

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta  
Ústav petrologie a strukturní geologie**

**Charles University in Prague, Faculty of Science  
Institute of Petrology and Structural Geology**

Doktorský studijní program:

Ph.D. study program:



Autoreferát disertační práce

Summary of the Ph.D. Thesis

Vznik kompoziční a texturní zonálnosti mělce uložených granitoidních těles

The Origin of Compositional and Textural Zoning of Shallow-Level Granitoid Plutons

**Jakub Trubač**

Školitel/Supervisor: Doc. Mgr. Vojtěch Janoušek, Ph.D.

Školitel-konzultant/Supervisor-consultant: Prof. Doc. Jiří Žák, Ph.D.

Praha, 2015



## **Osnova / Outline**

Abstract

Abstrakt

### **Chapters in English part of summary of the Ph.D. Thesis:**

1. Introduction
2. Aims of the study
3. Material and methods
4. Results and discussion
5. Conclusions

### **Kapitoly v české části autoreferátu:**

1. Úvod
2. Cíle práce
3. Materiál a metodika
4. Výsledky a diskuse
5. Závěry

### **References / Použitá literatura**

### **Curriculum vitae / Profesionální životopis**

### **Selected publications / Seznam publikací**

## Abstract

The principal goal of this thesis is to contribute to the research on formation of compositional and textural zoning in shallow-level plutons. Processes responsible for emplacement of individual plutons/pulses and the origin of compositional zoning in are addressed in a great detail, from the pluton-scale down to the micro-scale.

The main emphasis in the more focused part of this text is on a combination of various quantitative data sets from two well-selected plutons (the Říčany Pluton in the Central Bohemian Plutonic Complex and the Melechov Pluton in the Moldanubian Batholith). These detailed studies are supported by further research on the Štěnovice, Čistá and Ševětín plutons. In this way we cover the evolution of Variscan magmatism in the heart of Bohemian Massif in its entirety, from Late Devonian till Permian.

The thesis is based on combining field and structural studies (including the anisotropy of magnetic susceptibility, AMS), textural analysis, petrological, geochronological and geochemical methods with geophysical investigations. Mathematical approaches have been designed and applied to the interpretation of geochemical data, with potential applications to other igneous systems.

We strongly believe that only such comprehensive studies on well-selected case examples have a potential to provide a generally applicable, in-depth understanding of zoning origin, mechanisms of pluton construction, and melt sources/evolution in the composite magmatic systems.

### **The most important conclusions of the thesis are as follows:**

1. Using the case study of the Říčany Pluton, a new model for the origin of reverse zoning is proposed invoking a thermally-driven overturn of a deeper stratified magma chamber. Information about sources and geochemical evolution of highly fractionated nested granite pulses is reported and the behaviour of many trace elements in differentiation of the felsic granitic system is described. Lastly, a new mechanism of helicoidal magma flow is formulated on example of the Říčany Pluton.
2. Quantitatively characterized variations in magnetic fabric throughout the Melechov Pluton and the AMS-to-strain inversion method (SUSIE) are used to infer the strain distribution in the proposed Melechov diapir head. Data are compared with theoretical models for diapiric structures; the applicability of the SUSIE method for strain analysis in granite plutons is also discussed.
3. Much of the research effort was concerned with the regional tectonic setting and large-scale fabric patterns in granitoid plutons in the Bohemian Massif, from Late Devonian subduction, through Early Carboniferous collision till Permian orogenic collapse. Particular problems were addressed using case studies of subduction-related Štěnovice and Čistá plutons as well as the post-orogenic collapse-related Ševětín Pluton.

Taken together, the integration of field and quantitative data sets obtained by range of methods on several selected plutons has provided new insights into emplacement mechanisms of granitoid magma in the upper crust and the origin of modal/compositional zoning. Moreover, the study brings broader implications for timing, sources and development of Variscan plutonism in Bohemian Massif and as such to the magmatic and tectonic evolution of the Variscan orogen as a whole.

# Abstrakt

Základním cílem této Ph.D. práce je přispět k výzkumu formování kompoziční a texturní zonálnosti mělce uložených plutonů. Procesy vedoucí ke vzniku kompoziční zonálnosti v těchto tělesech jsou zde popisovány jak na úrovni měřítka celého magmatického tělesa (plutonu), tak z hlediska mikroměřítka.

Hlavní důraz v podrobnějších částech této práce je kladen na kombinaci různých kvantitativních souborů dat ze dvou dobře vybraných plutonů (říčanský pluton ve středočeském plutonickém komplexu a melechovský pluton v moldanubickém batolitu). Detailní studie jsou podpořeny dalším výzkumem plutonů štěnovického a ševětínského a plutonu Čistá. Uvedené příklady shrnují vývoj variského magmatismu přímo v srdci Českého masivu, od pozdního devonu do období permu.

Ph.D. práce je založena na kombinaci terénních a strukturních studií (včetně metody anizotropie magnetické susceptibility, AMS), texturní analýzy, petrologických, geochronologických a geochemických metod a geofyzikálních výzkumů. Dále byly navrženy a aplikovány matematické přístupy k interpretaci geochemických dat, s potenciálním využitím v ostatních magmatických systémech.

Pevně věřím, že tyto souhrnné studie na pečlivě vybraných příkladech mají potenciál poskytnout všeobecně užitečné a důkladné porozumění vzniku zonálnosti včetně mechanismů stavby plutonu a zdrojů/vývoje tavenin v kompozitních magmatických systémech.

## Nejdůležitější závěry této práce:

1. Na příkladu říčanského plutonu je navržen nový model vzniku reverzní zonálnosti vyvoláním termálně řízené změny v hlubokém stratifikovaném magmatickém krbu. Jsou zde zaznamenány informace o zdrojích a geochemickém vývoji vysoce frakcionovaných granitových pulsů a popsána distribuce mnoha stopových prvků během diferenciací felsického granitového systému. Dále je zde formulován nový mechanismus tzv. helikálního magmatického toku opět na příkladu říčanského plutonu.
2. Kvantitativně charakterizované variace v magnetické stavbě v melechovském plutonu a inverzní metoda AMS-to-strain (SUSIE) jsou použity k určení přírůstku napětí ve svrchních partiích granitového diapiru při finálním vmístění do podmínek střední kůry. Data jsou porovnána s teoretickými modely pro diapirické struktury; též je prodiskutována použitelnost metody SUSIE pro analýzu napětí v granitových plutonech.
3. Mnoho úsilí bylo věnováno výzkumu tektonického vývoje a strukturní analýze vnitřních staveb v granitoidních plutonech v Českém masivu. Tektonický vývoj je zaznamenán ve strukturách vzniklých během subdukce v pozdním devonu na příkladové studii štěnovického a čisteckého plutonu, v kolizní události v raném karbonu i v kolapsu orogénu v období permu (ševětínský pluton).

Souhrnně řečeno, spojení terénních a kvantitativních datových souborů získaných škálou metod na několika vybraných plutonech poskytlo nové pohledy na mechanismy vmístění granitoidního magmatu do podmínek svrchní kůry a na vznik modální/kompoziční zonálnosti. Dále Ph.D. teze přináší širší implikace pro vývoj variského plutonismu v Českém masivu a také pohled na magmatismus a tektonický vývoj variského orogénu jako celku.

# 1. Introduction

In any serious attempt to explain the nature and genesis of a complex zonation pattern in a granitic pluton, a multidisciplinary approach has to be used, combining structural, petrological, geochronological and geochemical methods with geochemical modelling and geophysical investigations.

An excellent setting where such a multidisciplinary approach could be developed and tested is the Bohemian Massif, the easternmost fragment of the Variscan collisional orogen in Europe. Among the numerous shallow-level granitoid plutons that intruded this complex unit in Late Devonian to Early Carboniferous times, were found the following two particularly suitable for the thesis:

1. The **Říčany Pluton**, which crops out at the north-eastern extremity of the Central Bohemian Plutonic Complex. It has a roughly elliptical outline and consists of three (muscovite)–biotite granite facies that define a sub-concentric compositional and textural zoning. Within the analytical uncertainties, the emplacement ages of the two main facies are the same (~337 Ma). As the degree of fractionation decreases inwards, the pluton shows reverse zoning. But it is “cryptic”, being reflected nearly exclusively in the trace-element compositions (see Results, **Article I.-1, Article I.-2, Article II.-2**).
2. The **Melechov Pluton** is the northernmost intrusion of the composite Moldanubian Batholith, which is the largest plutonic body in the Variscan Internides. The pluton consists of four concentrically arranged units of peraluminous, S-type granites. The TIMS-ID Concordia ages for Mnz populations of the three outer facies dated (Lipnice, Světlá, and Kouty) range between  $332 \pm 1$  and  $323 \pm 0.4$  Ma (mostly 327–325 Ma). This compares well with LA ICP-MS dating of the Lipnice Mnz ( $324.8 \pm 2.4$  Ma) and previous conventional U–Pb dating of Zrn and Mnz from the ‘Eisgarn’ granites (see Results, **Article II.-1**).

Even though most of our attention was directed to the two zoned plutons listed above, the results of other studies of Bohemian granitic bodies (e.g., Ševětín, Štěnovice and Čistá plutons) are discussed in separate **Articles III.-1, III.-2 and III.-3**.

---

The state-of-the-art knowledge about granitoid pluton/host-rock structures, geochemical variation and physico-chemical processes are addressed below.

Igneous rocks, formed by crystallization of magma that has risen from the planet’s interior, are the most abundant rock types in the Earth’s crust. As the magma ascends and begins to cool, it becomes a mixture of liquid and crystals that can, to a various extent, separate from one another and produce the compositionally variable differentiated magmas. Eventually, the magma solidifies to form an igneous rock. The processes leading to formation of igneous rocks are of great importance because they have controlled, and still do, the distribution of elements between Earth’s mantle and variable levels of the crust.

## **(1) Closed-system processes**

In course of closed-system differentiation processes, the parental melt evolves into one or more magmas with a different composition, without material exchange with an external reservoir. Closed-system differentiation processes include several mechanisms whereby early-formed crystals are segregated from the remaining melt, or vice versa. Further closed-system processes are:

- Fractional crystallization; marginal accretion (sidewall accretion); gravitational separation (crystal settling and flotation; convective flow segregation; filter pressing or compaction; flowage differentiation;
- crystal settling (e.g., Martin and Nokes, 1988); in situ crystallization (e.g., Langmuir, 1989); thermo-gravitational diffusion (e.g., Walker *et al.*, 1981);

- liquid fractionation processes include thermal (Soret) diffusion (e.g. Walker and DeLong, 1982), liquid immiscibility and liquation.

## **2) Open-system processes**

Open-system processes such as assimilation, magma mixing and mingling involve compositional changes due to interaction of magma with the surrounding country rock or with contrasting magmas entering the system. The most effective tools for recognition of open-system processes represent radiogenic isotopes (e.g. Sr, Nd, Os, Hf). Other processes in the open system are:

- stoping; assimilation; material exchange between the wall rocks and advancing magma; the time; the thermal contrast between the magma and wall rock and a composition of the assimilant (e.g., Davidson *et al.*, 2001);
- Magma mingling and mixing (e.g., Barbarin and Didier, 1992);
- Chemical differentiation; volatile-bearing but vapour-undersaturated magma; progressive, and often protracted, fractional crystallization.

## **3) Combination of processes**

Because many of the petrogenetic processes cause similar effects, it may be difficult to distinguish the relative contributions of each of them with confidence. One approach to the problem is to devise mathematical model for the behaviour of certain trace elements and isotopic ratios based on a combination of processes:

- the assimilation + fractional crystallization (AFC: DePaolo, 1981), fractional crystallization + recharge of more primitive magmas (e.g., O'Hara and Matthews, 1981), and all three combined (e.g., Aitchison and Forrest, 1994), using iterative techniques to model the ratio of contaminant to original magma;
- the Energetically Constrained Assimilation and Fractional Crystallization (EC-AFC) model of e.g., Spera and Bohron (2001).

## **Overview on the origin of zoning in magmatic bodies**

In the map view, many circular or elliptical shallow plutons display remarkable concentric compositional zoning on length scales of  $\sim 10^2$ – $10^4$  m. Generally, the zoning is defined by more mafic rocks (e.g., gabbro, diorite) occurring along pluton margins and felsic rocks (e.g., granite, tonalite) in the centres or vice versa (normal and reverse zoning, respectively).

In the field the zoning can be recognized based on regular variation in the modal contents of rock-forming minerals (e.g., plagioclase, biotite, hornblende, and/or pyroxene), abundance/size of K-feldspar phenocrysts, intrusive contacts between pulses, or the nature and volumetric proportion of mafic microgranular enclaves (MME).

Moreover, normal or reverse zoning is revealed by systematic spatial variations in whole-rock and mineral compositions (e.g., Seaman *et al.*, 2011).

In rare cases, the zoning may be cryptic, i.e. being defined by chemical variations in (some of) trace-elements or in contents of accessory minerals (e.g., Janoušek *et al.*, 1997).

Formation of concentric zoning in granitoid plutons has been commonly interpreted as a result of several physico-chemical processes, such as:

- In situ crystal–melt separation via flow sorting, gravitational settling, filter pressing or sidewall crystallization within a single magma pulse/batch (e.g., Bateman, 1984);
- Nested emplacement (“telescoping”) of multiple magma pulses sharing a single conduit (e.g., Molyneux and Hutton, 2000), with or without mixing between separate outer and inner batches (Coint *et al.* 2013);
- Intrusion of an essentially single pulse of magma preserving a vertical compositional gradient from a deeper level magma chamber (e.g., Pupier *et al.*, 2008);
- Continuous cyclic thermal evolution of an incrementally constructed magma chamber (e.g., Glazner and Johnson, 2013).

Apparently, the textural and compositional zonation in plutons records complex evolution that may have taken place not only at the final emplacement level and solidification stage. In many cases, important role is played by petrogenetic processes operating deeper and reflecting vertical and/or horizontal heterogeneity in the whole magma-plumbing system.

---

Unravelling the geometrical patterns and the likely physical causes of magma flow in granitic magma chambers is one of the central aspects of understanding magma dynamics. In many cases, however, direct field evidence for magma flow is completely erased from the rock record. Magmatic fabrics in plutons (i.e., foliations and lineations formed in the presence of a melt; (e.g., Fernandez & Gasquet, 1994) commonly fail to provide unambiguous evidence for chamber-wide magma flow or convection. Instead, the preserved pluton fabrics are acquired late in magma chamber history along migrating crystallization fronts and are also easily reset by regional tectonic deformation, making inferences on large-scale convection or flow patterns problematic (e.g., Petford 2003). From a structural record it is possible, under certain assumptions, to interpret the magma ascent, magma emplacement and deformation events of regional importance.

---

The significance of magmatic fabrics in plutons is important, especially with the question how they record regional tectonic deformation superimposed onto granitoid bodies prior the final solidification. These aspects are described on examples of the Štěnovice and Čistá Plutons, Ševětín Pluton and selected other (pre- and syn-tectonic) Variscan granitic intrusions in the Bohemian Massif. The Ph.D. Thesis shows that granitoids with well-defined petrographic, mineralogical, chemical features and ages may provide information on the spatial/temporal changes in tectonic settings. This approach is used in a different petrogenetic classifications of granitoid rocks.

## 2. Aims of the study

The principal goal of the Ph.D. thesis is to modestly contribute to understanding of shallow-level felsic systems. In particular, we ask what can be learned from the granitoid pluton/host-rock structures, geochemical variation and physico-chemical processes in magma chambers.

In brief, the main aims of this Ph.D. thesis are to:

- describe the nature of zoning in individual plutons, as well as the external and internal contacts, in terms of petrology, textures, internal fabrics, and chemical composition;



- investigate the structural evolution, textures, fabrics (including anisotropy of magnetic susceptibility, AMS) in granites, as well as thermal and structural evolution of the individual plutons with their contact aureoles;
- compare field and laboratory data pertaining to thermal and crystallization history with the numerical simulation of conductive cooling of the individual plutons;
- using the major- and trace-element data and radiogenic isotope methods to provide information on sources of individual pulses, their mutual relationship and development in space and time, and to constrain the processes that may have modified the magma composition (e.g., fractional crystallization, magma mixing, crustal assimilation);
- combining the above datasets with viscosity simulations to constrain the viable ascent and emplacement mechanisms of granitic magma in shallow-level plutons; in particular to assess the importance of granitoid diapirism and incremental growth models.

### 3. Material and methods

The principal approach adopted in this work is, to use careful observations and detailed structural mapping in the field as a firm basis for further quantitative analysis in the laboratory. Field data are complemented by a wide range of other analytical methods:

- Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and inverse strain estimation;
- Gravimetric studies on two plutons (the Říčany Pluton and Štěnovice Pluton);
- Quantitative textural analysis;
- Petrology, mineral chemistry (EMPA);
- Whole-rock and radiogenic isotope geochemistry, geochemical modelling;
- U–Th–Pb radiometric dating (LA-ICP-MS and conventional by TIMS);
- Thermal modelling and magma viscosity simulations.

For details about each method please see into Ph.D. Thesis.

### 4. Results and discussion

This section provides summaries for each separate articles of the Ph.D. Thesis.

The **Article 1-1** – Origin of reverse compositional and textural zoning in granite plutons by localized thermal overturn of stratified magma chambers brings a detailed study of a nested reversely zoned, granitic Říčany Pluton where was proposed a comprehensive model for how reversely zoned plutons form. First, a stratified magma chamber develops in which K-feldspar-rich cumulates settle to the bottom or sidewalls leaving behind a crystal-poor more silicic magma in the upper layer. This K-feldspar cumulate along with interstitial melt is re-mobilized by the basaltic intrusions and underplating. This setup leads to a density inversion that eventually causes a major overturn. The remobilized granitic magma carries fragments of these cumulates and mafic enclaves towards the surface.

The **Article I.-2** – Distribution of elements among minerals of a single (muscovite-) biotite granite sample – an optimal approach and general implications describes petrography and mineral chemistry of a sample of coarse-grained, weakly porphyritic biotite granite of the Říčany Pluton with the following conclusions:

- Accessory phases control the behaviour of many trace elements in differentiation of felsic granitic systems.
- A great proportion of essential structural components (e.g., P, Zr, LREE) used in apatite, zircon and monazite saturation thermometry is incorporated into other minerals. This may lead to significant overestimation of the liquidus temperatures; in this case the zircon saturation temperatures for would be overestimated by c. 40 °C due to significant contents of Zr in the early crystallized rutile.
- In the studied sample, over 80 % of the whole-rock Zr and Hf and c. 10–30 % of HREE, U, Th, Nb, Ta, Ti, Cd, Co and Ni are contained in resistant accessory phases Zrn and Rt. Thus the pressure vessel or sample fusion, and not merely a combined acid attack, are absolutely essential in sample decomposition were these elements to be determined quantitatively. Moreover, these elements will be kept in residue left after granite weathering, and thus will be rather hard to release into the environment.

The **Article II.-1** – Magnetic fabric and modeled strain distribution in the head of a nested granite diapir, the Melechov pluton, Bohemian Massif is focused on the Melechov Pluton which is a unique composite granitic body. The intrusive fabrics record incremental strain gradient in a granite diapir during final emplacement to the middle crust. The main conclusions are as follows:

- The Melechov Pluton is interpreted as a mid-crustal vertically extensive granitic diapir with an apical part (diapir head) exposed at the present-day erosion level. The diapir head exhibits an overall concentric structure defined both by compositional zoning and magnetic fabric, and especially the latter is consistent with an idealized picture of igneous diapirs.
- Margin-parallel, outward-dipping magnetic foliations are associated with oblate shapes of the susceptibility ellipsoids and higher degree of anisotropy, passing inward into weaker triaxial to prolate fabric. Magnetic fabric of the inner Melechov granite, in places oriented at a high angle to the internal contacts and ductile host rock structures, is interpreted as recording the internal diapir circulation as predicted by theoretical models.
- In terms of intensity and symmetry, the intrusive strain estimations from the AMS data using the Ježek–Hrouda method (SUSIE) are in agreement with strain gradients in the heads of model Newtonian diapirs. The low degree of anisotropy and calculated strain intensities across the diapir are consistent with granitic magma ascent as a dilute, crystal-poor suspension followed by crystallization of fabric markers and their response to strain near the final emplacement level. This mechanism explains why the generally weak intrusive fabrics may still be capable of recording the within-diapir strain gradient.
- The SUSIE method has been used to be particularly useful for strain estimations from the AMS in granite plutons, which typically lack reliable strain markers.

The **Article II.-2** Magnetic fabric of the Říčany granite brings new emplacement model based on structural and AMS data for the Říčany Pluton. The observed mesoscopic and magnetic fabrics are interpreted as a result of helical flow. The main conclusions are:

- The difference in K-feldspar phenocrysts contents caused significant difference in viscosities: the outer, strongly porphyritic granite (SPm) presumably had viscosity an order of magnitude higher than the central, weakly porphyritic granite (WPc).
- This assumption is in agreement with an exponential increase in viscosity with crystal content as predicted by the Einstein-Roscoe equation for solid-liquid mixtures.

- Considering the Říčany Pluton as a steep-sided cylindrical body, the Hagen-Poiseuille equation for fluid flow through a pipe can be applied to infer the flow mechanism within the pluton. Contrasting viscosities of the two magmas then would cause their different velocities during ascent. Consequently, faster subvertical flow of low-viscosity (phenocryst-poor) magma in the pluton center may have generated helical (subhorizontal) flow in the outer, high-viscosity and phenocryst-rich layer.
- This two-layer model explains well the finite fabric pattern, with concentric, steep foliations and magnetic lineations being subhorizontal along the pluton margin and subvertical in the centre. Taking into account the shallow emplacement level of the Říčany Pluton, it may be viewed as a conduit linking a deeper magma chamber with a volcanic system at the surface.

The **Article III.-1 – Structure, emplacement, and tectonic setting of Late Devonian granitoid plutons in the Teplá–Barrandian unit, Bohemian Massif** describes the Čistá and Štěnovice granodiorite plutons which are interpreted as representing an initial, Late Devonian stage of subsequent Early Carboniferous voluminous plutonism of the central Bohemian Massif. The main conclusion are:

- The geochemical characteristics of the granodiorites–tonalites composition are consistent with the calc-alkaline association having been generated in a continental margin arc setting.
- These two plutons are undeformed and share many characteristics with diapiric intrusions: elliptical cross-section in plan view, steep contacts, inferred downward-narrowing conical or inverted “tear-drop” shapes, faint normal zoning, and margin-parallel magmatic fabric decoupled from the regional host-rock structures.
- Combined with the existing geochronologic, geochemical, and tectonic data, the Čistá and Štěnovice plutons indicate an overall shift of plutonic activity from the ~NW to the ~SE in the upper-crustal TBU during Late Devonian to Early Carboniferous. This temporal trend was accompanied by a general compositional shift from normal-K calc-alkaline to shoshonitic/ultrapotassic magmas. Such a pattern in the plutonic activity is compatible with the SE-directed subduction of the Saxothuringian Ocean beneath the Teplá–Barrandian plate as a principal cause of the Variscan arc-related plutonism in the core of the Bohemian Massif.

The **Article III.-2 – Intrusive and deformation history of the Ševětín Pluton, Moldanubian Batholith: record of polyphase tectonic evolution of the Blanice Graben, Bohemian Massif** is a structural study of the Ševětín Pluton that enabled detailed reconstruction of the Blanice Graben tectonic evolution and of the associated magmatic activity:

- The AMS study discovered steeply to moderately dipping planar magnetic fabrics that are interpreted mostly as solid-state in origin. Local preservation of original magmatic foliation is possible in the central to eastern parts of the Ševětín Pluton.
- The overall sigmoidal trend of the magnetic fabrics indicates sinistral movements along the Blanice Graben fault systems postdating the intrusion of the biotite–muscovite granite of the Ševětín Pluton. This is further supported by well-defined subhorizontal magnetic lineation. The magnetic fabric of the Ševětín Pluton is thus in sharp contrast to the subhorizontal metamorphic foliation and subhorizontal NW–SE trending stretching lineation in the surrounding Moldanubian host rocks.
- Paleostress and kinematic analysis of brittle structures allowed differentiation of three tectonic phases (oblique compression, strike-slip and extension), which post-dated the intrusion of the biotite–muscovite granite.
- The oblique compression phase comprised both the emplacement of the biotite–muscovite granite and early stages of its brittle deformation. It was accompanied by the formation of NE–SW trending joints (P1) and dikes (aplite), both dipping moderately to the SE.

- The strike-slip phase indicates more or less E–W trending extension and can be correlated with the intrusion of c. 270 Ma microgranodiorite dikes.
- The extension phase was accompanied by the formation of hydrothermal Pb–Zn–(Ag) quartz–carbonate veins and scarce P5 and P6 tension joints.

The **Article III.-3** – A plate-kinematic model for the assembly of the Bohemian Massif constrained by structural relations around granitoid plutons summarizes tectonic evolution in the Bohemian Massif and clearly demonstrates how the orogenic processes and related deformation and plutonism evolved in space and time. As a consequence of overall convergence of Gondwana and Laurussia, four main episodes are recognized in the interior Bohemian Massif. For this thesis the most relevant is the last episode that corresponded to late readjustments within the amalgamated Bohemian Massif and that included rapid exhumation and voluminous ~327–330 Ma S-type-dominated granite plutonism. The tectonothermal activity at the periphery around the consolidated orogen's core was followed by destruction of the orogenic belt, post-orogenic igneous activity, continental basin development, and multiple reactivations along the inherited basement fault zones.

## 5. Conclusions

The ambition of this Ph.D. thesis has been to modestly contribute to the research on formation of compositional and textural zoning in shallow-level plutons. The aim was to assess the processes responsible for emplacement of individual plutons/pulses and the origin of compositional zoning in a great detail, from the pluton down to the micro-scale.

This Ph.D. thesis builds on a multidisciplinary quantitative approach to the study of magmatic systems. Extensive sets of structural, magnetic, gravimetric, geochemical (major- and trace-element, isotopic), and U–Pb geochronologic data were acquired from several composite granite plutons of Devonian to Carboniferous age in the Bohemian Massif. I believe that only such comprehensive studies on well-selected case examples have a potential to provide a generally applicable, in-depth understanding of zoning origin, mechanisms of pluton construction, and magma sources/evolution in the composite magmatic systems.

In terms of methodology, specific techniques were developed for sample preparation. Mathematical approaches have been designed and applied to the interpretation of geochemical data, with potential applications to other studies in igneous systems. The integration of field and quantitative data sets obtained by range of methods has provided new insights into emplacement mechanisms of granitoid magma in the upper crust and the origin of modal/compositional zoning.

### Chapter I: Magma Differentiation and Pluton Zoning

The Chapter I with Articles I.- and I.-2 integrating the data with numerical simulations allowed us to formulate generally applicable petrogenetic models for multi-stage thermal–chemical–mechanical evolution of magmatic systems in the Earth's crust from anatexis, through storage to magma withdrawal from upper-crustal chambers during volcanic eruptions. For instance, a comprehensive petrogenetic model was developed on the basis of a detailed study of the Říčany Pluton. It is tracking the magma evolution from partial melting of a metapelitic source, through the formation of a stratified magma chamber and rejuvenation of the crystal mush by invading mafic melts, to the emplacement of the remobilized granitic magmas in the shallow crust.

## **Chapter II: Internal structure and formation mechanisms of zoned plutons at shallow crustal levels**

The Chapter II with Articles II.-1 and II.-2 allowed discussing formation of and magmatic strain patterns in composite granite diapirs in a considerable detail; in particular a comparison is made between the theoretical model and real observations in granite plutons. Next, the new emplacement model invoking “helical flow” is outlined because the structural and AMS data do not comply with existing models proposed for the emplacement of elliptical, onion-skin plutons (e.g. single-pulse vs. nested diapirism, ballooning, laccolith-like emplacement).

## **Chapter III: Zoned plutons as markers of regional tectonic and geodynamic setting**

The Chapter III with Articles III.-1, III.-2 and III.-3 brought new insights into the role of regional tectonics, including subduction, continental indentation and late-orogenic strike-slip faulting, in granite emplacement and syn-magmatic deformation.

On a global scale, this research has contributed to the discussion of processes that play main role in origin of igneous zoning in granitic plutons, especially at shallow crustal levels. Moreover it yielded general conclusions regarding the sources of granitic magma in subduction and collisional setting, its evolution and geodynamic context. The study brings broader implications for timing, sources and development of Variscan plutonism in Bohemian Massif and as such to the magmatic and tectonic evolution of the Variscan orogen as a whole.

# 1. Úvod

Při snaze vysvětlit povahu a genezi zonální struktury granitoidních těles je vhodné použít multidisciplinární přístup v kombinaci se strukturními, petrologickými, geochronologickými a geochemickými metodami včetně geochemického modelování a geofyzikálních metod.

Jedním z míst, kde může být rozvíjen a testován takovýto multidisciplinární přístup, je Český masiv, jenž je součástí variského kolizního orogénu v Evropě. Mezi početnými mělce uloženými granitoidními plutony, které vnikají do této komplexní jednotky v období od pozdního devonu až do raného karbonu, byly nalezeny dva následující, obzvláště vhodné pro tuto Ph.D. práci:

1. **Říčanský pluton**, vystupující v severovýchodním okraji středočeského plutonického komplexu. Má zhruba eliptický obrys a skládá se ze tří (muskovito)-biotitových granitových facií, které definují subkoncentrickou kompoziční a texturní zonálnost. Stáří krystalizace dvou hlavních facií odpovídá ~337 Ma a stupeň frakcionace klesá směrem do centra plutonu. Proto pluton vykazuje obrácenou (reverzní) zonálnost, která je však "kryptická" a definována na základě složení stopových prvků (viz Výsledky, **Článek I.-1, Článek I.-2, Článek II.-2**).
2. **Melechovský pluton** je nejsevernější intruzí moldanubického batolitu patřící mezi největší variská magmatická tělesa. Pluton se skládá ze čtyř koncentricky uspořádaných pulzů peraluminických granitů S-typu. Konkordantní stáří stanovené pomocí TIMS-ID na monazitu tří vnějších facií (Lipnice, Světlá a Kouty) ukazuje stáří mezi  $332 \pm 1$  a  $323 \pm 0.4$  Ma (většinou však 327–325 Ma). Toto datování je dobře srovnatelné s LA ICP-MS datováním lipnického granitu pomocí monazitu ( $324.8 \pm 2.4$  Ma) a dřívějším konvenčním U-Pb datováním zirkonů a monazitů z granitů typu "Eisgarn" (viz Výsledky, **Článek II.-1**).

I když většina naší pozornosti směřovala ke dvěma zonálním plutonům vyjmenovaným výše, výsledky ostatních studií magmatických těles v Českém masivu (např. plutony Ševětín, Štěnovice a Čistá) jsou popisovány v samostatných **článcích III.-1, III.-2 a III.-3**.

---

Nejmodernější znalosti o strukturách granitoidních plutonů/okolních hornin, geochemických variacích a fyzikálně-chemických procesech jsou popsány níže.

Magmatické horniny vznikající krystalizací magmatu jsou nejhojnějšími typy hornin v zemské kůře. Když magma stoupá a začíná se ochlazovat, stává se z něj směs kapaliny a krystalů, které se mohou od sebe do různé míry oddělit a produkovat kompozičně variabilní diferenciovaná magmata. Jakmile magma zatuhne, dochází k formování magmatické horniny. Procesy vedoucí k formování magmatických hornin jsou velmi důležité, protože kontrolují distribuci prvků mezi zemským pláštěm a různými úrovněmi kůry.

## (1) Procesy v uzavřeném systému

V průběhu diferenciací magmatu během procesu v uzavřeném systému se tavenina ze zdroje vyvíjí v jedno nebo více magmat s rozlišným složením, bez materiálové výměny s externím rezervoárem. Diferenciační procesy uzavřených systémů zahrnují několik mechanismů, kde se raně formované krystaly oddělují od zbytkové taveniny nebo naopak. Další procesy uzavřených systémů jsou:

- frakční krystalizace; okrajová akrece (postranní akrece); gravitační separace (usazování a vyplavování krystalů; toková konvektivní segregace; filter pressing nebo kompakce; toková diferenciací...);
- usazování krystalů (např. Martin a Nokes, 1988); krystalizace in situ (např. Langmuir, 1989); termo-gravitační difúze (např. Walker *et al.*, 1981);

- frakcionační procesy zahrnují termální (Soretovu) difúzi (např. Walker a DeLong, 1982), nesmíselnost a likvací.

## (2) Procesy v otevřeném systému

Procesy v otevřených systémech jako je asimilace a míšení magmat zahrnují kompoziční změny vzhledem k interakci magmatu s obklopující horninou nebo s kontrastním magmatem vstupujícím do systému. Nejefektivnější nástroje pro rozpoznání procesů otevřených systémů představují radioaktivní izotopy (např. Sr, Nd, Os, Hf). Další procesy v otevřeném systému jsou:

- stoping; asimilace; materiálová výměna mezi stěnami hornin a vystupujícím magmatem; čas; termální kontrast mezi magmatem a stěnou okolní horniny a složením asimilantu (např. Davidson *et al.* 2001);
- míšení magmat (např. Barbarin a Didier, 1992);
- chemická diferenciace; volatilní a podsaturevané magma; frakční krystalizace.

## (3) Kombinace procesů

Vzhledem k tomu, že mnoho petrogenetických procesů způsobuje podobné efekty, může být obtížné s jistotou rozlišovat příspěvek každého z nich. Jedním z přístupů k problému je vypracování matematického modelu pro chování určitých stopových prvků a izotopických poměrů založený na kombinaci procesů:

- asimilace + frakční krystalizace (AFC: DePaolo, 1981), frakční krystalizace + doplnění primitivnějších magmat (např. O'Hara a Matthews, 1981), a kombinace všech tří (např. Aitchison a Forrest, 1994), s použitím iterativních technik k vymodelování poměru kontaminantu v původním magmatu;
- model EC-AFC (např. Spera a Bohrsen, 2001).

## Přehled vzniku zonálnosti v magmatických tělesech

V mapovém řezu lze rozpoznat mnoho mělkých kruhovitých nebo eliptických plutonů s významnou koncentrickou kompoziční zonálností v rozmezí délek  $\sim 10^2$ – $10^4$  m. Zonálnost je všeobecně definována mafickými horninami (např. gabro, diorit) vyskytujícími se na okraji plutonů a felsickými horninami (např. granit, tonalit) naopak rozpoznatelných ve středech plutonů nebo opačně, (resp. normální a obrácená zonálnost).

V terénu může být zonálnost rozpoznána na základě pravidelných variací v modálním složení minerálů, které formují horniny (např. plagioklas, biotit, amfibol, a/nebo pyroxen), četností/velikostí K-živcových vyrostlic, intruzivních kontaktů mezi pulsy nebo na základě objemu mafických mikrogranulárních enkláv (MME).

Kromě toho je normální nebo obrácená zonálnost odhalena systematickými prostorovými variacemi v celohorninovém a minerálním chemismu (např. Seaman *et al.*, 2011).

Ve vzácných případech může být zonálnost kryptická, tj. definovaná chemickými variacemi v (některých) stopových prvcích nebo v obsahu akcesorických minerálů (např. Janoušek *et al.*, 1997).

Formování koncentrické zonálnosti v granitoidních plutonech je běžně interpretováno jako výsledek několika fyzikálně-chemických procesů, jako je:

- in situ separace krystalové taveniny vlivem magmatického toku, gravitační usazování, filter pressing nebo krystalizace na stěnách plutonu v rámci jednotlivého pulsu/dávky magmatu (např. Bateman, 1984);

- vmístění (“telescoping”) více magmatických pulsů sdílících jeden výstupní kanál (např. Molyneux a Hutton, 2000), míšení jednotlivých vnějších a vnitřních dávek magmatu (Coint *et al.* 2013);
- intruze jednoho pulsu magmatu zachovávající si vertikální kompoziční gradient z hlubší vrstvy magmatického krbu (např. Pupier *et al.*, 2008);
- kontinuální cyklický termální vývoj dávek magmatu do postupně vytvářejícího se magmatického krbu (např. Glazner a Johnson, 2013).

Je zřejmé, že texturní a kompoziční zonálnost v plutonech zaznamenává komplexní vývoj, který mohl nastat jak ve finálním stupni vmístění, tak i stadiu tuhnutí. V mnoha případech hrají důležitou roli petroge-netické procesy odehrávající se ve větších hloubkách a které pak reflektující vertikální a/nebo horizontální heterogenitu v celém systému magmatických kanálů.

---

Vnitřní stavby v zonálních plutonech mohou odhalit dynamické procesy v granitických magmatických krbech. V mnoha případech je ale přímý terénní důkaz magmatického toku kompletně smazán ze záznamu horniny. Proto magmatické stavby v plutonech (tj. foliace a lineace formované v přítomnosti taveniny, (např. Fernandez & Gasquet, 1994) běžně nejsou schopny poskytnout jednoznačný důkaz magmatického toku nebo proudění v magmatickém krbu. Velmi často zachované magmatické stavby odráží poslední historii magmatického krbu podél migrujících krystalizačních front a také jsou snadno resetovány místní tektonickou deformací. Tím je rozpoznání magmatu či jeho proudění problematické (např. Petford 2003). Avšak ze strukturního záznamu je možné za určitých předpokladů interpretovat magmatický výstup, magmatické vmístění a deformační události regionálního významu.

---

Význam magmatických staveb v plutonech je důležitý, obzvláště s otázkou, jak zaznamenávají regionální tektonickou deformaci aplikovanou na granitoidních tělesech před finálním tuhnutím. Tyto aspekty jsou popsány na příkladech štěnovického a čisteckého plutonu, ševětínského plutonu a vybraných ostatních (pre- a syntektonických) variských granitových intruzí v Českém masivu. Tato Ph.D. práce pak ukazuje, že granitoidy se správně definovanými petrografickými, mineralogickými a chemickými charakteristikami a stářím mohou poskytnout informaci o prostorových/časových změnách v tektonickém uspořádání. Tento přístup je pak také použit v různých petroge-netických klasifikacích granitoidních hornin.

## 2. Cíle práce

Hlavním cílem této Ph.D. práce je přispět k porozumění vzniku mělce uložených magmatických felsických systémů. Zejména se ptáme, co bychom se mohli naučit ze struktur granitoidních plutonů/okolních hornin, geochemických variací a fyzikálně-chemických procesech v magmatických krbech.

### **Ve stručnosti, hlavní cíle této Ph.D. práce jsou:**

- popsat povahu zonálnosti v individuálních plutonech, jakožto i externí a interní kontakty z hlediska petrologie, textur, interní stavby a chemického složení;
- prozkoumat strukturní vývoj, textury, interní magnetické stavby (pomocí anizotropie magnetické susceptibility, AMS) v granitech, jakožto i termální a strukturní vývoj magmatických těles (plutonů) s jejich kontaktními aureolami;
- porovnat terénní a laboratorní data týkající se termální a krystalizační historie s numerickou simulací konduktivního chladnutí magmatických těles (plutonů);



- pomocí hlavních a stopových prvků a metody radiogenních izotopů objasnit informace o zdrojích individuálních magmatických pulsů, jejich vzájemného vztahu a vývoje v prostoru a čase a vymežit procesy, které mohly modifikovat složení magmatu (např. procesem frakční krystalizace, míšením magmatu, asimilace kůry);
- kombinací výše uvedených souborů dat včetně odhadu viskozit magmatu zhodnotit mechanismy výstupu a vmístění mělce uložených plutonů; a také zhodnotit důležitost granitoidního diapirismu či "přírůstkových růstových" modelů.

### 3. Materiál a metodika

Hlavním přístupem použitým v této práci je využití terénního pozorování a detailního strukturálního mapování v terénu jako pevného základu pro další kvantitativní analýzu v laboratoři. Terénní data jsou doplněna širokou škálou dalších analytických metod:

- Anizotropie magnetické susceptibility (AMS) a odhad inverzního napětí;
- Gravimetrické studie dvou plutonů (říčanský pluton a štěnovický pluton);
- Kvantitativní texturní analýza;
- Petrologie, minerální chemie (EMPA);
- Geochemie radiogenních izotopů a celých hornin, geochemické modelování;
- U-Th-Pb radiometrické datování (LA-ICP-MS a konvenční přístrojem TIMS);
- Termální modelování a simulace magmatické viskozity.

Detailní popis každé metody je uveden v Ph.D. práci.

### 4. Výsledky a diskuse

Tento oddíl poskytuje stručný souhrn hlavních výsledků této Ph.D. práce.

**Článek I.-1 – Origin of reverse compositional and textural zoning in granite plutons by localized thermal overturn of stratified magma chambers** přináší detailní studii revezní zonálnosti říčanského plutonu, kde je navržen souhrnný model toho, jak se formují obráceně zonální plutony. Zonalita se vyvíjí ze stratifikovaného magmatického krbu, ve kterém se usazují ke dnu nebo na stranách tzv. kumuláty bohaté na K-živece. Naopak v nadložní vrstvě vzniká více vyvinuté magma, ale chudé na krystaly. K-živcový kumulát dohromady s intersticiální taveninou je remobilizován bazickými intruzemi a vytváří tzv. "underplating". Postupem času dochází k hustotní inverzi, jež případně způsobí kolaps a remobilizované granitické magma nese kusy těchto kumulátů a mafických enkláv směrem k povrchu.

**Článek I.-2 – Distribution of elements among minerals of a single (muscovite-) biotite granite sample – an optimal approach and general implications** popisuje petrografii a minerální chemii na příkladu hrubozrnného, slabě porfyrického biotitického granitu říčanského plutonu s následujícími závěry:

- Akcesorické minerály kontrolují chování mnoha stopových prvků v diferenciaci felsických granitových systémů.
- Velká část stopových prvků (např. P, Zr, LREE) používaných v apatitové, zirkonové a monazitové saturační termometrii je distribuována také do jiných minerálů. Toto může vést k významnému nadhodnocení teplot krystalizace, v tomto případě by byly vzhledem k významnému množství obsahu Zr v raně krystalizovaném rutilu jeho saturační teploty nadhodnoceny o 40 °C.

- Ve studované hornině je přes 80 % celohorninového Zr a 10–30 % HREE, U, Th, Nb, Ta, Ti, Cd, Co a Ni obsaženo ve fázích zirkonu a rutilu. Tudíž je nezbytné pro zjištění chemického složení horniny použít tavení vzorku, nikoli jen kyselý rozklad.

**Článek II.-1 – Magnetic fabric and modeled strain distribution in the head of a nested granite diapir, the Melechov pluton, Bohemian Massif** je soustředěn na melechovský pluton, který je unikátním kompozitním granitoidním tělesem. Jeho vnitřní stavby pak zaznamenávají gradient nárůstu napětí v granitovém diapiru během finálního vmístění do střední kůry. Hlavní závěry jsou následující:

- Melechovský pluton je interpretován jako vertikálně rozsáhlý granitoidní diapir vmístěný do podmínek střední kůry a jeho současný erozivní řez je veden vrcholovou částí tohoto diapiru (tzv. “diapir head”). V tomto řezu lze identifikovat koncentrické struktury definované jak kompoziční zónalností, tak i magnetickými stavbami.
- Magnetické foliace paralelní s okrajem a upadající na vnější stranu plutonu jsou reprezentovány oblátními stavbami elipsoidu susceptibility a vyšším stupněm anizotropie, přecházejícími do vnitřními částí plutonu prolátními stavbami. Magnetické stavby uvnitř melechovského granitu jsou místy orientovány pod vysokými úhly k vnitřním kontaktům a duktilním strukturám okolních hornin. Takovéto stavby lze interpretovat jako záznam interní diapirické cirkulace, jak je popsáno v teoretických modelech.
- Co se týče intenzity a symetrie, odhady intruzivního napětí z AMS dat užitím metody Ježek-Hrouda (SUSIE) odpovídají gradientům napětí ve vrchních částech modelových newtonovských diapirů. Nízký stupeň anizotropie a vypočítané intenzity napětí napříč diapirem jsou konzistentní s výstupem granitického magmatu jako taveninové suspence, chudé na krystaly, následované krystalizací magmatu a jeho odpovědi na napětí při finálním stupni vmístění. Tento mechanismus vysvětluje, proč může být všeobecně slabá intruzivní stavba stále schopná záznamu gradientu napětí v rámci diapiru.
- Metoda SUSIE byla použita pro odhady napětí z AMS parametrů v granitových plutonech, které obvykle postrádají spolehlivé záznamy napětí.

**Článek II.-2 – Magnetic fabric of the Říčany granite** přináší nový model vmístění založený na strukturních a AMS datech říčanského plutonu. Zkoumaná mezoskopická a magnetická stavba je interpretována jako výsledek helikálního toku. Hlavní závěry jsou:

- Rozdíl v obsahu draselných vyrostlic způsobil významný rozdíl ve viskozitách magmatu: vnější, silně porfyrický granit (SPm), měl pravděpodobně viskozitu vyšší než centrální, slabě porfyrický granit (WPc).
- Tento předpoklad je v souladu s exponenciálním růstem viskozity s obsahem krystalu, jak je popsáno v rovnici Einsteina-Roscoea pro tuhé/likvidní směsi.
- Pokud bereme v úvahu říčanský pluton jako cylindrické těleso se strmými stranami, může být aplikována Hagen-Poiseulleova rovnice pro kapalný tok skrz trubici, abychom odvodili tokový mechanismus v rámci plutonu. Kontrastní viskozity obou magmat by potom způsobovaly rozdílné rychlosti během výstupu. V důsledku kontrastu viskozit je subvertikální tok magmatu ve střední části plutonu rychlejší (nízká viskozita, malé zastoupení vyrostlic) a může způsobit helikální (subhorizontální) tok ve vnější vrstvě (vysoce viskózní a bohatá na vyrostlice).
- Tento dvouvrstvý model vysvětluje uspořádání vnitřních magnetických staveb s koncentrickými, strmými foliacemi a magnetickými lineacemi, které jsou subhorizontální podél okraje plutonu a subvertikální ve středu. Pokud vezmeme v úvahu mělký stupeň vmístění říčanského plutonu, může být interpretován jako kanál spojující hlubší magmatický krb s vulkanickým systémem na povrchu.

**Článek III.-1 – Structure, emplacement, and tectonic setting of Late Devonian granitoid plutons in the Teplá–Barrandian unit, Bohemian Massif** popisuje štěnovický a čistecký plutony, jejichž intruze definuje počáteční stádium rozsáhlého plutonismu v raném karbonu v centrální části Českého masivu. Hlavní závěry jsou:

- Geochemická charakteristika obou plutonů odpovídá vápenato-alkalickému trendu, který souvisí s geotektonickým prostředím kontinentálního oblouku.
- Tyto dva plutony mají své interní stavby diskordantní k regionálním stavbám. Na základě chemismu a interních staveb lze zařadit plutony mezi tzv. koncentrické expandované plutony (CEPs)
- Kombinací existujících geochronologických, geochemických a tektonických dat vykazuje čistecký a štěnovický pluton celkový posun magmatické aktivity od SZ k JV ve svrchní kůře tepelsko-barrandienské jednotky během pozdního devonu do raného karbonu. Tento přechodný trend byl doprovázen změnou chemismu od vápenato-alkalického k šošonitickému/ultradraselnému magmatu.
- Tato aktivita je kompatibilní s JV subdukcí saskodurynského oceánu pod tepelsko-barrandienským územím a souvisí s vývojem kontinentálního oblouku v Českém masívu.

**Článek III.-2 – Intrusive and deformation history of the Ševětín Pluton, Moldanubian Batholith: record of polyphase tectonic evolution of the Blanice Graben, Bohemian Massif** je strukturní studie ševětínského plutonu, která umožnila detailní rekonstrukci tektonické evoluce blanické brázd a s ní spojené magmatické aktivity:

- AMS studie odhalila strmě až mírně upadající magnetické stavby, které vznikly původně již v pevném stavu. Místy lze identifikovat zachovalou původní magmatickou foliaci ve středních až východních částech ševětínského plutonu.
- Celkově magnetické stavby vykazují levostranné pohyby podél zlomových systémů blanické brázd a postdatují intruzi biotito-muskovitového granitu ševětínského plutonu. Toto je dále podporováno dobře definovanou subhorizontální magnetickou lineací. Magnetická stavba ševětínského plutonu je tudíž v ostrém kontrastu s subhorizontální metamorfní foliací a subhorizontální SZ-JV protaženou lineací v okolních moldanubických horninách.
- Paleonapjatostní a kinematická analýza křehkých struktur rozlišila tři tektonické fáze (šikmá komprese, horizontální posun "strike-slip" a extenze), které postdatovaly intruzi biotito-muskovitového granitu.
- Fáze šikmé komprese obsahovala jak umístění biotito-muskovitového granitu, tak i rané stadium křehké deformace. Byla doprovázena formací SV-JZ (P1) puklin a žilami (aplit), oboje mírně upadající k JV.
- Fáze horizontálního posunu "strike-slip" vykazuje víceméně V-Z extenzi a souvisí s intruzí 270 Ma starých mikrogranodioritových žil.
- Finální fáze extenze byla doprovázena formací hydrotermálních Pb-Zn-(Ag)-křemeno-uhličitých žil a málo četných P5 a P6 tenzních puklin.

**Článek III.-3 – A plate-kinematic model for the assembly of the Bohemian Massif constrained by structural relations around granitoid plutons** shrnuje tektonický vývoj v Českém masivu a jasně ukazuje, jak se místně a časově vyvíjely orogenní procesy a s nimi spojená deformace a magmatismus. Jako důsledek celkové konvergence Gondwany a Laurussie jsou uvnitř Českého masivu rozpoznány čtyři hlavní epizody. Pro tuto Ph.D. práci je nejrelevantnější poslední epizoda, která odpovídala konsolidaci orogenního jádra, a která zahrnovala rychlou exhumaci a rozsáhlý granitový plutonismus, ~327–330 Ma, převládajícího magmatismu S-typu. Tektonicko-termální aktivita okolo konsolidovaného jádra orogenu byla následována destrukcí orogenního pásu, postorogenní magmatickou aktivitou, vývojem kontinentální pánve a vícenásobnými reaktivacemi podél průvodních hlubinných zlomových zón.

## 5. Závěry

Ambicí této Ph.D. práce je přispět k výzkumu formování kompoziční a texturní zonálnosti v mělce uložených plutonech. Cílem bylo detailnější zhodnocení procesů zodpovědných za vmístění individuálních plutonů/pulsů a vzniku kompoziční zonálnosti, jak na úrovni měřítka celého magmatického tělesa (plutonu), tak z hlediska mikroměřítko.

Práce se zakládá na multidisciplinárním kvantitativním přístupu studie magmatických systémů. Rozsáhlé soubory strukturních, magnetických, gravimetrických, geochemických (hlavní a stopové prvky, izotopy) a U-Pb geochronologických dat byly získány z několika kompozitních granitových plutonů z období devonu a karbonu v Českém masivu. Pevně věřím, že tyto souhrnné studie na pečlivě vybraných příkladech mají potenciál poskytnout všeobecně užitečné a důkladné porozumění vzniku zonálnosti včetně mechanismů stavby plutonu a zdrojů/vývoje tavenin v kompozitních magmatických systémech.

Pro účely metodologie byly také vyvinuty specifické techniky pro přípravu vzorků. K interpretaci geochemických dat byly navrženy a použity matematické postupy s potenciálním využitím v jiných studiích magmatických systémů. Spojení terénních a kvantitativních datových souborů získaných širokou škálou metod poskytuje nové náhledy na mechanismy vmístění granitového magmatu do podmínek svrchní kůry a vznik modální/kompoziční zonálnosti.

### ***Kapitola I: Diferenciace magmatu a zonálnost plutonu***

Kapitola I s články I.-1 a I.-2 integruje data s numerickými simulacemi umožňujícími nám formulovat petrogenetické modely pro termálně-chemicko-mechanický vývoj magmatických systémů ve svrchní kůře. Na základě detailní studie říčanského plutonu byl následně vyvinut jeho komplexní petrogenetický model. Ukazuje vývoj magmatu od tavení metapelitického zdroje, přes formování vrstveného magmatického krbu a rejuvenaci směsi krystalů interakcí mafických tavenin, až k výstupu remobilizovaného granitického magmatu do podmínek svrchní kůry.

### ***Kapitola II: Vnitřní struktury a mechanismy vzniku zonálních plutonů v mělkých úrovních svrchní kůry***

Kapitola II s články II.-1 a II.-2 se zabývá formováním magmatických staveb v kompozitních granitoidních diapirech ve větším detailu vlivem napětí. Stavby jsou porovnávány s teoretickými modely a reálnými pozorováními v granitových plutonech. Dále je nastíněn nový model vmístění pomocí tzv. "helikálního toku", neboť strukturní AMS data nekorespondují s existujícími modely navrženými pro vmístění eliptických "onion-skin" plutonů.

### ***Kapitola III: Zonální plutony jako markery (indikátory) regionálního tektonického a geodynamického vývoje***

Kapitola III s články III.-1, III.-2 a III.-3 přináší nové náhledy na roli regionální tektoniky, zahrnující subdukcii, kontinentální indentaci a horizontální zlomové posuny v závěru variské orogeneze, pro granitové vmístění a syn-magmatickou deformaci.

Tento výzkum přispívá v globálním měřítku k diskusi o procesech, které hrají hlavní roli při vzniku magmatické zonálnosti v granitových plutonech, obzvláště vmístěných v mělkých vrstvách kůry. Dále tento pohled poskytuje všeobecné závěry týkající se zdrojů granitového magmatu v subdukčních a kolizních režimech, jeho diferenciaci a geodynamický vývoj. Studie přináší rozsáhlejší implikace pro vývoj variského plutonismu v Českém masivu i magmatické a tektonické aktivity variského orogénu jako celku.

## References / Použitá literatura:

- Aitchison, S. J., & Forrest, A. H. (1994). Quantification of crustal contamination in open magmatic systems. *Journal of Petrology*, 35(2), 461–488.
- Barbarin, B., & Didier, J. (1992). Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: earth sciences*, 83(1-2), 145–153.
- Barbarin, B., & Didier, J. (1992). Genesis and evolution of mafic microgranular enclaves through various types of interaction between coexisting felsic and mafic magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: earth sciences*, 83(1-2), 145–153.
- Bateman, R. (1984). On the role of diapirism in the, segregation, ascent and final emplacement of granitoid magmas. *Tectonophysics*, 110(3), 211–231.
- Coint, N., Barnes, C. G., Yoshinobu, A. S., Chamberlain, K. R., & Barnes, M. A. (2013). Batch-wise assembly and zoning of a tilted calc-alkaline batholith: Field relations, timing, and compositional variation. *Geosphere*, 9(6), 1729–1746.
- Davidson, J., Tepley, F., Palacz, Z., & Meffan-Main, S. (2001). Magma recharge, contamination and residence times revealed by in situ laser ablation isotopic analysis of feldspar in volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 184(2), 427–442.
- DePaolo, D. J. (1981). Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and planetary science letters*, 53(2), 189–202.
- Fernandez, A. N., & Gasquet, D. R. (1994). Relative rheological evolution of chemically contrasted coeval magmas: example of the Tichka plutonic complex (Morocco). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(3), 316–326.
- Glazner, A. F., & Johnson, B. R. (2013). Late crystallization of K-feldspar and the paradox of megacrystic granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(3), 777–799.
- 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 Ricany granite, Czech Republic. *Journal of the Geological Society*, 154(5), 807–815.
- Langmuir, C. H. (1989). Geochemical consequences of in situ crystallization. *Nature*, 340(6230), 199–205.
- Martin, D., & Nokes, R. (1988). Crystal settling in a vigorously converting magma chamber 332, 534–536.
- Molyneux, S. J., & Hutton, D. H. W. (2000). Evidence for significant granite space creation by the ballooning mechanism: the example of the Ardara pluton, Ireland. *Geological Society of America Bulletin*, 112(10), 1543–1558.
- O'Hara, M. J., & Mathews, R. E. (1981). Geochemical evolution in an advancing, periodically replenished, periodically tapped, continuously fractionated magma chamber. *Journal of the Geological Society*, 138(3), 237–277.
- Petford, N. (2003). Rheology of granitic magmas during ascent and emplacement. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), 399–427.
- Pupier, E., Barbey, P., Toplis, M. J., & Bussy, F. (2008). Igneous layering, fractional crystallization and growth of granitic plutons: the Dolbel Batholith in SW Niger. *Journal of Petrology*, 49(6), 1043–1068.
- Seaman, S. J., Gylling, H., Hogan, J. P., Karner, F., & Koteas, G. C. (2011). Concentric zoning in the Tunk Lake pluton, coastal Maine. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(6), 1291–1314.
- Spera, F. J., & Bohron, W. A. (2001). Energy-constrained open-system magmatic processes I: general model and energy-constrained assimilation and fractional crystallization (EC-AFC) formulation. *Journal of Petrology*, 42(5), 999–1018.
- Walker, D., & DeLong, S. E. (1982). Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 79(3), 231–240.
- Walker, J. L. (1981). The diffusion of knowledge, policy communities, and agenda setting: the relationship of knowledge and power. *New strategic perspectives on social policy*, 75–96.

# Cirriculum Vitae / Profesionální životopis

## RNDr. Jakub Trubač

Born 15. 9. 1983 in Benešov, former Czechoslovakia

Contact: jakub.trubac@gmail.com

### **Education:**

1999 - 2003

Secondary School

2003 - 2006

Bachelor's degree in Geology, Charles University, Prague, Czech Rep.

2006 - 2008

Master's degree in Geology, Charles University, Prague, Czech Rep.

2006 - 2010

Master's degree in Teaching of Geology, Charles University, Prague, Czech Rep.

2010 - 2010

Rigorous degree – Geology, Charles University, Prague, Czech Rep.

2009 → until now

PhD. Study - Geology, Charles University, Prague, Czech Rep.

### **Present contact**

Charles University in Prague, Faculty of Science, Institute of geochemistry, mineralogy and mineral resources;  
Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic

### **Technical Skills**

- measurement of radiogenic isotopes (Sr, Nd) in positive mode and ( $\text{OsO}_3^-$ ) in the negative mode to mass spectrometry with thermal ionization (TIMS)
- measurement of magnesium isotopes with using MC-ICP-MS
- implementation of drained lines for Ta, Re and Pt filaments for TIMS
- evolution of the apparatus for the isolation of stable oxygen isotopes using highly oxidizing agent ( $\text{BrF}_5$ ) in nickel reactors
- programming HTML, CSS, PHP
- ESRI Arc GIS geographic information system (maps creation)
- geological mapping (Czech Republic, Spain, Chile)
- gun license and hunting license

## **Related Professional Experience**

October (2012) – February (2013) – Erasmus practical placement at Department of Petrology and Geochemistry, Universidad Complutense de Madrid (Prof. Villaseca)

Shortcourse: Metallogeny and Exploration of Uranium Deposits  
(TU Bergakademie Freiberg) 2011

Shortcourse: The Role of the Geologist in the Mineral Business  
(TU Bergakademie Freiberg) 2012

Shortcourse: Granite – related Mineral Systems  
(TU Bergakademie Freiberg) 2013

Shortcourse: Granite – REE deposits  
(TU Bergakademie Freiberg) 2014

Shortcourse: Understanding controls on mineralization:  
Applied structural geology to exploration and mining (Antofagasta, Chile) 2011

Assessment of radon index radiation (PřF UK) 2010

Computational thermodynamics with the MELTS family of models (Goldschmidt 2013, Florence)

## **Teaching experiences:**

- pedagogical practice at Secondary School Přípotoční
  - teaching geology (mineralogy and petrology)
- implementation and project management Correspondence Geological seminar - Kamenožrout (kamenozrout.cuni.cz)
- pedagogical practice at Charles University in Prague
  - The subject of Information services in geosciences (from 2010 – until now)
  - The subject Fundamentals of Geology for Geographers (2010)
  - Introduction to the subject of Practical geology II (from 2010 – 2014)

## **Research projects:**

GAUK Grant No. 131607 in the period from 2007 to 2008: Structural, textural and thermal evolution of granitoid diapirs (to **J. Trubač**)

Grant GACR No. P210-11-1168 in the period from 2010 to 2013: The origin of compositional and textural zoning in shallow-level granitoid plutons (to J. Žák)

GAUK Grant No. 131607 in the period from 2013 to 2015: Re-Os geochemistry and age constraints of the subcontinental lithosphere of the Bohemian Massif (to Y. Kochergina)

GAUK Grant No. 13-22351S in the period from 2013 - until now: Combined novel and traditional stable isotopes in identifying source components and processes of moldavite formation (to T. Magna)

Grant Academy of Sciences in the year 2014: Distribution and fractionation of PGE elements and gold in sulphides from the Merensky Reef deposit, Bushveld Complex (JAR) (to **J. Trubač**)



Grant Academy of Sciences in the year 2014: Magma flow and variation in deformation mechanism through dykes of Roztok intrusive centre (to F. Tomek)

Grant GACR No. 15-08583S in the period from 2014 – until now: Role of carbonatites for Zr–Hf–Nb–Ta and highly siderophile element budgets in the Earth's mantle – combined stable–radiogenic isotope approach (to T. Magna)

## Selected publications

### Thesis

**Trubač, J.** (2006): Mechanisms of emplacement and evolution of internal fabrics in granitic diapirs. Pluton Plechý. Central Moldanubian Batholith. MS Geological library. Bachelor thesis 40 pp.

**Trubač, J.** (2008): Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif: a record of helicoidal magmatic flow? Master thesis, 122 pp. MS Geological library PřF UK.

**Trubač, J.** (2010): Possibilities in presentation of geological databases in Regional Geology teaching. Master thesis, 63 pp. MS Geological library PřF UK.

**Trubač, J.** (2010): Mechanisms of differentiation and emplacement of peraluminic granite magma: Říčany pluton, Bohemian Massif. Rigorose thesis.

### Publication in impacted journals

Verner, K., Žák, J., Pertoldová, J., Šrámek, J., Sedlák, J., **Trubač, J.**, & Týcová, P. (2009). Magmatic history and geophysical signature of a post-collisional intrusive center emplaced near a crustal-scale shear zone: the Plechý granite pluton (Moldanubian batholith, Bohemian Massif). *International Journal of Earth Sciences*, 98(3), 517-532.

**Trubač, J.**, Žák, J., Chlupáčová, M., & Janoušek, V. (2009). Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif: A record of helical magma flow?. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181(1), 25-34.

Žák, J., Kratinová, Z., **Trubač, J.**, Janoušek, V., Sláma, J., & Mrlina, J. (2011). Structure, emplacement, and tectonic setting of Late Devonian granitoid plutons in the Teplá–Barrandian unit, Bohemian Massif. *International Journal of Earth Sciences*, 100(7), 1477-1495.

Kohút, M., **Trubač, J.**, Novotný, L., Ackerman, L., Demko, R., Bartalský, B., & Erban, V. (2013). Geology and Re-Os molybdenite geochronology of the Kuriskova U-Mo deposit (Western Carpathians, Slovakia). *Journal of GEOsciences*, 58(3), 271-282.

Tasáryová, Z., Schnabl, P., Čížková, K., Pruner, P., Janoušek, V., Rappich, V. & **Trubač, J.** (2014). Gorstian palaeoposition and geotectonic setting of Suchomasty Volcanic Centre (Silurian, Prague Basin, Teplá-Barrandian Unit, Bohemian Massif). *GFF*, 136(1), 262-265.

**Trubač, J.**, Žák, J., Chlupáčová, M., & Janoušek, V. (2014). Magnetic fabric and modeled strain distribution in the head of a nested granite diapir, the Melechov pluton, Bohemian Massif. *Journal of Structural Geology*, 66, 271-283.

Janoušek, V., Navrátil, T., **Trubač, J.**, Strnad, L., Laufek, F., & Minařík, L. (2014). Distribution of elements among minerals of a single (muscovite-) biotite granite sample – an optimal approach and general implications. *Geologica Carpathica*, 65(4), 257-272i.

Zachariáš, J., & **Trubač, J.** (2014). Intrusive and deformation history of the Ševětín Pluton, Moldanubian Batholith: record of polyphase tectonic evolution of the Blanice Graben, Bohemian Massif. *Journal of GEOsciences*, 59(4), 441-456.

**Trubač, J.,** Vrána, S., Haluzová, E., & Ackerman, L. (2015). Petrology and geochemical characteristics of phlogopite pyroxenite related to durbachites, Moldanubian Zone, Bohemian Massif. *Journal of GEOsciences*, 60(2), 73-90.

### **Publication in open access**

**Trubač, J.,** Žák, J., & Janoušek, V. (2010). Magnetic fabric of the Říčany granite, Bohemian Massif. *Trabajos de Geología*, 30(30).

### **Chapter in book**

Žák, J., Verner, K., Janoušek, V., Holub, F. V., Kachlík, V., Finger, F., Hajná, J., Tomek F. & **Trubač, J.** (2014). A plate-kinematic model for the assembly of the Bohemian Massif constrained by structural relationships around granitoid plutons. Geological Society, London, Special Publications, 405, SP405-9.

### **Reviewed article in the Proceedings**

**Trubač J.,** Ackerman L., Vondrovicová L. (2011): Re-Os geochemistry of wolframite from Jeřmanice W-(Sn) mineralization, Bohemian Massif, Czech Republic. In Fernando Barra; Martin Reich; Eduardo Campos; Fernando Tornos: Let's Talk Ore Deposits, Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting, s. 1-984. Ediciones Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile. Antofagasta, Chile. ISBN 978-956-287-329-1.

Vondrovic, L., **Trubač, J.,** Ackerman, L., Dobeš, P. (2011): Origin of wolframite mineralization at Jeřmanice (central Europe): evidence from mineral chemistry, fluid inclusions, oxygen stable isotopes and Re-Os geochemistry. In Schloglová K: Mineral Resources for Society, Book of abstracts, s. 20. – SGA Student Chapter Prague. Prague.

Dobeš P., Vondrovic L., **Trubač J.,** Dolejš D. (2011): Cassiterite-wolframite mineralization at Jeřmanice in the Krkonoše-Jizera pluton (Czech Republic) - mineral chemistry, fluid inclusions, and stable isotopes. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 87, Aug 2011, 62-63. ISSN 1017-8880.

Janoušek, V., Farrow, C. M., Erban, V., **Trubač, J.** (2011). Brand new Geochemical Data Toolkit (GCDkit 3.0) - is it worth upgrading and browsing documentation? (Yes!). *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku* 18, 26–30.

**Trubač, J.,** Janoušek V., Vrána S., Wiegand B. (2012): Nature, tectonic setting and likely origin of the Palaeoproterozoic (~2.1 Ga) Světlík orthogneisses (southern Bohemia). 10 th meeting of the Central European Tectonic Group Studies (CETEG), Zemplínska Šírava – Medvedia hora. Slovak Republic.

Janoušek, V., Navrátil, T., **Trubač, J.,** Strnad, L., Laufek, F., Minařík, L. (2012). Residence of elements in minerals of a single granite sample (Říčany granite, Variscan Central Bohemian Plutonic Complex). *Mineralia Slovaca* 44, 84–84.

**Trubač, J.,** Kohút, M., Novotný, L., Demko, R., Bartalský, B., Ackerman, L. & Erban, V. 2012: Re-Os datovanie molybdenitu z U-Mo ložiska Kurišková. *Mineralia Slovaca, Geovestník*, 44/4.

**Trubač, J.,** Janoušek V., Žák J., Gerdes A. a Gadas P. (2013). Geochemistry and petrogenesis of the normally zoned Sedmihoří Stock, Bohemian Massif: a case for nested emplacement of separately evolved granite magmas into shallow crust. *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, str.106

**Trubač, J.,** Janoušek V., Žák J., Gerdes A. (2013). Geochemistry and petrogenesis of a nested granite intrusion – the Sedmihoří composite Stock (Bohemian Massif). *Goldschmidt 2013 Florence*

Kochergina J., Ackerman L., **Trubač J.** (2013). Re-Os geochemistry of upper mantle xenoliths from Bohemian Massif. V. All-Russian Youth Scientific Conference; "Minerals: composition, properties, methods of investigation" 14-18 October

Gauert, Ch., **Trubač, J.,** Ackerman, L. (2014). Late-stage magmatic-hydrothermal mineral associations in the Ni-Cu-PGE sulphide-bearing (ultra-) basic Uitkomst Complex, South Africa. *IMA Conference, EG3*, 74.

Magna, T., Žák, K., Farkaš, J., **Trubač, J.**, Rodovská, Z., Šimeček, M., & Mizera, J. (2014). Lithium and Magnesium Isotopes in Sediments of the Ries Area: Constraints on the Sources of Moldavite Tektites. *LPI Contributions, 1800*, 5317.

Magna, T., Farkaš, J., Rodovská, Z., **Trubač, J.**, Georg, R. B., Holmden, C., & Žák, K. (2015, March). Magnesium, Silicon and Calcium Isotopes in Central European Tektites---Implications for High-Temperature Processes and Tracking Their Sources with the Ries Area Sediments. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 46, p. 2207).

## Lectures

**Trubač, J.** - Ackerman, L. - Walker, R. J. - Vondrovicová, L. (2011): Re-Os geochemistry of wolframite from Jeřmanice W-(Sn) mineralization, Bohemian Massif, Czech Republic. 27.9.2011. Antofagasta, Chile.

**Trubač, J.**, Janoušek V., Vrána S., Wiegand B. (2012): Nature, tectonic setting and likely origin of the Palaeoproterozoic (~2.1 Ga) Světlík orthogneisses (southern Bohemia). 10 th meeting of the Central European Tectonic Group Studies (CETEG), Zemplínska Šírava – Medvedia hora. Slovak Republic.

**Trubač, J.**, Janoušek V., Žák, J., Gerdes A. (2014): Geochemistry and petrogenesis of the Variscan Sedmihoří Stock (Teplá-Barrandian Unit): nested pulses of largely independent granite magmas into shallow crust. Bohemian Forest meeting - Šumava (Modrava), Czech Republic

---

## Summary:

**Number of publications in Web of Science:** 12  
**Times cited (WOS) without self-citations:** 38  
**H-index:** 3



“So do the stones speak, when all else is silent.”  
Linnaeus