more complex and comprised several petrogenetical processes (magma mixing, assimilation and fractional crystallization), which took place together and involved each other. Isotopic values close to the mantle (positive values of ϵNd and low ratio of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), high contents of incompatible elements and transition metals of some intrusions suggest the existence of metasomatically enriched mantle in all areas at the time of formation of Variscan granitoid plutons. The calculation of

theoretical basic magma, that contributed to the mafic intrusions formation, show that the chemical composition of the real basic magma was close to the metasomatically enriched gabbros or lamprophyres. However lamprophyres are in the Variscan plutons quite rare and only in small volumes (Hegner *et al.* 1998, Neubauer *et al.* 2003, Barbarin 2005).

Linear trends from granites to basic rocks in the Harker diagrams suggest a significant role of mixing of mafic and acid magma in the origin of mafic intrusions. However, the trend inflection, which is most evident in diagrams for titanium, aluminum and magnesium, shows to fractional crystallization as a significant process. To study the origin and evolution of mafic intrusions are used different geochemical models. Many authors (Bea *et al.* 1999, Janoušek *et al.* 2000a, López-Moro and López-Plaza 2004, Moita *et al.* 2005) attach more importance to fractional crystallization and magma mixing consider as lesser significant process. On the other hand, other authors (Siebel *et al.* 1995, Janoušek *et al.* 1997, Slaby and Martin 2008) prefer magma mixing as an important process in the development of intrusions.

Figures 4 and 5 show the combination of two common processes in the genesis of granitoid rocks. In the first case (Fig. 4) we assume the mixing of two different magmas first. In diagram Rb vs. Ba are pictured mixing lines for four different basic parental magmas - Variscan gabbros (Orejana *et al.* 2009), lamprophyres from Germany (Hegner *et al.* 1998) and Austria (Neubauer *et al.* 2003) and calculated theoretical mafic member. Average composition of older granite from Krušné hory batholit was used for calculation as a acid magma. Individual batches of resulting hybrid magmas subsequently undergo fractional crystallization and create a range of hybrid rocks. Diagram shows evolution trends for two different cases of fractional crystallization: a) 20%

plagioclase + 80% clinopyroxene and b) 40% plagioclase + 60% amphibole. Plotted samples of dioritic intrusions from Krušné hory batholit show a large scatter along the mixing lines, but some follow the trends for fractional crystallization.

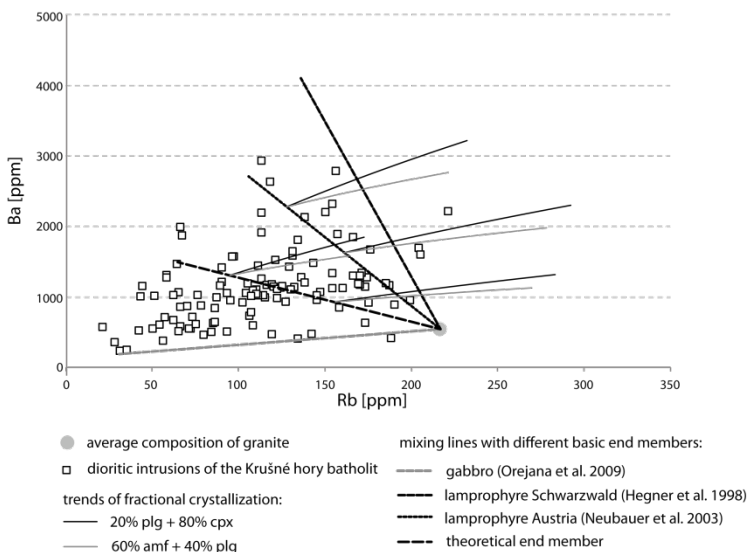


Fig. 4. Model of binary mixing that is followed by fractional crystallization of new hybridized magma. plg – plagioclase, cpx – clinopyroxene, anf – amphibole.

The second case (Fig. 5) is quite the opposite. Fractional crystallization of ascendent mafic magma (for the calculation were used lamprophyres (Hegner *et al.* 1998) and theoretical mafic member) create new batches of magma, which is then mixed with coexistent acid magma (for calculation was used the average composition of older granite from the Krušné hory batholit). Especially in diagrams for Rb vs. Ba the trends of fractional crystallization well describe the distribution of plotted samples of dioritic intrusions from the Krušné hory batholit. Their scatter to the width then explains the plotted line

for mixing. Despite considerable simplification and separation of the two processes from each other, which is highly improbable in the nature, it seems that this might be just the right scenario of hybrid dioritic intrusion evolution.

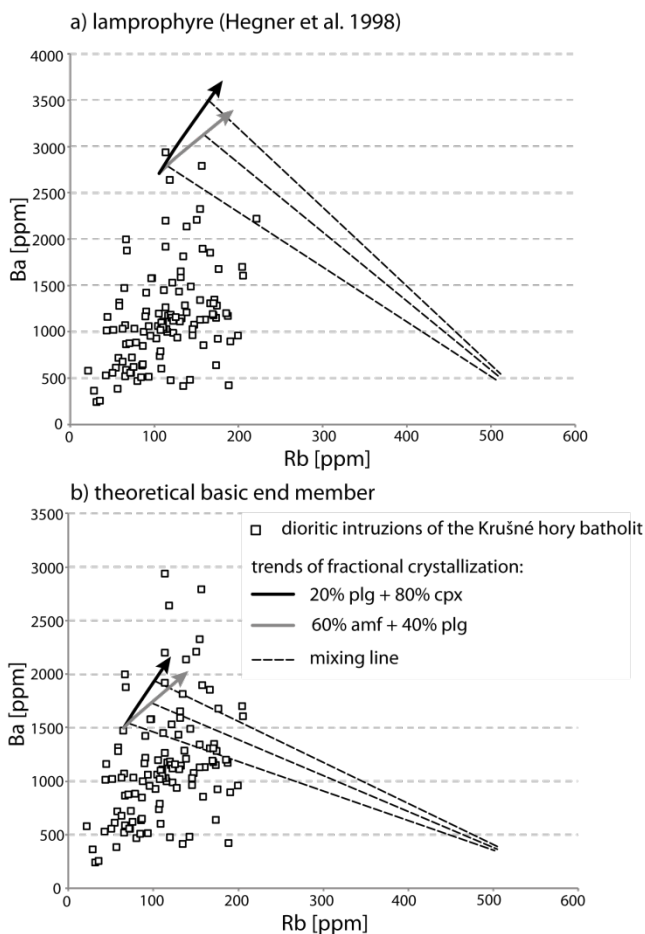


Fig. 5. Trends of fractional crystallization of two different basic magmas. Fractional is followed by mixing ox new batches of magma with acid granitic magma. plg – plagioclase, cpx – clinopyroxene, anf – amphibole.

5. Conclusions

Basic and intermediate intrusions commonly accompany Variscan granitoid plutons in Europe. These mafic intrusions have similar petrographical and geochemical features at all localities. At the base of their study and comparison it can be concluded:

1) mafic intrusions, including MME, are of different age in European Variscides,

2) they occur as minor bodies of small volumes, because the role of basic magma in origin of granites was small,

3) they partly originated by mixing of acid magma with basic magma that was close to metasomatically enriched gabbros. Lamprophyres as a source of mafic magma are less probable because of their very small volumes in Variscides,

4) their final chemical composition was further evolved by fractional crystallization,

5) they inherit (partly or completely) geochemical features of metasomatically enriched mantle, from which the mafic magma originated.

6. References

- Altherr, R., Henjes-Kunst, F., Langer, C., Otto, J. (1999): Interaction between crustal-derived felsic and mantle-derived mafic magmas in the Oberkirch Pluton (European Variscides, Schwarzwald, Germany). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 137, 304-322.
- Barbarin, B. (2005): Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California: nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80, 155-177.
- Bea, F., Montero, P., Molina, J. F. (1999): Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Avila Batholith: a model for the generation of Variscan batholiths in Iberia. *J. Geol.*, 107, 399-419.
- Castro, A. (1990): Microgranular enclaves of the Quintana Granodiorite (Los Pedroches Batholith). Petrogenetic significance. *Rev. Soc. Geol. España* 3, 7-21.
- Cocherie, A., Guerrot, C., Rossi, P. (1992): Single-zircon dating by stepwise Pb evaporation: comparison with other geochronological techniques applied to the Hercynian granites of Corsica. *Chem. Geol.*, 101, 131-141.
- Dias, G., Sirnões, P. P., Ferreira, N., Leterrier, J. (2002): Mantle and Crustal Sources in the Genesis of Late-Hercynian Granitoids (NW Portugal): Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints. *Gondwana Research*, 5(2), 287-305.
- Dörr, W., Fiala, J., Franke, W., Haack, U., Philippe, S., Schastock, J., Scheuven, D., Vejnar, Z., Zulauf, G. (1998): Cambrian vs. Variscan tectonothermal evolution within the Teplá -Barrandian: evidence from U-Pb zircon ages of syntectonic plutons (Bohemian massif, Czech Republic). *Acta Univ. Carolinae Geol.*, 42, 229-230.
- Downes, H., Duthou, J. L. (1988): Isotopic and trace element arguments for the lower-crustal origin of Hercynian granitoids and pre-Hercynian orthogneisses, Massif Central (France). *Chem. Geol.*, 68, 291-308.

- Duchesne, J.-C., Liègeois, J.-P., Iancu, V., Berza, T., Matukov, D. I., Tatu, M., Sergeev, S. A. (2008): Post-collisional melting of crustal sources: constraints from geochronology, petrology and Sr, Nd isotope geochemistry of the Variscan Sichevita and Poniasca granitoid plutons (South Carpathians, Romania). *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch)*, 97, 705-723.
- Fernández-Suárez, J., Gutierrez-Alonso, G., Johnston, S. T., Jeffries, T. E., Pastor-Galán, D., Jenner, G. A., Murphy, J. B. (2011): Iberian late-Variscan granitoids: Some considerations on crustal sources and the significance of “mantle extraction ages”. *Lithos*, 123, 121-132.
- Ferré, E. C., Leake, B. E. (2001): Geodynamic significance of early orogenic high-K crustal and mantle melts: example of the Corsica Batholith. *Lithos*, 59, 47-67.
- Freiberger, R., Hecht, L., Cuney, M., Morteani, G. (2001): Secondary Ca–Al silicates in plutonic rocks: implications for their cooling history. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141, 415-429.
- Galán, G., Pin, C., Duthou, J. L. (1996): Sr-Nd isotopic record of multi-stage interactions between mantle-derived magmas and crustal components in a collision context. The ultramafic-granitoid association from Vivero (Hercynian belt, NW Spain). *Chemical Geology*, 131, 67-91.
- Gerdes, A., Warner, G., Friedrich, E. (1998): Late-orogenic magmatism in the southern Bohemian Massif – geochemical and isotopic constraints on possible sources and magma evolution. *Acta Univ. Carolinae – Geologica*, 42, 41-45.
- Hegner, E., Kölbl-Ebert, M., Loeschke, J. (1998): Post-collisional Variscan lamprophyres (Black Forest, Germany): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating, Nd, Pb, Sr isotope, and trace element characteristics. *Lithos*, 45, 395-411.
- Holub, F. V., Cocherie, A., Rossi, P. (1997a): Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Moldanubian-Barrandien boundary. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Series IIA – Earth and Planetary Sciences*, 325, 19-26.

- Holub, F. V., Machart, J., Manová, M. (1997b). The Central Bohemian Plutonic Complex: geology, chemical composition and genetic interpretation. *Sbor. Geol. Věd, Ložisk. Geol. Mineral.*, 31, 27-50.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D.R. (1995): Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Geol. Rundsch.*, 84, 520-534.
- Janoušek, V., Rogers, G., Bowes, D. R., Vaňková, V. (1997): Cryptic trace-element variation as an indicator of reverse zoning in a granitic pluton: the Říčany granite, Czech Republic. *Journal of the Geological Society, London*, 154, 807-815.
- Janoušek, V., Bowes, D. R., Braithwaite, C. J. R., Rogers, G. (2000a): Microstructural and mineralogical evidence for limited involvement of magma mixing in the petrogenesis of a Hercynian high- K calc-alkaline intrusion: the Kozárovice granodiorite, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 91, 15-26.
- Janoušek, V., Bowes, D. R., Rogers, G., Farrow, C. M., Jelínek, E. (2000b): Modelling diverse processes in the petrogenesis of a composite batholith: the Central Bohemian Pluton, Central European Hercynides. *J. Petrol.*, 41, 511-543.
- Janoušek, V., Braithwaite, C. J. R., Bowes, D. R., Gerdes, A. (2004): Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos*, 78, 67-99.
- Kober, B. (1986): Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 93, 481-490.
- Kober, B. (1987): Single-zircon evaporation combined with Pb+ emitter-bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications to zirconology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96, 63-71.
- Kováříková, P., Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2007): Petrology, geochemistry and zircon age for redwitzite at Abertamy, NW Bohemian Massif (Czech

- Republic): tracing the mantle component in Late Variscan intrusions. *Chemie der Erde*, 67, 151-174.
- Kováříková, P., Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2010): Dioritic intrusions of the Slavkovský les (Kaiserwald), Western Bohemia: their origin and significance in late Variscan granitoid magmatism. *International Journal of Earth Sciences*, 99(3), 545-565.
- López-Moro, F.-J., López-Plaza, M. (2004): Monzonitic series from the Variscan Tormes Dome (Central Iberian Zone): petrogenetic evolution from monzogabbro to granite magmas. *Lithos*, 72, 19-44.
- Matte, P., Maluski, H., Rajlich, P., Franke, W. (1990): Terrane boundaries in the Bohemian Massif: result of large-scale Variscan shearing. *Tectonophysics*, 177, 151-170.
- Moita, P., Santos, J. F., Pereira, M. F. (2005): Tonalites from the Hospitais massif (Ossa-Morena Zone, SW Iberian Massif, Portugal) II: Geochemistry and petrogenesis. *Geogaceta*, 37, 55-58.
- Moreno-Ventas, I., Rogers, G., Castro, A. (1995): The role of hybridization in the genesis of Hercynian granitoids in the Gredos Massif, Spain: inferences from Sr-Nd isotopes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 137-149.
- Neubauer, F., Dallmeyer, R. D., Fritz, H. (2003): Chronological constraints of late- and post-orogenic emplacement of lamprophyre dykes in the southeastern Bohemian Massif, Austria. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 83, 317-330.
- Orejana, D., Villaseca, C., Pérez-Soba, C., López-García, J. A., Billström, K. (2009): The Variscan gabbros from the Spanish Central System: A case for crustal recycling in the sub-continental lithospheric mantle? *Lithos*, 110, 262-276.
- Pin, C., Duthou, J.-L. (1990): Sources of Hercynian granitoids from the French massif Central: inferences from Nd isotopes and consequences for crustal evolution. *Chem. Geol.*, 83, 281-196.
- Poli, G. E., Tommassini, S. (1999): Geochemical modeling of acid–basic magma interaction in the Sardinia – Corsica Batholith: the case study of Sarrabus, southeastern Sardinia, Italy. *Lithos*, 46, 553-571.

- Shaw, A., Downes, H., Thirlwall, M. E. (1993): The quartz-diorites of Limousin: elemental and isotopic evidence for Devonian-Carboniferous subduction in the Hercynian belt of the French massifs Central. *Chem. Geol.*, 107, 1-18.
- Siebel, W., Höhndorf, A., Wendt, I. (1995): Origin of late Variscan granitoids from NE Bavaria, Germany, exemplified by REE and Nd isotope systematics. *Chem. Geol.*, 125(3-4), 249-270.
- Siebel, W., Chen, F., Satir, M. (2003): Late-Variscan magmatism revisited: new implications for Pb-evaporation zircon ages on the emplacement of redwitzites and granites in NE Bavaria. *Int. J. Earth Sci.*, 92, 36-53.
- Słaby, E. (2002): Porphyritic granite facies Szklarska Poręba Huta. *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 20, 245-247.
- Słaby, E., Martin, H. (2008): Mafic and felsic magma interaction in granites: The Hercynian Karkonosze Pluton (Sudetes, Bohemian Massif). *Journal of Petrology*, 49(2), 353-391.
- Stacey, J. S., Kramers, J. D. (1975): Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26, 207-221.
- Villaseca, C., Bellido, F., Perez-Soba, C., Billstrom, K. (2009): Multiple crustal sources for post-tectonic I-type granites in the Hercynian Iberian Belt. *Mineralogy and Petrology*, 96, 197-211.
- Wenzel, T., Mertz, D. F., Oberhansli, B., Becker, T., Renne, P. R. (1997): Age, geodynamic setting, and mantle enrichment processes of a K-rich intrusion from the Meissen massif (northern Bohemian massif) and implications for related occurrences from the mid-European Hercynian. *Geol. Rundsch.*, 86, 556-570.

Životopis Pavly Holečkové

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Pavla Holečková (roz. Kovářiková)

Titul: RNDr.

Narození: 3. 3. 1981, Sokolov

E-mail: holeckova.p@gmail.com

Vzdělání:

- 1987 - 1995 **Základní škola** ve Smetanově ulici v Chodově, od roku 1989 s rozšířenou výukou jazyků (německý a anglický jazyk)
- 1995 - 1999 **1. české gymnázium** v Karlových Varech
Maturitní zkouška z českého jazyka, anglického jazyka, biologie a chemie
- 1999 - 2004 **Univerzita Karlova**, Přírodovědecká fakulta, Geologie, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů (magisterské studium)
- 2004 obhajoba diplomové práce „Geochemie a geochronologie bazických hornin sev. části karlovarského plutonu.“
- 2004 státní magisterská zkouška: geochemie geologických procesů, geochemie životního prostředí, aplikované geologické vědy v životním prostředí (Mgr.)

- 2004 - 2012 **Univerzita Karlova**, Přírodovědecká fakulta,
Geologie, Ústav geochemie, mineralogie a
nerostných zdrojů (doktorské studium)
- 2006 First Certificate in English
- 2011 státní doktorská zkouška: geochemie granitoidů,
fázové rovnováhy, izotopová geologie a
geochronologie
- 2011 získán titul RNDr. na Ústavu geochemie,
mineralogie a nerostných zdrojů Přírodovědecké
fakulty Univerzity Karlovy
- 2012 plánovaná obhajoba disertační práce „Mafické a
intermediální intruze jako průvodci
peraluminických granitů krušnohorského batolitu.“

Zaměstnání:

- 2007 - **Česká geologická služba**, Geologická 6, Praha 5
spolupráce na projektu „Zhodnocení účinků
Göteborgského protokolu na acidifikované a
eutrofizované vody a půdy.“ (odběr vzorků
v terénu, zpracování geochemických dat, publikace
geochemických map, prezentace výsledků
výzkumu na seminářích ČGS)
od 2010 zapojení do projektu „Rebilance zásob
podzemních vod v ČR.“ (hydrochemická část)
- 2011 - rodičovská dovolená

Konference:

- 2005 Studentská geologická konference, Brno

Vědecké zájmy:

- petrologie a geochemie granitoidních a dioritických hornin
- numerické modelování petrogenetických procesů
- metodika odběrů povrchových a podzemních vod
- hydrochemie povrchových a podzemních vod v ČR

Publikace

- Kováříková, P.**, Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2010): Dioritic intrusions of the Slavkovský les (Kaiserwald), Western Bohemia: their origin and significance in late Variscan granitoid magmatism. *Int J. Earth Sci (Geol Rundsch)*, 99(3), 545-565.
- Kováříková, P.**, Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2007): Petrology, geochemistry and zircon age for redwitzite at Abertamy, NW Bohemian Massif (Czech Republic): tracing the mantle component in Late Variscan intrusions. *Chem. Erde.*, 67, 151-174.
- Kováříková, P.**, Siebel, W., Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V. (2006): *Zprávy o geologických výzkumech za rok 2005*. 111-113.
- Kováříková, P.**, Jelínek, E., Štemprok, M., Kachlík, V., Holub, F. V., Blecha, V. (2005): Petrochemické srovnání redwitzitů SZ části českého masivu. *Zprávy o geologických výzkumech za rok 2004*. 103-106.
- Jelínek, E., Siebel, W., Kachlík, V., Štemprok, M., Holub, F. V., **Kováříková, P.** (2004): Petrologie a geochemie mafických intruzí v západokrušnohorském granitovém plutonu v okolí Abertam a Mariánských Lázní. *Zprávy o geologických výzkumech za rok 2003*. 109-112.
- Jelínek, E., Kachlík, V., Štemprok, M., Holub, F. V., **Kováříková, P.** (2003): Mafické intruze jako prekurzory peraluminických granitů Krušnohorského batolitu. *Zprávy o geologických výzkumech za rok 2002*. 23-25.