

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie



**Michala Urychová**

Bakalářská práce

**Termobarometrie granátických peridotitů  
a okolních granulitů Blanského lesa**

Thermobarometry of garnet peridotites and granulites from the Blanský

Les Massif

Školitel: prof. Ing. Shah Wali Faryad, CSc.

Konzultant: RNDr. Helena Klápová, CSc.

**Praha 2012**

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala všem, kteří mi pomáhali při studiu a tvorbě mé bakalářské práce. Nejvíce si cením času a shovívavosti, které mi věnoval pan profesor Shah Wali Faryad a poté tolika proseděných hodin nad mikroskopem a cenných rad od doktorky Heleny Klápové. V neposlední řadě bych za velkou podporu chtěla poděkovat mému příteli Samuelovi.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani žádná její část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 14. 6. 2012

Michala Urychová

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Vývoj a charakteristika Českého masivu s lokalizací Blanského lesa</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Základní rozdělení Českého masivu a charakteristika jednotlivých oblastí, se zaměřením na Moldanubikum</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. Granulitová tělesa moldanubické oblasti a jejich vztah k okolním horninám</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.1. Původ granulitů</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2.2. Vznik granátických peridotitů, eklogitů, a jejich vztah ke granulitům</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3. Granulitový masiv Blanského lesa</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Petrografická charakteristika studovaných hornin v granulitovém masivu Blanského lesa</b> .	<b>9</b>
<b>3.1. Granulity</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1.1. Felsické granulity</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1.2. Mafické granulity</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2. Granátické peridotity</b> .....	<b>13</b>
<b>4. Termobarometrie</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1. Základní principy termobarometrie</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1.1. Termometrie</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1.2. Barometrie</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1.3. Používané počítačové programy</b> .....	<b>18</b>

<b>4.2. Termobarometrie hornin Blanského lesa .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.1. Granulity .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.2. Granátické peridotity .....</b>	<b>20</b>
<b>5. Závěr .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Literatura .....</b>	<b>25</b>
<b>7. Přílohy.....</b>	<b>32</b>

## **1. Úvod**

Horniny krystalických masivů, které se vyskytují na zemském povrchu, prošly složitým vývojem změn tlaků, teplot a působení fluid. Původní minerální asociace byly nahrazovány novými, které byly za daných podmínek stabilnější. Zjištění teplot a tlaků, za kterých docházelo k reekvilibraci, je pro petrologii stěžejní. Z nich poté můžeme zpětně rekonstruovat dráhu, kterou horniny prošly, než se dostaly do své dnešní geotektonické polohy.

Pro výpočet tlaků a teplot používáme termobarometrii, soubor metod založený na chemických reakcích mezi minerály, které jsou v rovnováze. Pro jejich výpočet musíme pečlivě vybírat původní rovnovážné minerální asociace a na jejich základě můžeme dále rekonstruovat posloupnost tvorby minerálů a definovat reakce mezi nimi.

Moldanubická zóna je z hlediska metamorfni petrologie jednou z nejkoumanějších oblastí v rámci Českého masivu. Vedle sebe se zde nacházejí metamorfované horniny amfibolitové a granulitové facie s čočkami a tělesy hornin vzniklých za velmi vysokých tlaků (UHP). Texturní vztahy a termobarometrie patří mezi základní metody rekonstrukce vývoje a odhadnutí PT podmínek jejich vzniku.

Pro svou bakalářskou práci jsem si vybrala téma, které se zabývá petrografií a metodami termobarometrie vysokotlakých a ultravysokotlakých ultramafických hornin z granulitového tělesa Blanského lesa. Práce má tři části. První část shrnuje poznatky o geologické pozici jihočeských granulitových masivů, mezi které se masiv Blanského lesa řadí, a sumarizuje názory o původu těchto těles, které jsem získala prostudováním dostupné literatury. V druhé části jsem se zaměřila na petrografickou charakteristiku získaných vzorků hornin a jejich popisem. Pro tuto kapitolu jsem mikroskopovala 36 výbrusů z granulitů i ultramafických hornin. V třetí části jsem se zaměřila na rešerši literatury o termobarometrii a zvláště o metodách používaných pro mnou studované horniny. V kapitole 4.2 jsem shrnula většinu dodnes získaných termobarometrických dat pro horniny z oblasti granulitu Blanského lesa.

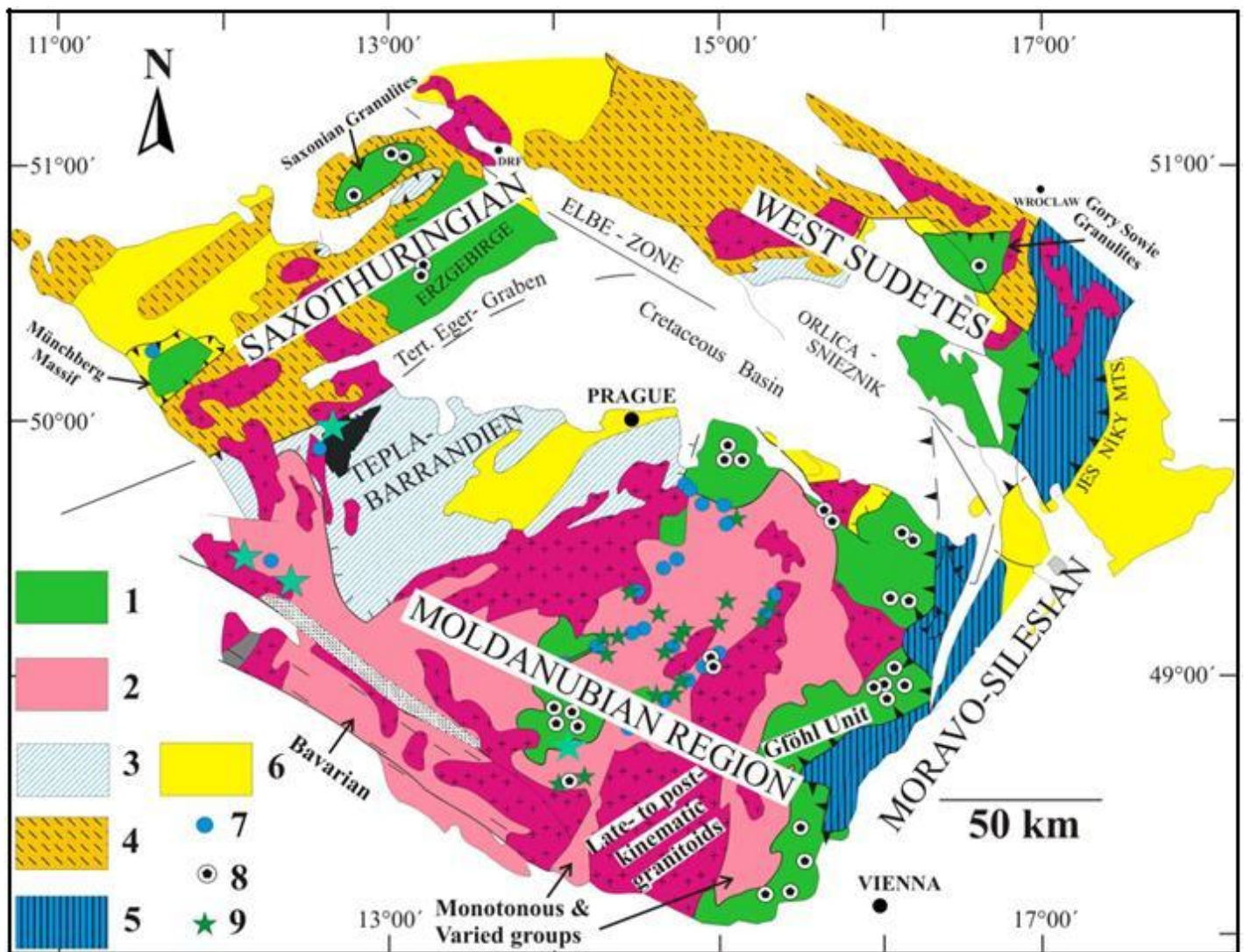
## **2. Vývoj a charakteristika Českého masivu s lokalizací Blanského lesa**

Český masiv je jedním z největších souvisle vystupujících fragmentů variského (hercynského) orogénu (Matte, 1986; Franke, 1989; Franke et al., 2000; Kachlík, 2003). Rozsáhlé variské horstvo vznikalo postupně během připojování kontinentálních fragmentů z periferní oblasti Gondwany k Laurussii, která vznikla kaledonskou konvergencí Laurentie a Baltiky. Variscidy jsou typické svojí vějířovitou zonální stavbou, která byla definována již v klasických pracích (Suess, 1926; Kossmat, 1927; Stille, 1951) a dodnes se zachovala právě na území Českého masivu.

Schulmann et al. (2005, 2009) definují Český masiv jako odtrženou kolizní doménu Gondwany, která je charakterizovaná třemi základními prvky: (1) relikty dvoufázové jihovýchodně orientované subdukce na hranici saxothuringika a tepelsko-barrandienské jednotky; (2) magmatickým obloukem spjatým se subdukcí probíhající v centrální části, který je reprezentován středočeským plutonickým komplexem a (3) rigidním výběžkem, jež je představován brunijskou mikrodeskou na jihovýchodě Českého masivu. Tepelsko-barrandienská jednotka mezi suturovou zónou a magmatickým obloukem tedy podle uvedených autorů reprezentuje předobloukovou doménu, a moldanubikum, nacházející se mezi magmatickým obloukem a brunijskou mikrodeskou, je zkráceným a ztluštělým vnitrokontinentálním kořenem orogénu.

### **2.1. Základní rozdělení Českého masivu a charakteristika jednotlivých oblastí, se zaměřením na moldanubikum**

Český masiv lze vymezit na území Čech, Moravy a dále na okrajových částech ležících na území Polska, Německa a Rakouska. Je rozdělován na čtyři hlavní jednotky (Obr. 1): (1) saxothuringikum, (2) tepelsko-barrandienskou oblast; (3) moravosilezikum a (4) moldanubikum. Moravskoslezská oblast byla až do devonu součástí Gondwany a do dnešní polohy se dostala až v průběhu variské orogeneze (devon-karbon). Zbylé tři oblasti řadíme k tzv. armorické skupině mikrokontinentů.



**Obr. 1.** Schematická geologická mapa Českého masivu (Franke, 2000; upravená: Faryad et al., 2011); 1 – jednotky HP-UHP hornin (včetně gfhölské jednotky); 2 – monotónní a pestrá skupina s MT-MP/HP horninami; 3 – jednotky s MP horninami (tepelsko-barrandienská oblast); 4 – málo metamorfované jednotky saxothuringika a západních Sudet (lugika); 5 – středně metamorfované oblasti západních Sudet a moravosilezika; 6 – svrchnoproterozoický - spodnokarbonský sedimentární pokryv; 7- serpentinity; 8 - granátické peridotity; 9 - eklogity

Saxothuringikum reprezentuje vnější část variského orogénu. Od tepelsko-barrandienské jednotky je odděleno tepelskou suturou, která představuje hlubinný šev po uzavření sasko-durynského oceánu. Dělí se na dvě jednotky, při hranicích s Německem se rozkládá část saxothuringikum a na hranicích s Polskem jednotka lugikum. Tepelsko-barrandienská oblast je

fragmentem starší kůry, který je začleněný do stavby variscid. Je tvořena vlastní tepelsko-barrandienskou jednotkou, která se na severovýchodě noří pod křídový pokryv a na povrch opět vystupuje v oblasti Železných hor. Moravosilezikum bylo při variské kolizi s lugodanubikem silně zdeformováno, rozlámáno a metamorfováno a jen jihovýchodní část této oblasti, brunovistulikum, zůstala od konce kadomské orogeneze tektonicky neporušená. Lze jí tedy považovat za epikadomskou platformní jednotku, která byla v dalších obdobích deformována už jen křehce.

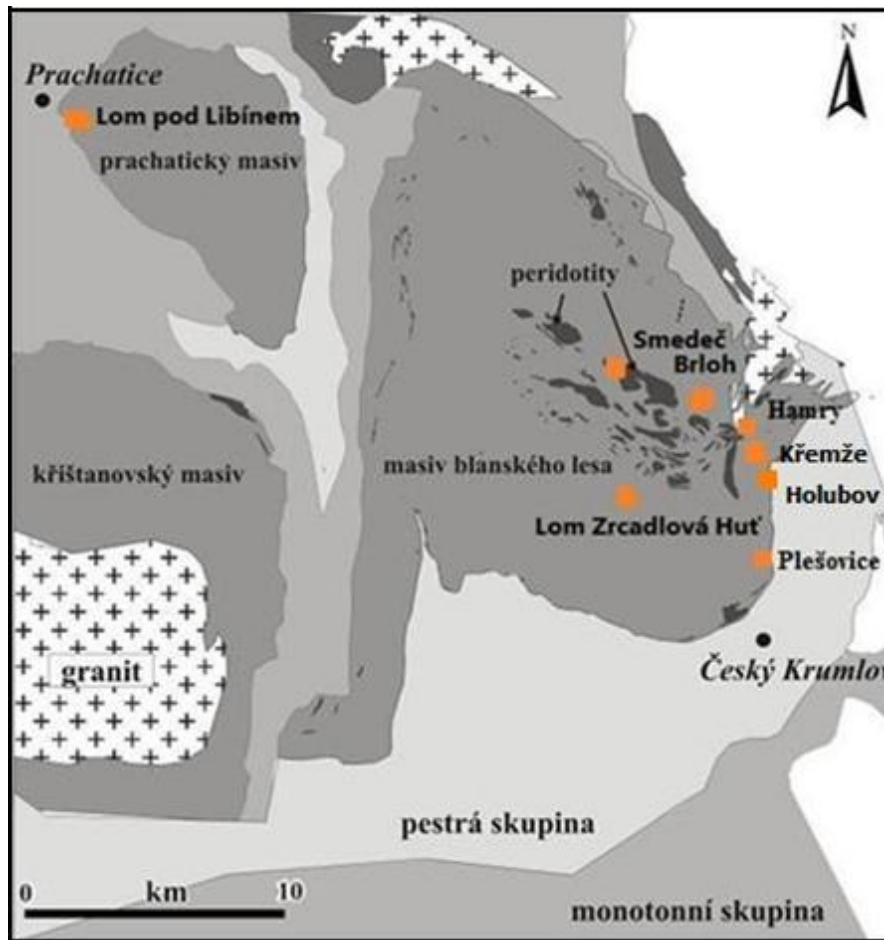
Moldanubikum je nejhluběji erodovanou částí Českého masivu a představuje centrální oblast bývalého variského orogénu s horninami nejvíce postiženými metamorfózou. Na hranici moldanubika s tepelsko-barrandienskou jednotkou jsou četné intruze variských granitoidů, které zastírají původní charakter hranice. Komplexy moldanubika se nacházejí i dále v podloží tepelsko-barrandienské jednotky a naopak jsou nasunuty na okrajové jednotky brunovistulika. Moldanubická jednotka je tvořena horninami vysokého stupně metamorfózy (granulity, eklogity) a úlomky plášťových hornin. V centrální části se vyskytuje těleso pozdně variského moldanubického plutonu.

Moldanubická doména je tradičně dělena do tří jednotek: (1) monotónní skupina (ostrongská jednotka) je charakterizována biotit-cordieritickými pararulami a amfibolity středního stupně. Vzácně se zde nacházejí kvarcitty nebo erlány, které pravděpodobně vznikly metamorfózou Capoloh nebo konkrecí (Tollmann, 1982; Matte, 1986; Franke, 1989), a také tělesa ortorul a eklogitů (Medaris, et al., 1994; O'Brien and Vrána, 1995). Tato jednotka je strukturně nejspodnější a je nasunuta pod horniny amfibolitové facie (2) pestré skupiny (drosendorfská jednotka), která se od monotónní skupiny odlišuje rozdílnými PT podmínkami vzniku a pestřejší litologií. Podstatný je také zvýšený podíl pelitické složky a výskyt zralejších sedimentů jako jsou biotit-sillimanitické pararuly. Dále jsou zde k nalezení tělesa kvarcitů, mramorů, grafitických hornin a kyselých i bazických metavulkanitů. Strukturně nejsvrchnější je (3) gföhlská jednotka tvořená korovými granulity, migmatity a ortorulami, v nichž jsou přítomny čočky a tělesa HP/UHP plášťových hornin (eklogity, peridotity, granátické peridotity a pyroxenity). Lze jí tedy charakterizovat jako soubor hornin, které prodělaly variskou vysokoteplotní a vysokotlakou metamorfózu a poté byly pod malým úhlem nasunuty na horniny pestré a monotónní skupiny (Tollmann, 1982; Matte, 1986;

Franke, 1989). Podle Schulmanna et al. (2005; 2008), Štípské et al. (2006) a Racka et al. (2006) je tento strukturně-tektonický vztah hornin dán vertikální transformací hornin při V-Z kompresi.

## **2.2. Granulitová tělesa moldanubické oblasti a jejich vztah k okolním horninám**

Většina granulitových těles gföhlské jednotky leží podél V-JV hranice moldanubika. Část granulitových masivů je přítomná v centrální části (kutnohorský komplex) a v jižní části moldanubické zóny (jihočeské granulitové masivy: Blanský les, Prachatický a Křišťanovský masiv, lišovský granulit; Obr. 2). Převládají granulity felsické s občasným výskytem mafických granulitů, které obsahují pyroxeny (např. diopsid a ortopyroxen). Granulity v kutnohorském komplexu a v jižní části moldanubika jsou také zařazované do „gföhlské“ spodní kůry, která vytváří separovaná tělesa obklopená střednětlakými horninami monotónní a pestré skupiny.



**Obr. 2.** Mapa geologické pozice jihočeských granulitových masivů s lokalizacemi studovaných hornin (Vrána, 1989; Franěk et al., 2006; upravená: Urychová, 2012)

### 2.2.1. Původ granulitů

Původ a protolit granulitů Českého masivu je velmi diskutovaný a názory na jejich zdrojové horniny je možno rozdělit do tří skupin: (1) granulity vznikly z felsických vulkanických nebo vulkanosedimentárních hornin (Fiala, 1987); (2) jsou produktem suchého, HP/HT parciálního tavení sedimentárních hornin (Vrána, 1989; Jakeš, 1997; Kotková a Harley 1999, 2010) anebo (3) se jedná o metamorfované kyselé vulkanity/granitoidy (Vrána, 1989; Janoušek et al., 2004).

Granulity představují krustální horniny, které byly subdukované během variské orogeneze do vysokotlakých podmínek. Z nálezů mikrodiamantů v granulitech saxothuringika (Kotková et al., 2011), které jsou korelovatelné s moldanubickými masivy, se usuzuje, že se tyto horniny nacházely v UHP/UHT podmínkách. Během svého výstupu na zemský povrch byly tyto horniny intenzivně

reequilibrované v granulitové a následně amfibolitové facii a původní HT/HP (UHT/UHP) charakter byl značně přetištěný.

### **2.2.2. Vznik granátických peridotitů, eklogitů, a jejich vztah ke granulitům**

HP a UHP mafické a ultramafické horniny se vyskytují ve všech granulitových tělesech moldanubické oblasti, ale jejich původ a vztah k těmto horninám je stále nejasný. Podle Schulmanna et al. (2005, 2009) vznikla asociace granulitů s granátickými peridotity v důsledku ztlušťování kůry během kolize a následným vytlačení hornin spodní kůry a svrchního pláště. Existují ale i jiné názory. Medaris et al. (2003) se domnívají, že tyto granátické peridotity a část eklogitů byly derivovány ještě z hlubších partií, snad až z astenosférického pláště.

UHP podmínky jejich vzniku se předpokládají na základě termobarometrických výpočtů jak z granátických peridotitů (Medaris et al., 2005; Faryad, 2009), tak i z eklogitů (Nakamura et al., 2004; Faryad, 2009). V granátických peridotitech Blanského lesa byly objeveny i pozůstatky mikrodiamantů (Nakamura et al., 2011). Metamorfní textury i termobarometrické výpočty z některých granátických peridotitů s vrstvami (žilami) granátických pyroxenitů poukazují na zanoření plášťových hornin ze spinelové zóny do granátové během jejich subdukce (Faryad et al., 2009).

Na základě geochronologických dat bylo určeno, že granulity byly derivovány z ordovických granitů (Franke, 2000). Spolu se zjištěným stářím HP/UHP hornin byl vrchol vysokostupňové metamorfózy datován v rozmezí 370-340 Ma (Carswell and Jamtweit, 1990; Wendt et al., 1994; Kröner et al., 1998, 2000; Janoušek et al., 2004; Schulmann et al., 2005; Friedl et al., 2011).

## **2.3. Granulitový masiv Blanského lesa**

V rámci jihočeských granulitů je masiv Blanského lesa největší (o rozměrech 16x22 km). Je lokalizován na území okresu Český Krumlov a částečně zasahuje i do okresu českobudějovického a prachatického. Typický je hojný výskyt serpentinitů, eklogitů, granátických peridotitů, amfibolitů a drobných těles mafických granulitů. Zachoval se i velmi komplexní strukturní záznam. Podél

## *Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

severního okraje granulitu Blanského lesa se vyskytuje několik set metrů široké těleso litologicky rozmanitých metasedimentů, které obsahuje četné interkalované amfibolity, mramory a grafitické ruly. Předpokládá se, že amfibolitové čočky vznikly retrogresí eklogitu. Masiv Blanského lesa je tvořen převážně světlými granulity. Mafické granulity jsou v budínách od několika decimetrů až po 250 m (Kodym, 1972). Vrána (1992) tyto horniny rovněž definoval jako rekrystalizované a reekvilibrované eklogity.

V horninovém záznamu granulitu Blanského lesa můžeme rozlišit 3 typy struktur (Vrána, 1997; Franěk et al., 2006). Nejstarší, vzácně dochovaná, struktura je reprezentována výskyty zbytků kompozičního páskování. Pozdější struktura se vyznačuje mylonitickou foliací uklánějící se mírně až strmě k západu nebo k východu, která vznikla v podmínkách granulitové facie. Nejranější deformační struktury byly extenzně přetvořené strmou mylonitickou foliací hornin amfibolitové facie. Obě tyto strmé deformace vznikly během dvoustupňového výzdvihu granulitů ze spodnokorových podmínek do jejich dnešní tektonické pozice.

Souhrnně by se dalo říci, že strukturní vývoj masivu Blanského lesa odpovídá zaklínění a syntektonické retrogresi rozsáhlého granulitového tělesa se zchovalou eliptickou doménou hornin granulitové facie v jeho vnitřní části. Výskyt čoček serpentinitů a granátických peridotitů dokazuje, že toto granulitové těleso obsahovalo imbrikace těchto hornin ještě před procesem zaklínění (Franěk et al., 2003).

Serpentinizované a granátické peridotity se objevují ve třech strukturních pozicích (Vrána, 1979; Franěk et al., 2006): (1) jako izolovaná tělesa podél východního a jižního okraje Blanského lesa; (2) široký SZ-JV orientovaný pás v centrální části Blanského lesa a (3) jako čočky, které jsou prostorově spjaty s mafickými granulity a retrográdními eklogity, které formují úzkou severojižní až SZ-JV orientovanou zónu blízko západní a severní hranice granulitového masivu.

### **3. Petrografická charakteristika studovaných hornin v granulitovém masivu Blanského lesa**

#### **3.1. Granulity**

Hlavním horninovým typem jsou felsické granulity ( $\text{SiO}_2 > 70 \%$ ) obsahující granát a  $\pm$  kyanit, které velmi výrazně převládají nad mafickými granulity (Kodym et al., 1978; Vrána, 1992; Janoušek et al., 2007). Kromě těchto dvou základních typů zde byly objeveny ještě vzácné vysoce draselné granulity, ve kterých naprosto dominuje alkalický živec nad granátem (Vrána, 1989), jim se však v této práci dále nevěnuji.

##### **3.1.1. Felsické granulity**

Světlé granulity lze rozdělit do dvou skupin. První skupina granulitů obsahuje *qz*, *kfs*, *gr*, *ky*, *sil*, *ms* (zkratky minerálů podle: Whitney and Evans, 2010; Příloha 1). Minerální složení druhé skupiny je *qz*, *kfs*, *pl*, *grt*, *bt*, *rt*, *ilm*, *zrn*, *ap*. Pro mikroskopické studium jsem měla k dispozici 8 výbrusů granulitů první skupiny z masivu Blanský les a 10 vzorků granulitů druhé skupiny z lokalit Křemže, Brloh, Smedeč, Zrcadlová Huť a Lom pod Libínem (Obr. 2; Příloha 2).

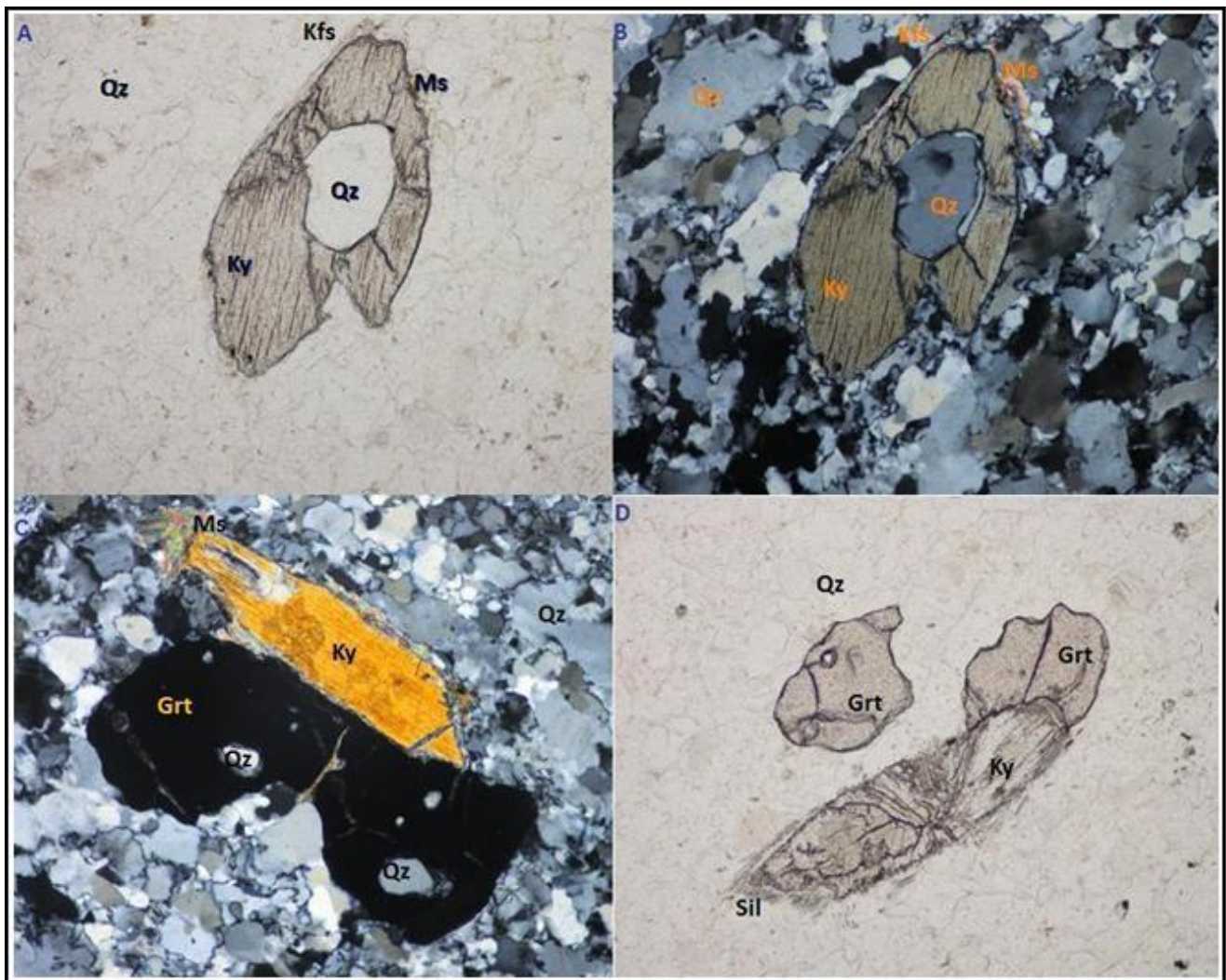
##### *1. skupina*

Tyto horniny jsou slabě usměrněné, mají granoblastickou strukturu s porfyroblasty granátu a kyanitu (Obr. 3 A-D). Matrix je tvořená zrny křemene a živce o různých velikostech. Oba minerály nesou známky deformace a následné reequilibrace, křemen undulózně zháší a obsahuje četné inkluze, u živců je hojný výskyt odmišenin mezopertitu.

Reliktní zrna granátu tvoří drobné xenomorfní porfyroblasty o velikostech do 1,5 mm, která zabírají přibližně 5% výbrusu. Mají poikilitickou stavbu, obsahují inkluze živců s odmišeninami a křemene.

### *Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

Vyrostlice kyanitu jsou xeno-hypidiomorfní, někdy dvojčatí, zabírají asi 5% výbrusu. Velikost zrn se pohybuje okolo 1 mm. Místy obsahují inkluze křemene a rozpadají se na sillimanit, který je jehličkovitý a sleduje směr foliace v granulitu. Rozpadem kyanitu při reakci s draselným živcem vzniká retrográdní muskovit.



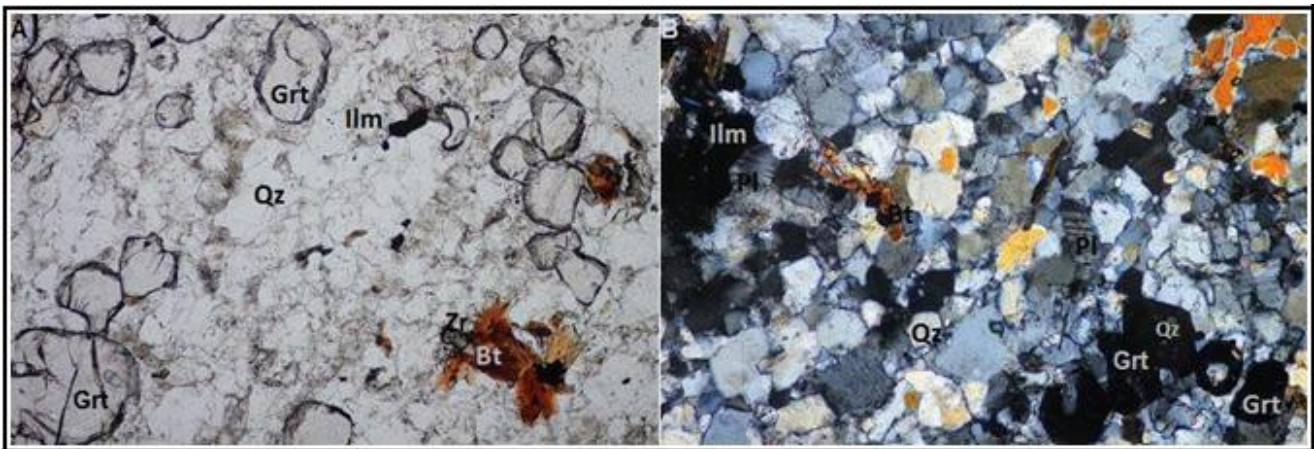
**Obr. 3.** A, B – zrna kyanitu v křemen-živcové matrix s inkluzí křemene a reakčním lemem tvořeným muskovitem; C – poikilitický granát s inkluzemi křemene, zrna kyanitu s muskovitickým lemem; D – reliktní zrna granátů, přechod kyanitu na sillimanit

## 2. skupina

Jsou to silně usměrněné horniny s granoblastickou strukturou s vyrostlicemi granátu. Matrix je tvořená zrny křemene a živců (Obr. 4 A,B). Původní ternární živec se zde zcela přeměnil na draselný živec a plagioklas, což nasvědčuje tomu, že tato skupina felsických granulitů je daleko více postížena retrogresí. Hojná je krystalizace biotitu a opakních minerálů, převážně rutilu a ilmenitu, které někde tvoří zrna o velikost až 2 mm.

Granát je zde opět zastoupen v podobě drobných reliktních xenomorfních zrn o velikosti do 1,5 mm. V těchto horninách, na rozdíl od 1. skupiny, zaujímá asi 15% výbrusu. Obsahuje inkluze živců s odmíšeninami a křemene.

Biotit většinou tvoří usměrněné pásy tabulovitých zrn a zabírá přibližně 20% výbrusu. Vyskytuje se jako samostatný minerál v matrix, nebo zatlačuje zrna granátů. Obsahuje inkluze zirkonů i apatitu, někdy rutilu. Vzácně je v některých výbrusech (F-57/8) patrná chloritizace.



**Obr. 4.** A, B – základní minerální složení druhé skupiny felsických granulitů: křemen, plagioklas, granát, biotit, ilmenit, zirkon

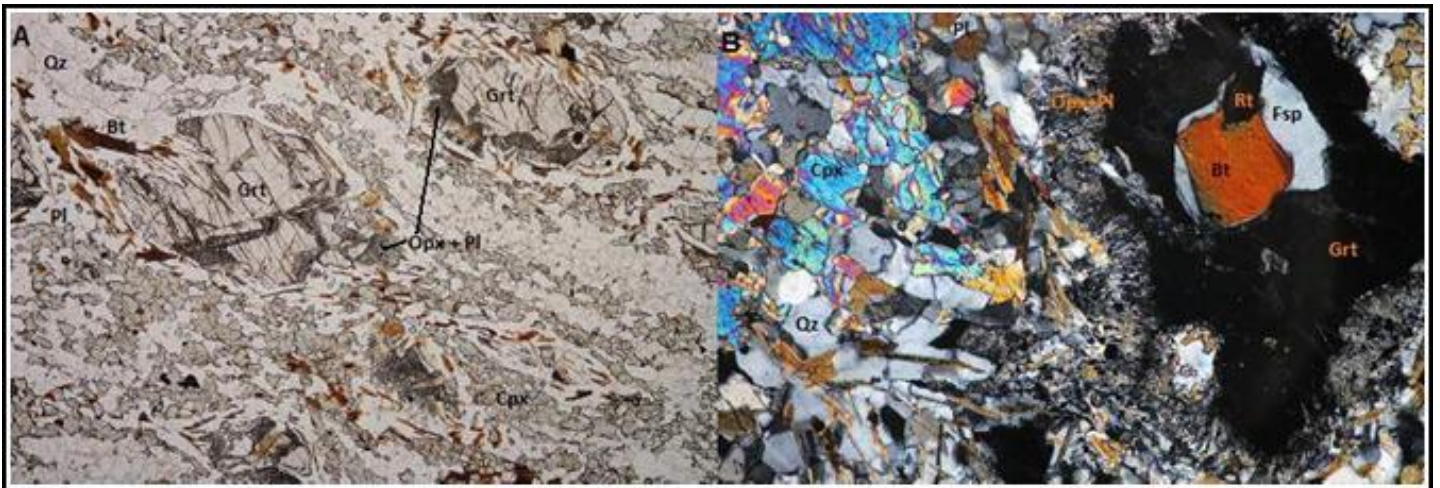
### 3.1.2. Mafické granulity

Minerální složení mafických granulitů je *grt, qz, kfs, pl, cpx, bt, opx, ap, zrn, rt, ilm*. Ke studiu jsem měla k dispozici 5 vzorků z lokality Holubov (Obr. 2; Příloha 2).

Hornina má lepidogranoblastickou strukturu s reliktními porfyroblasty granátů (Obr. 5 A,B). Je silně usměrněná. Matrix je jemnozrná až středně zrnitá tvořená křemenem, klinopyroxenem, draselným živcem a plagioklasem. Křemen má undulózní zhášení. Plagioklas má albitické lamelování. Často jsou přítomné živce s odmíšeninami pertitu a antipertitu. Hojně jsou zrna opakních minerálů různých velikostí. Jedná se převážně o rutil a ilmenit. Jsou zde přítomny v matrix, jako inkluze, nebo součást kelyfitických lemů. Občasný výskyt apatitových nebo zirkonových zrn.

Granát tvoří zrna o velikosti až 1 cm a bývá obklopen několikafázovými kelyfitickými lemy, které jsou tvořené symplektity ortopyroxenu a plagioklasu. Obsahuje inkluze křemene, draselného živce, opakních minerálů, rutilu a v jednom případě i inkluze omfacitu (výbrus č. H-232-2b). Podléhá biotitizaci.

Klinopyroxen (diopsid) je xenomorfní/hypidiomorfní, tvoří usměrněné pásy. Velikost zrn se pohybuje do 0,5 cm, mají slabě růžový/nazelenalý pleochroismus, tvoří asi 45% výbrusu. Může obsahovat odmíšeniny ortopyroxenu (výbrus č. H-149-2).



**Obr. 5.** A – minerály přítomné v mafických granulitech: granát, křemen, plagioklas, klinopyroxen, biotit, rutil, ilmenit, ortopyroxen. Kolem granátu jsou viditelné tlakové stíny, tvořené zrnky klinopyroxenu, křemene, plagioklasu a draselného živce; B – zrno granátu v matrix, která je tvořená křemenem, klinopyroxenem a plagioklasem, korona granátu je tvořena ortopyroxenem a plagioklasem. Viditelné jsou inkluze rutilu a živce s odmíšeninami mezopertitu

### **3.2. Granátické peridotity**

Základní minerální složení granátických peridotitů Blanského lesa je *srp*, *grt*, *ol*, *cpx*, *opx*. Pro mikroskopické studium jsem měla k dispozici 13 vzorků granátických peridotitů z lokalit Křemže, Smedeč a Lom pod Libínem (Obr. 2; Příloha 2).

Pro tyto horniny je charakteristická smyčkovitá struktura (Obr. 6 E,F), která je typická pro silně serpentinizované horniny a je definována ostrůvky původních olivínů a pyroxenů v síti serpentinitů. Matrix je jemnozrnná až středně zrnitá, různá je i míra serpentinizace. Vyskytují se porfyroblasty granátů.

Vyrostlice granátů mají velikost od 1 mm až po 1 cm. Jsou velmi kelyfitizované. V mnoha případech je vidět dvojitý, někdy až trojitý lem. Tyto lemy jsou tvořeny různými postupně vykrystalizovanými typy kelyfitů nebo drobnými symplektity pyroxenů nebo plagioklasů a křemene v kombinaci s kelyfitem. Kelyfitické lemy jsou tvořené  $opx \pm cpx + spl$  nebo  $hbl + spl$ . Tyto granáty mají poikilitickou stavbu. Mezi nejčastější inkluze patří zrna olivínu a pyroxeny. Inkluze ol a px v granátech mohou být hypidiomorfní až idiomorfní a bývají různou měrou kelyfitizované. Stejně jako u zrn granátů je i u inkluzí možné pozorovat několikafázový lem (Obr. 6 A-D). V některých inkluzích klinopyroxenů jsou viditelné drobné odmíšeniny, tvořené ortopyroxenem. Akcesoricky se vyskytují opakní minerály.



**Obr. 6.** A, B – kelyfitizované zrno granátu s inkluzemi serpentizovaných olivínů; C, D – detail serpentizované uzavřeniny olivínu v granátu, viditelný dvojitý lem (kelyfit, křemen + plagioklas); E, F - smyčkovitá struktura

## 4. Termobarometrie

### 4.1. Základní principy termobarometrie

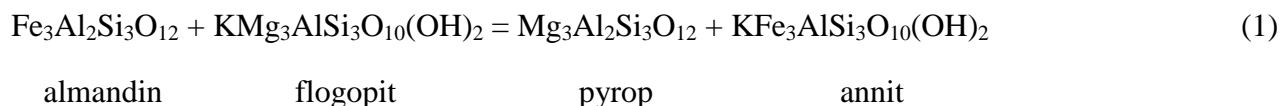
Termobarometrie je kvantitativní určení teplot a tlaků, za jakých metamorfované nebo vyvřelé horniny dosáhly chemické rovnováhy (Spear, 1993). Základem termobarometrie je tedy chemické složení minerálů/hornin, jež je funkcí teplot a tlaků, které na ně působí. Díky mnoha pokusům a pozorováním byly zjištěny změny, ke kterým dochází v chemickém složení látek za různých PT podmínek. Ze základních termodynamických rovnic rovnovážných reakcí pak snadno můžeme vypočítat působící veličiny – teploty a tlaky.

Pro získání správných výsledků se pro termobarometrii musí vybrat vhodné fáze. Z rovnice Gibbsovy energie  $\Delta G_{P,T} = \Delta H_{1,T} - T \cdot \Delta S_T + (P-1) \cdot \Delta V + R \cdot T \cdot \ln K = 0$  vyplývá, že pro výpočet rovnovážné teploty - *termometrii* jsou nejvhodnější takové fáze, které na změnu teploty reagují velkou změnou entropie, ale malou změnou objemu, na rozdíl od fází vhodných pro určení tlaků - *barometrii*, kdy zásadní roli při změně tlaku hraje velká změna objemu.

#### 4.1.1. Termometrie

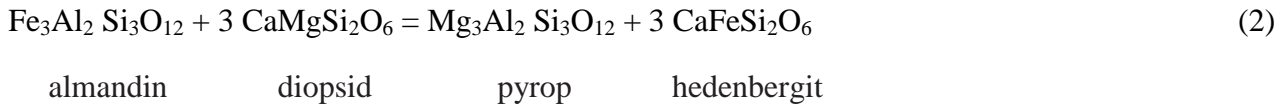
Termometrie je definována převážně reakcemi iontové výměny nebo na minerálech, které za vysokých teplot tvoří pevný roztok a při chladnutí se rozpadají na více nemísitelných fází.

Typickým příkladem výměny kationtů, které se často využívá pro pelitické horniny, je Fe-Mg substituce mezi granátem a biotitem řízená reakcí:

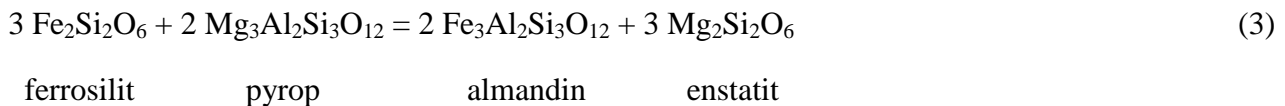


(Thompson, 1976; Ferry a Spear, 1978). Později byl granát-biotitový termometr upravený, aby dokázal zahrnout i vliv Ti v biotitu nebo Ca a Mn v granátu (Perchuk a Lavrentieva, 1983; Ganguly,

1996; Holdaway, 2000; Wu et al., 2007). Pro vysokometamorfované horniny se používá Fe-Mg substituce v systému grt-cpx:



(Ellis a Green, 1979; Powell, 1985; Krogh, 1988; Ganguly et al., 1996; Ravna, 2000). Dalším užívaným termometrem v těchto horninách je kalibrace systému grt-opx podle reakce:



(Harley, 1984; Brey a Köhler, 1990; Aranovich a Bermann, 1997). Často se využívá i grt-ol termometr (O'Neill a Wood, 1980).

Termometrie vysokoteplotních pevných roztoků je nejčastější ve felsických granulitech, kde se používá původních hypersolvních ternárních živců (teď v podobě odmišenin mezopertitu), u kterých dochází k výměně K a Na mezi koexistujícím plagioklasem a alkalickým živcem (Whitney a Stormer, 1977; Powell a Powell, 1977a; Brown a Parsons, 1981, 1985). Pro granátické peridotity je vhodný termometr na bázi kalibrace dvou pyroxenů:

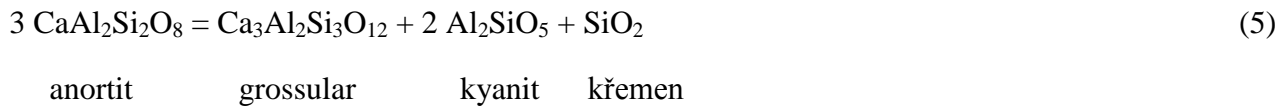


(Bertrand a Mercier, 1985; Brey a Köhler, 1990; Taylor, 1998).

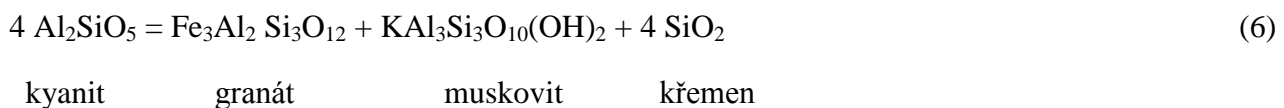
#### **4.1.2. Barometrie**

Barometrie je založena na net-transfer reakcích, kdy jedna komponenta chemického systému zaniká za vzniku jiných nebo naopak, za stálého chemického složení. Příkladem vhodným pro

granulity může být rozpad plagioklasu za vzniku granátu, alumosilikátu a silikátu, neboli GASP systém:



(Newton a Haselton, 1981; Hodges a Spear, 1982). Vhodný je také tzv. GRIPS barometr, tedy systém grt, rt, ilm, pl, qz (Bohlen a Liotta, 1986). Dále se může použít barometr na bázi rozkladu kyanitu za vzniku granátu, muskovitu a křemene:



(Hodges a Crowley, 1985; Hoisch, 1991). Pro mafické granulity lze použít minerální asociaci grt, pl, cpx, qz (Newton a Perkins, 1982; Powell a Holland, 1988). V HP/UHP horninách, které obsahují granát a/nebo spinel lze použít komplexní reakce mezi grt/spl, ol, cpx a opx (Newton, 1983; Faulhaber a Raith, 1991). Nimis a Taylor (2000) vytvořili další barometr založený na Cr výměně mezi klinopyroxenem a granátem.

Jiné barometry mohou být založené na určení množství daného kationtu v minerálu, který koexistuje s jinými minerály. Například růst obsahu Si ve fengitu, který je v asociaci s biotitem a K-živcem (Massonne a Schreyer, 1978). Pro granátické peridotity a další UHP horniny je často využívaný obsah Al v ortopyroxenu (Brey a Köhler, 1990) nebo růst Si v granátu (Scambelluri et al., 2008; Liou et al., 2009).

Mezi jednoznačné indikátory tlaků nebo teplot patří i indexové minerály, které se používají nejenom pro definování jednotlivých metamorfních zón barrovianského typu nebo pro určení metamorfních facií, ale i pro určení vysoko- až ultravysokotlakých hornin. Takovými indikátory UHP podmínek jsou například modifikace SiO<sub>2</sub>, jako je coesit nebo stišovit nebo transformace grafitu na diamant.

### **4.1.3. Používané počítačové programy**

V současnosti se v metamorfní petrologii využívá celá řada počítačových programů, specializovaných na výpočet PT drah, kterými hornina prošla. Jedním z takových programů je PERPLEX (Connolly a Kerrick, 1987; Connolly, 1990) - soubor aplikací pro výpočet a zobrazení fázových diagramů, fázových rovnováh a termodynamických dat. Pracuje na bázi dvou hlavních databází – termodynamické a na databázi modelů aktivit. Je vhodný pro projekce, termobarometrii a pseudosekci (druh fázového diagramu, který znázorňuje pole stability pro různé rovnovážné minerální asociace). Dalším programem je THERMOCALC (Powell a Holland, 1988) - výpočetní program pro termobarometrii využívající konzistentní termodynamickou databázi (Powell a Holland 1988). Je schopný provádět složité termodynamické výpočty a s vysokou rychlostí vypočítávat PT podmínky a PT dráhy ze zadaných vstupních dat, včetně pseudosekce.

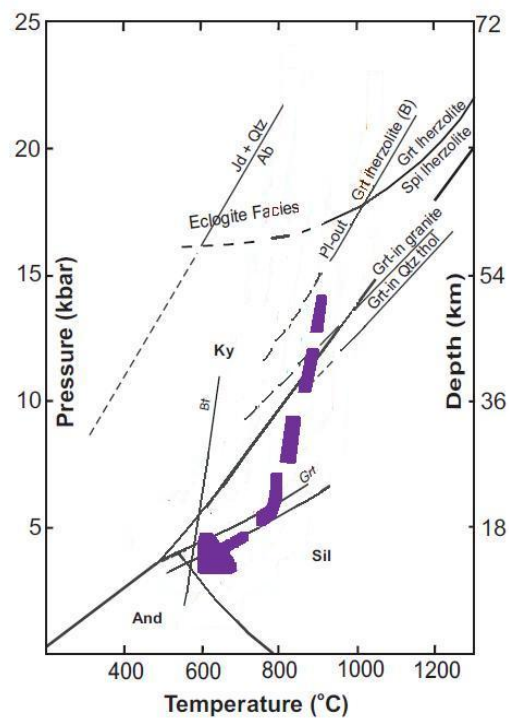
## **4.2. Termobarometrie hornin Blanského lesa**

### **4.2.1. Granulity**

První odhadované PT podmínky kolem 11 kbar a 760°C byly pro jihočeské granulity získány z experimentálních dat (Scharbert a Kurat, 1974). Později, Pin a Vielzeuf (1988) použili GASP barometr a vypočítali tlak téměř 14 kbar při teplotě 800°C. V dalších letech byla pro přesnější měření teplot prováděna převážně kalibrace metamorfního ternárního živce. Štípská a Powell (2005) publikovali studii, ve které se pomocí pseudosekce snažili určit magmatický nebo metamorfní původ ternárního živce v mafických granulitech a zjistit tak, zda je termometrie založená na ternárních živcích optimálním řešením. V jejich práci se předpokládá magmatický původ těchto živců (Obr. 8A) a termometrická data získaná jejich analýzou označují za zkreslená. Nevhodné je i použití termometru na bázi Fe-Mg výměny kvůli reequilibraci minerálů při chladnutí (Fitzsimmons and Harley, 1994; Pattison and Begin, 1994).

Vrána (1989, 1992) provedl jedny z prvních měření přímo v Blanském lese. Vypočítané tlaky pro HP metamorfózu felsických granulitů byly 11,5–12,5 kbar při 900-950°C. Pro LP stádium byly

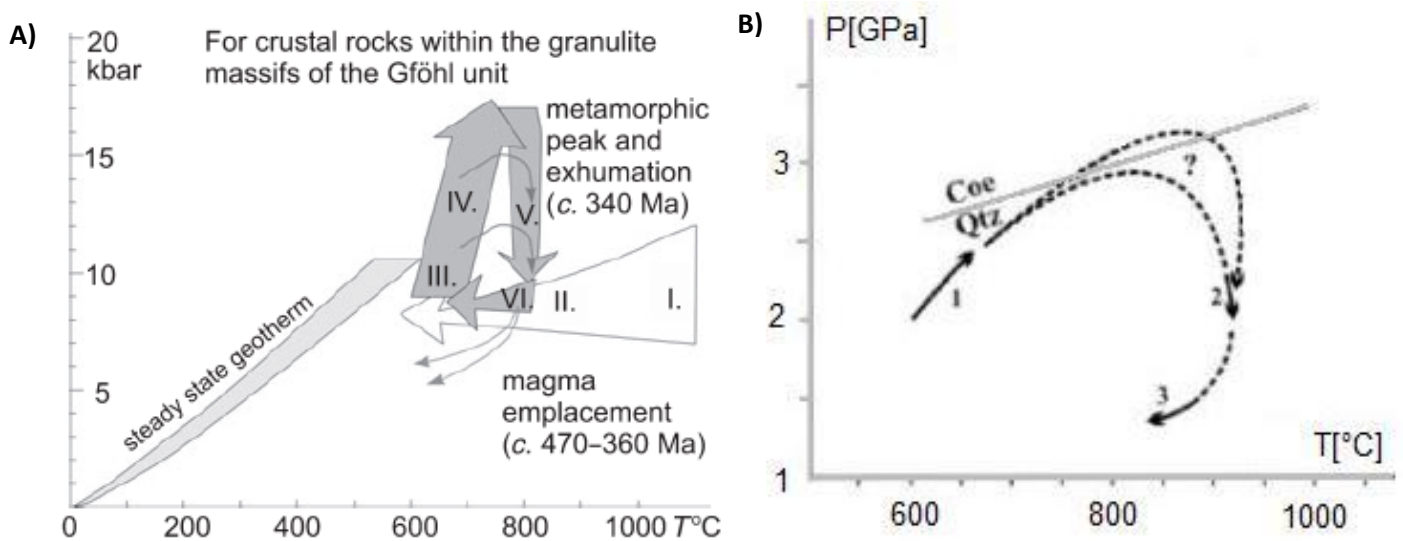
zjištěny tlaky 2-3 kbar při 750°C (Obr. 7). Kotková a Harley (1999) vypočítali pro vysokotlaké stádium tlaky 14 kbar za teploty 940°C. V témže roce byla publikována i data získaná O'Brienem, který zjistil PT až 18 kbar/1000°C pro vysokotlakou metamorfózu, a více jak 7 kbar/nad 750°C pro střednětlakou metamorfózu. V roce 2000 byla Krönerem publikována měření z prachatického granulitového masivu, který může být svojí litologií srovnáván s Blanským lesem. Pro HP stádium byly vypočítány PT podmínky 18 kbar/nad 1000°C, pro MP stádium byly vypočítány teploty 750-850°C, pro LP stádium metamorfózy byly zjištěny tlaky 3-4 kbar při teplotě 700°C (souhrn P a T viz Příloha 3).



**Obr. 7.** PT dráha granulitů jihočeského masivu (převzato: Vrána, 1992b).

Pro mafické granulity Owen a Dostal (1996) vypočítali PT podmínky 14 kbar/900°C pro HP stádium. Kröner et al. (2000) získali hodnoty 16-17 kbar při 970-1000°C pro HP metamorfózu a 6 kbar/600-700°C pro střednětlakou metamorfózu. Vrcholné metamorfózní tlaky a teploty pro původní magmatické horniny jsou odhadované na 17 kbar a 750°C (Faryad et al., 2010). Na základě

přítomnosti inkluze omfacitu v mafických granulitech a prográdní zonálnosti granátů ve felsických granulitech se předpokládá vznik granulitů prográdní metamorfózou do eklogitové facie blízko UHP podmínek a jejich následná reequilibrace v granulitové facii (Obr. 8B). Ve felsických granulitech saxothuringika, které jsou korelovatelné s granulity z moldanubické oblasti, byly také objeveny mikrodiamanty svědčící o tlacích až 60 kbar při 1200°C (Kotková et al., 2011; souhrn P a T viz Příloha 3).



**Obr. 8.** A - PT dráha navržená pro granulitové masivy moldanubika (převzato: Štípská a Powell, 2005); I – intruze a krystalizace magmatu, II – chladnutí, III – prográdní fáze, IV – peaková metamorfóza, V – dekomprese, VI – chladnutí; B - souhrn PT podmínek a interpretovaných PT drah pro granulity moldanubika (převzato: Faryad et al., 2010); 1,2 – pole stability a rozpadových reakcí fází uzavřených v granátu; 3 – průsečík izopleť složení blízkého okrajům granátu

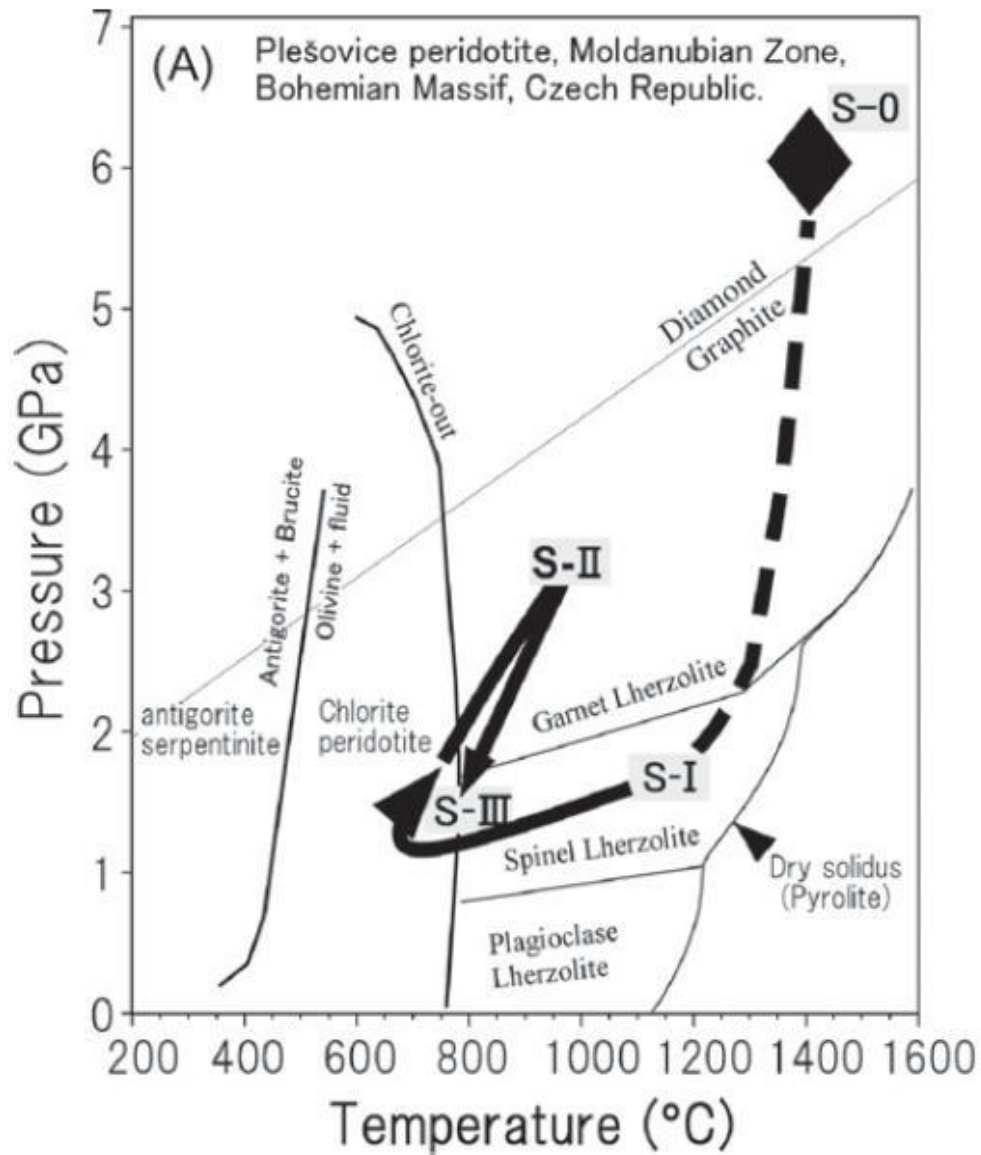
#### 4.2.2. Granátické peridotity

Mezi jedny z nejvýznamnějších lokalit granátických peridotitů v Blanském lese patří Plešovický lom, Hamry, Holubov a Lom pod Libínem (prachatický masiv).

Pro termobarometrické výpočty peridotitů (Medaris et al., 2005) v Lomu pod Libínem a v Hamrech byl použit ol-grt termometr (O'Neill a Wood, 1979; O'Neill, 1980) a barometr na bázi určení obsahu Al v ortopyroxenu (Brey a Köhler, 1990). Pro peridotit z Lomu pod Libínem byly

vypočítány tlaky 25,4 kbar a teploty 1015°C. Spinelový peridotit z lokality Hamry obsahuje Cr-bohatý spinel, který je stabilní za podmínek 40 kbar a 1250°C (O'Neill, 1981). PT podmínky vypočítané Medarisem et al. (2005) se s tímto předpokladem přibližně shodují. Hodnoty teplot a tlaků získané pro tento peridotit jsou 1245°C a 44,3 kbar.

V plešovickém peridotitu (a znovu i v Hamrech) byla pro zjištění PT hodnot použita následující sada termobarometrů (Naemura, 2009): opx-cpx termometr (Taylor, 1998), grt-cpx termometr (Ravna, 2000), grt-ol termometr (O'Neill a Wood, 1979), grt-opx termometr (Harley, 1984), grt-opx barometr (Nickel a Green, 1985; Brey a Köhler, 1990), grt-cpx barometr (Nimis a Taylor, 2000) a spl-barometr (O'Neill, 1981). Naemura et al. (2009) definují tělesa peridotitů v Blanském lese jako výsledek čtyřfázového vývoje (Obr. 9). Nejdříve se v LP/HT režimu formoval spl-peridotit (1). Minimální teploty ( $T \sim 1020 \pm 15^\circ\text{C}$ ) byly získány pomocí opx-termometru (Witt-Eickshen a Seck, 1991). Poté se hornina dostala do peakových MP/MT podmínek (2). Získané hodnoty P a T se od sebe liší v závislosti na použitých termobarometrech. Pro termometry grt-ol a grt-opx vycházejí teploty  $\sim 1130\text{-}1210^\circ\text{C}$  za tlaků okolo 41 kbar. Pro ostatní metody vycházejí  $T \sim 940^\circ\text{C}$  a  $P \sim 30$  kbar. Jak bylo dříve dokázáno (Nimis a Trommsdorff, 2001; Brey a Köhler, 1990), termometry grt-ol a grt-opx vykazují určité odchylky od skutečných teplot. Je tedy pravděpodobnější, že druhá fáze probíhala za vypočítaných nižších teplot i tlaků. Hornina dále prodělala chladnutí a výzdvih do nižších hloubek (3). Za použití termometrie dvou pyroxenů byly vypočítány  $T = 730\text{-}770^\circ\text{C}$  při 8-15 kbar. Posledním stádiem byla fáze serpentinizace za  $T = 630^\circ\text{C}$  a  $P = 10$  kbar (4). Nově, Naemura et al. (2011) našli inkluze grafitických uhlíků ve spinelech, olivínech, granátech i v jejich kelyfitických lemech, které nejpravděpodobněji vznikly transformací z diamantu. Na základě tohoto objevu se předpokládá, že před dosud nejstarší rozeznanou minerální asociací (stádium 1/2 – HP spinel + granátický peridotit) se plešovický peridotit vyskytoval v ultrahlubokých podmínkách odpovídajících poli stability diamantu (Obr. 9, stádium 0). Tuto teorii potvrzuje i nalezené exsoluční lamelování pyroxenu (Naemura et al., 2011; souhrn P a T viz Příloha 3).



**Obr. 9.** PT dráha granátických peridotitů (převzato: Naemura et al., 2011): S-0 – fáze plášťového diapiru, S-I – spinelový peridotit, S-II – spinel-granátický peridotit, S-III – fáze kelyfitizace

## **5. Závěr**

Ultramafické horniny vyskytující se v granulitovém masivu Blanského lesa tvoří izolovaná tělesa podél východního a jižního okraje, široký SZ-JV pás v centrální části, a čočky prostorově spjaté s granulity a retrográdními eklogity blízko severozápadní hranice masivu. Výskyt UHP hornin pouze v granulitech svědčí o tom, že tyto dva horninové typy mají společnou prodělanou dráhu delší, než mají granulity s horninami monotónní a pestré skupiny. Předpokládá se, že svrchnoplášťové horniny se do dnešní geotektonické pozice dostaly během ztlušťování kůry při kontinentální kolizi.

Z petrografické charakteristiky je patrné, že všechny typy studovaných hornin jsou silně reequilibrované. Pro felsické granulity byly zjištěny PT podmínky HP metamorfózy odpovídající přechodu mezi granulitovou a eklogitovou facií, do této pozice se však dostaly prográdní metamorfózou z eklogitové facie (podle nálezů inkluzí v granátech). Vysokoteplotní stádium opět potvrzují nálezy inkluzí původních ternárních živců. Vykrytalizovaná zrna kyanitů korespondují s odhadovanými vysokými tlaky. Při dekompresi a chladnutí se tyto horniny dostaly až na pomezí granulitové a amfibolitové facie. O poklesu tlaku svědčí i přechod kyanitu na sillimanit. Při dalším chladnutí došlo k rozpadu ternárních živců na zrna plagioklasů a draselných živců, granát se rozpadal na biotit a z kyanitu vznikala muskovit a křemen.

Ze studia reliktních minerálů (inkluze omfacitů v granátech) vyplývá, že mafické granulity prodělaly metamorfózu v podmínkách eklogitové facie. Dosažení vysokoteplotních podmínek potvrzuje i přítomnost inkluzí živců s odmíšeninami antipertitu, které vznikly rozpadem původních ternárních živců. Tato fáze byla následována dekompresí do granulitové facie. Došlo k rozpadu omfacitu a vzniku symplektitů cpx a pl. S dalším poklesem tlaku docházelo k rozpadání grt na symplektity opx a pl. V posledním stádiu hornina chladla až do podmínek facie amfibolitové. Tato fáze je definována například zatlačováním granátu biotitem.

Granátické peridotity jsou silně serpentinizované a na základě texturních vztahů viditelných pod mikroskopem se jen těžko určuje jejich metamorfni vývoj. Podle studia inkluzí v granátech bylo zjištěno, že k jejich krystalizaci došlo pravděpodobně během subdukce před nebo spolu s

## *Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

okolními granulity. Není však jasný původ mikrodiamantů, jejichž vznik se dává do souvislosti s plášťovým diapirem před procesem subdukce.

Výsledky termobarometrických výpočtů pro horniny Blanského lesa se pohybují v širším rozmezí teplot i tlaků. Rozdíly v získaných datech a v jejich interpretaci jsou dány různými fázemi vybranými pro kalibraci systému i samotnými metodami, které byly pro tyto výpočty použity. V mé další práci se budu detailněji věnovat petrologické charakteristice hornin, a na jejím základě se budu snažit vybrat ty nejvhodnější termobarometrické rovnice pro výpočet vrcholových PT podmínek a pro zjištění PT dráhy, kterou tyto horniny prošly. Vypočítané teploty a tlaky poté budou porovnány s dosud získanými údaji. Pokud to bude možné, další snahou bude potvrdit nebo vyvrátit přítomnost grafitických uhlíků, případně dešifrovat jejich původ a vznik a určit, zda jsou opravdu pozůstatkem mikrodiamantů.

## 6. Literatura

- Aranovich, L.Y., Berman, R.G., 1997. A new orthopyroxene-garnet thermometer based on reversed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  solubilities in orthopyroxene in the FeO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  system. *American Mineralogist* 82, 345-353.
- Berman, R.G., Aranovich, L.Y., Pattison, D.R.M., 1995. Reassessment of the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer: II. Thermodynamic analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119, 30-42.
- Bertrand, P., Mercier, J.C.C., 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth and Planetary Science Letters* 76, 109-122.
- Bohlen, S.R., Liotta, J.J., 1986. A barometer for garnet-amphibolites and garnet-granulites. *Journal of Petrology* 27, 1025-1034.
- Brey, G.P., Köhler, T., 1990. Geothermobarometry in four-phase lherzolites: II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology* 31, 1352-1378.
- Brown, W.L., Parsons, I., 1981. Towards a more practical two feldspar geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 76, 369-377.
- Carswell, D.A., Jamtveit, 1990. Variscan Sm-Nd ages for the high-pressure metamorphism in the Moldanubian zone of the Bohemian Massif, Lower Austria. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen* 162, 69-78.
- Connolly, J.A.D., 1990. Multivariable phase diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics (4 Mb). *American Journal of Science* 290, 666-718.
- Connolly, J.A.D., Kerrick, D.M., 1987. An algorithm and computer program for calculating composition phase diagrams. *CALPHAD* 11, 1-55.
- Ellis, D.S., Green, D.H., 1979. An experimental study on the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 71, 13-22.
- Faryad, S.W., 2009. The Kutná Hora complex (Moldanubian zone, Bohemian Massif): A composite of crustal and mantle rocks subducted to HP/UHP conditions. *Lithos* 109, 193-208.
- Faryad, S.W., Nahodilová, R., Dolejš, D., 2010. Incipient eclogite facies metamorphism in the Moldanubian granulites revealed by mineral inclusions in garnet. *Lithos* 114, 54-69.
- Faulhaber, S., Raith, M., 1991. Geothermometry and geobarometry of high-grade rocks: a case study on garnet-pyroxene granulites in southern Sri Lanka. *Mineralogical Magazine* 55, 33-56.
- Ferry, J.M., Spear, F.S., 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 66 (2), 113-117.

*Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Fiala, J., Matějovská, O., Vaňková, V., 1987. Moldanubian granulites and related rocks: petrology, geochemistry, and radioactivity. *Rozpr Česk Akad Věd Mat Nat Sci Ser* 97, 1–102.
- Fitzsimmons, L.C.W., Harley, S.L., 1994. The influence of retrograde cation exchange on granulite *P-T* estimates and a convergence technique for the recovery of peak metamorphic conditions. *Journal of Petrology* 35, 543–576.
- Franěk, J., Schulmann, K., Lexa, O., Ulrich, S., 2003. Exhumation of the Blanský Les Granulite Massif as a result of oblique thrusting and crustal-scale buckling. In Svojtka M: *Geolines – Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic. Praha. ISBN 1210-9606.*
- Franěk, J., Schulmann, K., Lexa, O., 2006. Kinematic and rheological model of exhumation of high pressure granulites in the Variscan orogenic root: example of the Blanský les granulite, Bohemian Massif, Czech Republic. *Mineralogy and Petrology* 86, 253–276.
- Franke, W., 1989. Variscan plate tectonics in Central Europe - current ideas and open questions. *Tectonophysics* 169, 221–228.
- Franke, W., 2000. The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and kinematic evolution. In: Franke, W., Haak, V., Oncken, O., Tanner, D. (eds) *Orogenic processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. Geological Society, London, Special Publications* 179, 35–63.
- Friedl, G., Cooke, R., Finger, F., McNaughton, N.J., Fletcher, A., 2003. U–Pb SHRIMP dating and trace element investigations on multiple zoned zircons from a South-Bohemian granulite. *Journal of the Czech Geological Society* 48, 51–52.
- Ganguly, J., Cheng, W.J., Tirone, M., 1996. Thermodynamics of aluminosilicate garnet solid solution: new experimental data, an optimized model, and thermometric applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 126, 137–151.
- Harley, S.L., 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 359–373.
- Hodges, K.V., Spear, F.S., 1982. Geothermometry, geobarometry and the AlSiO<sub>5</sub>, triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *American Mineralogist* 6, 7, 1118–1134.
- Hodges, K.V., Crowley, P.D., 1985. Error estimation and empirical geothermobarometry for pelitic systems. *American Mineralogist* 70, 702–709.
- Hoisch, T.D., 1991, Equilibria within the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet, and implications for the mixing properties of octahedrally-coordinated cations in muscovite and biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 108, 43–54.
- Holdaway, M.J., 2000. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet–biotite geothermometer. *American Mineralogist* 85, 881–892.
- Jakeš, P., 1997. Melting in high-P region – case of Bohemian granulites. *Acta Universitatis Carolinae: Geologica* 41, 113–125.

## *Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Janoušek, V., Finger, F., Frýda, J., Pin, C., Dolejš, D., 2004. Deciphering the petrogenesis of deeply buried granites: whole-rock geochemical constraints on the origin of largely undepleted felsic granulites from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences* 95, 141-159.
- Janoušek, V., Holub, F., 2007. The causal link between HP-HT metamorphism and ultrapotassic magmatism in collisional orogens: case study from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Proceedings of the Geologists Association* 118, 75-86.
- Kachlík, V., 2003. Geologický vývoj území České republiky. *Ústav geologie a paleontologie, PřF UK a Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), Praha*, 1-64.
- Kodym, O., 1972. Multiphase deformation of the Blanský les Granulite Massif (southern Bohemia). *Krystalinikum* 9, 91-105.
- Kodym, O., Jakeš, P., Schovánek, P., 1978. Granulite und ultramafische Gesteine aus der Strukturbohrung Holubov. *Sborník geologických Věd, Geologie* 32, 7-47.
- Kossmat, F., 1927. Gliederung des varistischen Gebirgsbaues. *Abhandl Sächs Geol Landesamts* 1, 1-39.
- Kotková, J., Harley, S.L., 1999. Formation and evolution of high-pressure leucogranulites: Experimental constraints and unresolved issues. *Physics and Chemistry of the Earth Part a-Solid Earth and Geodesy* 24(3), 299-304.
- Kotková, J., O'Brien, P.J., Ziemann, M.A., 2011. Diamond and coesite discovered in Saxony-type granulite: Solution to the Variscan garnet peridotite enigma. *Geology, Boulder, Spojené státy*. ISSN 0091-7613.
- Krogh, E.J., 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer: a reinterpretation of existing experimental data. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99, 44-48.
- Krogh Ravana, E.J., 2000. The garnet-clinopyroxene Fe<sup>2+</sup>-Mg geothermometer: an updated calibration. *Journal of Metamorphic Geology* 18, 211-219.
- Kröner, A., Wendt, I., Liew, T.C., Compston, W., Todt, W., Fiala, J., Vaňková, V., Vaněk, J., 1988. U-Pb zircon and Sm-Nd model ages of high-grade Moldanubian metasediments, Bohemian Massif, Czechoslovakia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99, 257-266.
- Kröner, A., O'Brien, P.J., Nemchin, A.A., Pidgeon, R.T., 2000. Zircon ages for high pressure granulites from South Bohemia, Czech Republic, and their connection to Carboniferous high temperature processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 138, 127-142.
- Liou, J.G., Ernst, W.G., Zhang, R.Y., Tsujimori, T., Jahn, B.M., 2009. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes - The view from China. *Journal of Asian Earth Sciences* 35, 199-231.
- Massonne, H.J., Mirwald, P.W., Schreyer, W., 1978. Experimentelle Überprüfung der Reaktionskurve Chlorit + Quartz <=> Talk + Disthen im System MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Fortschritte der Mineralogie* 57, 122-123.

*Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Matte, P., 1986. Tectonics and plate tectonics model for the Variscan belt of Europe. *Tectonophysics* 126, 329-332, 335-344, 347-374.
- Medaris Jr., L.G., Beard, B.L., Johnson, C.M., Valley, J.W., Spicuzza, M.J., Jelínek, E., Mísař, Z., 1994. Geochemistry of peridotites, pyroxenites, and eclogites in the Gföhl nappe: constraints on Variscan evolution of lithosphere and asthenosphere in the Bohemian Massif. *Journal of the Czech Geological Society* 39, 69.
- Medaris Jr., L.G., Wang, H.F., Jelinek, E., Jakes, P., 2003. Garnet peridotite in the Moldanubian zone in the Czech Republic—a heat source for Variscan metamorphism? *Journal of the Czech Geological Society* 48, 92-93.
- Medaris Jr., L.G., Wang, H.F., Jelinek, E., Mihaljevic, M., Jakes, P., 2005. Characteristics and origins of diverse Variscan peridotites in the Gföhl Nappe, Bohemian Massif, Czech Republic. *Lithos* 82, 1-23.
- Naemura, K., Hirajima, T., Svojtka, K., 2009. The pressure-temperature path and the origin of phlogopite in spinel-garnet peridotites from the Blanský Les Massif of the Moldanubian Zone, Czech Republic. *Journal of Petrology* 50, 1795-1827.
- Naemura, K., Ikuta, D., Kagi, H., Odake, S., Uyeda, T., Ohi, S., Kobayashi, T., Svojtka, M., Hirajima, T., 2011. Diamond and other possible ultra-deep evidence discovered in the orogenic spinel-garnet peridotite from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif, Czech Republic. In "Ultrahigh-Pressure Metamorphism: 25 Years After the Discovery of Coesite and Diamond" Eds: L. Dobrzhinetskaya, S.W. Faryad, S. Wallis and S. Cuthbert, 77-111, Elsevier insights.
- Nakamura, D., Svojtka, M., Naemura, K., 2004. Very high-pressure (N4 GPa) eclogite associated with the Moldanubian Zone garnet peridotite (Nové Dvory, Czech Republic). *Journal of Metamorphic Geology* 22, 593-603.
- Newton, R.C., 1983. Geobarometry of high-grade metamorphic rocks. *American Journal of Science* 283-A, 1-28.
- Newton, R.C., Haselton, H.T., 1981. Thermodynamics of the garnet-plagioclase-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>-quartz geobarometer. In: Newton, R.C., Navrotsky, A., Wood, B.J. (eds) - Thermodynamics of Minerals and Melts. *Springer-Verlag, New York*, 131-147.
- Newton, R.C., Perkins, D., III, 1982. Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *American Mineralogist* 67, 203-222.
- Nickel, K.G., Green, D.H., 1985. Empirical geothermometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth and Planetary Science Letters* 73, 158-170.
- Nimis, P., Taylor, W.R., 2000. Single-clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139, 541-554.

*Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Nimis, P., Trommsdorff, V., 2001a. Revised thermobarometry of Alpe Arami and other garnet peridotites from the Central Alps. *Journal of Petrology* 42, 103–115.
- Nimis, P., Trommsdorff, V., 2001b. Comment to “New constraints on the P–T evolution of the Alpe Arami garnet peridotite body (Central Alps, Switzerland)” by Paquin and Altherr (2001). *Journal of Petrology* 42, 1773–1779.
- O’Brien, P.J., Vrána, S., 1995. Eclogites with a short-lived granulite facies overprint in the Moldanubian Zone, Czech Republic: petrology, geochemistry and diffusion modelling of garnet zoning. *Geologische Rundschau* 84, 473–488.
- O’Neill, H.St.C., 1980. An experimental study of Fe–Mg partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer: corrections. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 72, 337.
- O’Neill, H.St.C., 1981. The transition between spinel lherzolite and garnet lherzolite, and its use as a geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 77, 185–194.
- O’Neill, H.St.C., Wood, B.J., 1979. An experimental study of Fe–Mg partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70, 59–70.
- Owen, J.V., Dostal, J., 1996a. Contrasting corona structures in mafic granulite from the Blanský Les complex, Bohemian Massif, Czech Republic. *Canadian Mineralogist* 34, 959–966.
- Owen, J.V., Dostal, J., 1996b. Prograde metamorphism and decompression of the Gföhl gneiss, Czech Republic. *Lithos* 38, 259–270.
- Pattison, D.R.M., 1994. Are reversed Fe–Mg exchange and solid solution experiments really reversed? *American Mineralogist* 79, 938–950.
- Perchuk, L.L., Lavrentieva, I.V., 1983. Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In: Saxena SK (ed) *Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*. Springer-Verlag, Berlin, 199–239.
- Pin, C., Vielzeuf, D., 1988. Les granulites de haute-pression d’Europe moyenne temoins d’une subduction eo-hercynienne; implications sur l’origine des groupes leptyno-amphibolique. *Bulletin De La Société Géologique De France* 13–20.
- Powell, M., Powell, R., 1977. Plagioclase-alkali-feldspar geothermometry revisited. *Mineralogical Magazine* 41, 253–256.
- Powell, R., 1985. Regression diagnostic and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet–clinopyroxene geothermometer revisited. *Journal of Metamorphic Geology* 3, 231–243.
- Powell, R., Holland, T.J.B., 1988. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations; 3, Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology* 6, 173–204.

## *Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Racek, M., Štípská, P., Pitra, P., Schulmann, K., Lexa, O., 2006. Metamorphic record of burial and exhumation of orogenic lower and middle crust: a new tectonothermal model for the Drosendorf window (Bohemian Massif, Austria). *Mineralogy and Petrology* 86, 221–251.
- Scambelluri, M., Pettke, T., Roermund, H.L.M., 2008. Majoritic garnets monitor deep subduction fluid flow and mantle dynamics. *Geology* 36, 59–62.
- Scharbert, H.G., Kurat, G., 1974. Distribution of some elements between coexisting ferromagnesian minerals in Moldanubian granulite facies rocks, Lower Austria, Austria. *Tschermaks Mineral Petrogr Mitt* 42, 110–134.
- Schulmann, K., 2009. Mechanics of Variscan Orogeny: A modern view on orogenic research. *Comptes Rendus Geoscience* 341, 97–102.
- Schulmann, K., Kröner, A., Hegner, E., Wendt, I., Konopásek, J., Lexa, O., Štípská, P., 2005. Chronological constraints on the pre-orogenic history of deep-seated rocks along the eastern margin of the Variscan orogen, Bohemian Massif, Czech Republic. *American Journal of Science* 305, 407–448.
- Schulmann, K., Lexa, O., Štípská, P., Racek, M., Tajčmanová, L., Konopásek, J., Edel, J.-B., Peschler, A., Lehmann, J., 2008. Vertical extrusion and horizontal channel flow of orogenic lower crust: key exhumation mechanisms in large hot orogens? *Journal of Metamorphic Geology* 26, 273–297.
- Spear, F.S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths. *Mineralogical Society of America, Michigan*, 1–779.
- Štípská, P., Powell, R., 2005. Does ternary feldspar constrain the metamorphic conditions of high-grade meta-igneous rocks? Evidence from orthopyroxene granulites, Bohemian Massif. *Journal of Metamorphic Geology* 23, 627–647.
- Štípská, P., Pitra, P., Powell, R., 2006. Separate or shared metamorphic histories of eclogites and surrounding rocks? An example from the Bohemian Massif. *Journal of Metamorphic Geology* 24, 219–240.
- Suess, F.E., 1926. Intrusionstektonik und Wandertektonik im variszischen Grundgebirge. *Bornträger, Berlin*.
- Taylor, W.R., 1998. An experimental test of some geothermometer and geobarometer formulations for upper mantle peridotites with application to the termobarometry of fertile lherzolite and garnet websterite. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 172, 381–408.
- Thompson, A.B., 1976. Mineral reactions in pelitic rocks: II. Calculation of some P-T-X<sub>(Fe-Mg)</sub> phase relations. *American Journal of Science* 276, 425–454.
- Tollmann, A., 1982. Großräumiger variszischer Deckenbau im Moldanubikum und neue Gedanken zum Variszikum Europas. *Geotekt Forsch* 64, 1–91.
- Vrána, S., 1979. Polyphase shear folding and thrusting in the Moldanubicum of southern Bohemia. *Věst Ústř Úst Geol* 54, 75–86.

*Termobarometrie granátických peridotitů a okolních granulitů Blanského lesa*

- Vrána, S., 1989. Perpotassic granulites from southern Bohemia – a new rock type derived from partial melting of crustal rocks under upper mantle conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 103, 510–522.
- Vrána, S., 1992a. Lom pod Libínem – quarry. In Fiala, J., Fišera, M., Jelínek, E., Slabý, J., Vrána, S. (eds) - Excursion Guide, International workshop High-pressure Granulites – Lower Crustal Metamorphism, Rohanov, Czechoslovakia. *Czech Geological Survey, Prague*, 7–8.
- Vrána, S., 1992b. The Moldanubian Zone in southern Bohemia: Polyphase evolution of imbricated crustal and upper mantle segments. In: Kukul, Z. (eds) - *Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on the Bohemian Massif, Prague*, 331–335.
- Vrána, S., 1997. Geology and petrology of the Moldanubian Zone. Tectonics of the Moldanubian Zone. In: Vrána, S., Štědrá, V. (eds) - Geological Model of the Western Bohemia Related to the KTB Borehole in Germany. *Sborník Geologických Věd, Geologie* 47, 109–123.
- Wendt, J.I., Kröner, A., Fiala, J., Todt, W., 1994. U–Pb zircon and Sm–Nd dating of Moldanubian HP/HT granulites from south Bohemia, Czech Republic. *Journal of the Geological Society, London* 151, 83–90.
- Whitney, J.A., Stormer Jr., J.C., 1977. Two-feldspar geothermometry, geobarometry in mesozonal granitic intrusions: Three examples from the Piedmont of Georgia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 63, 51–U.
- Witt-Eickshen, G., Seck, H.A., 1991. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 106, 431–439.
- Wu, C.M., Zhao, G.C., 2007. A recalibration of the garnet–olivine geothermometer and a new geobarometer for garnet peridotites and garnet–olivine–plagioclase-bearing granulites. *Journal of Metamorphic Geology* 25, 497–505.

## 7. Přílohy

### 1. - Použité zkratky minerálů podle Whitney and Evans (2010):

<i>Ap</i>	apatit
<i>Bt</i>	biotit
<i>Cpx</i>	klinopyroxen
<i>Fsp</i>	živec
<i>Grt</i>	granát
<i>Hbl</i>	hornblend
<i>Ilm</i>	ilmenit
<i>Kfs</i>	K-živec
<i>Ky</i>	kyanit
<i>Ms</i>	muskovit
<i>Ol</i>	olivín
<i>Opx</i>	ortopyroxen
<i>Pl</i>	plagioklas
<i>Qz</i>	křemen
<i>Rt</i>	rutil
<i>Srp</i>	serpentin
<i>Sil</i>	sillimanit
<i>Spl</i>	spinel
<i>Srp</i>	serpentin
<i>Zrn</i>	zirkon

**2. - Seznam lokalit**

<b>Felsické granulity - 1. skupina</b>		<b>Felsické granulity 2. - skupina</b>	
<i>označení výbrusu</i>	<i>lokalita</i>	<i>označení výbrusu</i>	<i>lokalita</i>
8B Granulit Blanský les 1	Blanský les	H-250	Brloh
8B Granulit Blanský les 2	Blanský les	H-149/6	Křemže
8B Granulit Blanský les 3	Blanský les	F-50/8	Smedeč
8B Granulit Blanský les 4	Blanský les	F-51/8	Smedeč
8B Granulit Blanský les 5	Blanský les	F-54/8	Zrcadlová Huť
8B Granulit Blanský les 6	Blanský les	F-59/8	Lom pod Libínem
8B Granulit Blanský les 7	Blanský les	F-60/8	Lom pod Libínem
8B Granulit Blanský les 8	Blanský les	F-61/8	Lom pod Libínem
		F-67/8	Lom pod Libínem
		F-70/8	Lom pod Libínem
<b>Mafické granulity</b>		<b>Granátické peridotity</b>	
<i>označení výbrusu</i>	<i>lokalita</i>	<i>označení výbrusu</i>	<i>lokalita</i>
H-232a	Holubov	H-149-1a	Křemže
H-232b	Holubov	H-149-1b	Křemže
H-232-1	Holubov	H-149-2a	Křemže
H-232-2a	Holubov	H-149-2b	Křemže
H-232-2b	Holubov	H-149-3a	Křemže
		H-149-3b	Křemže
		H-149-4a	Křemže
		H-149-4b	Křemže
		H-149-5a	Křemže
		H-149-5b	Křemže
		F-48/8	Smedeč
		F-49/8	Smedeč
		F-65/8	Lom pod Libínem

**3. – Souhrn P a T pro granulity a granátické peridotity**

Granulity								
Lokalita	Typ granulitu	HP stádium		MP stádium		LP stádium		Reference
		P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)	P (kbar)	T (°C)	
<b>Blanský les</b>	F	11,5-12,5	900-950			2-3	750	Vrána (1989)
	F	14	940					Kotková and Harley (1999)
	F	18	1000	nad 7	nad 750			O' Brien (1999)
	M	14	900					Owen and Dostal (1996)
	M	16-17	970-1000	6	600-700			Kröner et al. (2000)
<b>Prachatický masiv</b>	F	18	nad 1000		750-850	3-4	700	Kröner et al. (2000)
Granátické peridotity								
Lokalita		P (kbar)	T (°C)		stádium vývoje		Reference	
<b>Lom pod Libínem</b>		25,4	1015				Medaris et al. (2005)	
<b>Hamry</b>		44,3	1245				Medaris et al. (2005)	
<b>Plešovický lom</b>		~ 60	~ 1390		0.		Naemura et al. (2011)	
			1020 ±15		I.		Naemura et al. (2011)	
		41	1130-1210		II.		Naemura et al. (2011)	
		30	940					
		8,0-15	730-770		III.		Naemura et al. (2011)	
	10	630		IV.		Naemura et al. (2011)		