

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

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

Studijní program: Geologie  
Study programme: Geology

Autoreferát disertační práce  
Summary of the Ph.D. Thesis



## **Localization of deformation in rocks with existing anisotropy: consequences for geodynamic interpretations**

Lokalizace deformace v anizotropních horninách:  
důsledky pro geodynamické interpretace

**Zita Bukovská**

Školitel/Supervisor: RNDr. Petr Jeřábek, PhD.

Konzultant/Consultant: Mgr. Ondřej Lexa, PhD.

Praha, 2015



## **Table of contents / Obsah**

Abstract .....	2
Introduction and aims of the study .....	3
Methods .....	3
Results and discussion .....	4
Conclusions .....	6
Abstrakt .....	8
Úvod a cíle práce .....	9
Metodika .....	9
Výsledky a diskuze .....	11
Závěry .....	13
References / Použitá literatura .....	14
Curriculum vitae .....	15
Selected publications / Seznam publikací .....	16

## Abstract

Localization of deformation occurs in Earth's crust as a consequence of applied stress and is widespread phenomenon that can be found in crustal rocks. Such localization of deformation can be mostly seen in a form of shear zones. Small shear zones referred as shear bands or S-C structures are often used as kinematic indicators. However, the evolution and kinematic continuity of such structures is not well identified, which makes it problematic when interpreting regional geodynamic evolution. Two possible cases were distinguished and described in this thesis: a) kinematically discontinuous S-C structures formed during two deformation events and b) kinematically continuous S-C structures formed during single deformation event. Kinematically unrelated S-C structures were studied in westernmost part of Tauern Window in Eastern Alps and in Gemer-Vepor Contact Zone in Central West Carpathians where previous geodynamic interpretations might have misinterpreted localization structures. Kinematically continuous shear bands were studied in South Armorican Shear Zone where the S-C fabrics were originally defined and described (Berthé et al., 1979).

Two fabrics that crosscut each other at small angles forming S-C geometries were documented during field work and studied from macroscale down to microscale or nanoscale. Main part of the work focused on microstructural analyses of the respective fabrics and its deformation microstructures, mineral assemblages and mineral chemistry changes, pressure-temperature conditions, age estimates etc.

Kinematically continuous S-C structures formed by several deformation mechanisms that are connected both to chemical changes in the rock as well as mechanical changes and presence of fluids. The observed relationships show dramatic weakening at brittle-plastic transition in non-steady-state regime. On the other hand presence of kinematically discontinuous S-C structures reveal polyphase evolution documenting burial and extensional exhumation of basement rocks, where the S and C fabrics form subparallel and crosscut each other at different conditions during different deformation events.

This thesis shows that proper distinguishing of kinematically continuous and discontinuous S-C structures/shear bands is fundamental while interpreting consequences for geodynamic evolution and detailed studies give important observations of interplay of deformation mechanisms and rock rheology.

## **Introduction and aims of the study**

This work is focused on the localization of deformation in rock with existing anisotropy, which can be seen in the form of S-C fabric (structure) or shear bands, and the interpretation of its significance in geodynamic studies. Therefore this work includes characterization of shear bands that are formed by deformation localization in broad spectra of conditions and from regional scale to the nanoscale. Since the S-C fabrics and shear bands were firstly described (Berthé et al., 1979; White, 1980; Gapais and White, 1982) these structures are often used for interpreting the rock geodynamic evolution, however, its detailed evolution and kinematic frame is not well known. The aim of this study was to describe the detailed evolution of shear bands within the regional field work and microstructural study. The field work was followed by macroscopic and microscopic analyses of deformation structures revealing the origin and evolution of shear bands and S-C fabrics (structures, geometries) as study on rocks from selected regions that are mostly Variscan in origin, however, have been reworked by several deformation phases during Variscan and/or Alpine formation. Field works were conducted in Tauern Window in Eastern Alps at the border of Austria/Italy, in Central West Carpathians in Slovakia and in Armorican Massif in France with the emphasis on S-C fabric and shear band characterization with respect to the regional evolution. The microstructural analyses were focused on characterization of shear band evolution with respect to deformation mechanisms, the estimate on pressure and temperature conditions, chemistry changes and its consequences for rheology.

## **Methods**

The basis for the study was the field work that included structural and petrological field documentation and sample collection. On the basis of field work the structural data was evaluated, rock thin sections were prepared and studied with microscopy methods. The microscopy included the conventional optical microscopy, microanalysis with the scanning electron microscope (SEM) with the use of backscattered electrons (BSE), secondary electrons (SE), hot and cold cathodoluminescence (CL) and backscattered electron diffraction (EBSD). In addition were used electron microprobe analysis, transmission electron microscopy and focused ion beam method. The analyses were obtained at the Institute of Petrology and Structural Geology at the Charles University in Prague, at Masaryk University in Brno, at the Freie Universität in Berlin, at the Helmholtz

Centre for Geosciences – GeoForschungsZentrum in Potsdam and at the Technische Universität in Vienna. The whole rock analyses were performed at the ACME labs in Canada and in the Laboratories of Czech Geological Survey in Prague. For the thermodynamic modelling of deformation conditions was used *Perple\_X* computational collection of Connolly (2005) in order to obtain the estimates on the pressure and temperature evolution of the studied deformational events. In order to establish the age of metamorphism the ICP-MS laser ablation on monazite was performed in the facility of the University of Bergen following the procedure of Košler et al. (2001). For the data management and microanalyses were used following softwares: *polyLX* toolbox for *Matlab*<sup>TM</sup> (Lexa, 2003) for the quantitative analyses of (micro)structural data including the *SURFOR* and *PAROR* methods of PannoZZo (1983, 1984), *mtex* toolbox for *Matlab*<sup>TM</sup> (Hielscher and Schaeben 2008) for crystallographic texture analysis, computer integrated polarization microscopy (CIP) (PannoZZo Heilbronner and Pauli, 1993), data management tool *pysdb* (<http://petrol.natur.cuni.cz/~ondro>), geographic information system *Quantum GIS* ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)) and the extension *pysdb read* for *QuantumGIS* (<http://petrol.natur.cuni.cz/~ondro>).

## **Results and discussion**

### Chapter I

The tectono-metamorphic evolution of the westernmost part of Tauern Window shows the importance of combining structural observations with petrological data. The structural record in the studied area is dominated by the Alpine deformations that exhumed the Variscan granitoids from below the overlying Penninic and Subpenninic nappes and Austroalpine units. The main foliation is flat to gently dipping towards NNW-SSE and follows the structure of the contact between the deformed granitoids of Venediger Duplex and the overlying rocks. This fabric contains in numerous different lithologies metamorphic garnet that is syn- to post-kinematic with respect to the S1 fabric and the estimated P-T conditions show prograde metamorphic path in the region. This fabric is mainly in Penninic and Subpenninic nappes overprinted by F2 folds that were formed in N-S shortening that is in the studied area followed by escape of the nappes to the W. All together the petrologic observations with the structural data show the kinematically unrelated S-C fabrics and the tectono-metamorphic evolution of Tauern Window comprising two E-W orogen-parallel extension phases related to the nappe stacking that formed the main S1 E-W stretching fabric later overprinted by the N-S shortening that steepened the nappe stack of

Venediger duplex and folded the overlying sequences and caused the response of second orogen-parallel extension and lateral escape towards W.

## Chapter II

In the study at the boundary region of major basement-cover Vepor and Gemer units in the Central West Carpathians the occurrence of S-C fabrics plays an important role. The study shows the structural evolution of the area together with metamorphic overprint and dating of the fabrics. The Vepor Unit and its contact zone is represented by orthogneiss, quartzite and chloritoid-kyanite schist. The S-C fabrics occur within a major detachment shear zone, which crosscuts the earlier imbricated structure related to overthrusting of the Gemer Unit over Vepor Unit. The formation of S-C fabric is thus associated with Cretaceous syn-burial orogen-parallel flow and subsequent exhumational unroofing. The formation of the two fabrics characterized by distinct quartz deformation microstructure and metamorphic assemblage is separated by an inter-tectonic growth of transversal chloritoid-, kyanite-,  $\pm$  monazite-bearing assemblage. The discussion shows that the S-C fabrics, as documented in this study area, reveals the kinematically unrelated formation of two sets of fabric. The age of this inter-tectonic metamorphic stage together with existing  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on exhumation of the Vepor Unit indicate that despite the similar appearance to shear bands or S-C mylonites there is at least 10 my time span between the formation of homogeneous S fabrics and superposed discrete C fabrics in the studied rocks. The S fabric formed during Early Cretaceous subhorizontal lateral flow associated with overthrusting of the Gemer Unit and burial of the Vepor Unit, while the C fabric originated via Late Cretaceous extensional shearing within the major detachment shear zone associated with exhumation of the Vepor Unit.

## Chapter III

The detailed microstructural study on the evolution of the originally defined S-C fabric from South Armorican Shear zone revealed a complicated story of deformation mechanisms changes its positive feedback to the chemical and mechanical processes. The fabrics are generally believed to be formed during the synkinematic cooling of plutons along the South Armorican shear zone at 315 – 300 Ma. The two fabrics formation differs by at least 200 °C in temperature. We describe three main stages of the shear band (C fabric) evolution that include initiation of shear band formation by microcracking (stage I) followed by subgrain rotation recrystallization in quartz and coeval dissolution precipitation creep (stage II) in microcline. The recrystallizing quartz data allowed us to discuss some mechanical

constraints on microcline dissolution precipitation which suggest creep at 17 – 26 MPa differential stress and the strain rate of  $1.8 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ . The stage III is characterised by localized slip on white mica bands accommodated by dislocation creep at strain rate  $1.8 \cdot 10^{-14} \text{ s}^{-1}$  and stress 5.75 MPa. The discussion includes the geometrical constraints on the shear band and S-C fabric evolution as well as the mechanisms and its response in the deforming granites in the shear zone that is connected to the fluid presence and rheological implications. The mechanical data point to non-steady-state evolution of the brittle-plastic transition in the South Armorican Shear Zone characterized by major weakening to strengths lower than 10 MPa.

#### Chapter IV

Pressure solution features in the orthogneiss from South Armorican Shear Zone were studied in the means of transmission electron microscopy in places previously chosen with optical microscopy. The pressure solution features were found in great extent at the interfaces of quartz, K-feldspar and white mica. At the interfaces of quartz and white mica the pressure solution of quartz follows the dislocations and is related to the crystallographic orientation of the quartz grains. Solution pits are formed at the interfaces that are parallel to the basal planes of white mica while where the white mica basal planes are perpendicular the mica overgrows the quartz. In order to see the 3D extent of these features the focused ion beam was used to produce the 3D view on the interface changes which shows the continuity of the pits that were formed at the interface. In case the mica basal planes are at acute angle to the quartz interface the amorphous layers occur. In case of K-feldspar and white mica interfaces the K-feldspar is being dissolved or leached which is a reason for amorphous layer formation. The observed features are discussed with respect to the previously described models that describe the dissolution precipitation creep (e.g. Gratier et al., 2013; Wassmann and Stöckhert, 2013), formation of amorphous layers via interface-coupled dissolution precipitation creep as described by Hellmann et al. (2012). In order to understand the pressure solution on such interfaces the discussion on the main compressive stress orientation is included. Our data show that within the presence of external stresses the respective crystallographic orientation of phases plays a major role, as well as the fluid presence that directly dissolve the mineral phases, and the local dislocation density or more general the defect density.

## **Conclusions**

Crustal rocks respond to the stress concentrations in different manner, thus localization of deformation is very important mechanism while dealing with



stresses in the crust. This work is mainly concentrated on the formation of S-C fabrics and shear bands in rocks and its geodynamic interpretation. The geometric relationship of the S-C fabric is important while interpreting rock deformation history however the relationship between the fabric and metamorphic conditions is of greater importance. Studied rocks in different regions show either kinematically continuous or discontinuous S-C structures, which are formed during single phase or multiple deformation phases. Localized fabrics have in detail quite complicated evolution of several deformation mechanisms connected to chemistry changes and fluid presence through the positive feedback. The observations in this study show this at different scales - going from the tectono-metamorphic evolution on regional scale as represented by regional studies in Central West Carpathians and Tauern Window towards the microscale unrevealing the evolution of S-C fabrics in Central West Carpathians and SASZ up to nanoscale observations of pressure solution. All these observations are important for the rock rheology nevertheless it accounts for pressure solution or the rheological response on shear bands in orthogneisses. On a larger scale such processes even from the nanoscale are important for allowing plate tectonic processes (Platt and Behr, 2011).

## Abstrakt

Lokalizace deformace se vyskytuje v zemské kůře jako důsledek aplikovaného napětí a je rozšířeným fenoménem, který lze sledovat v korových horninách. Obvykle se lokalizace deformace projevuje ve formě střížných zón. Střížné zóny malého měřítka označované jako střížné pásy (shear bands), které jsou součástí S-C struktur jsou často využívány jako kinematické indikátory, ačkoli jejich vývoj, kinematický rámec a kontinuita nejsou dobře definovány. Interpretace geodynamického vývoje nemusí být pak jednoznačná a snadná. Z hlediska kinematické kontinuity a vývoje byly rozlišeny a popsány dva typy S-C struktur: a) kinematicky nekontinuální S-C struktury tvořené v průběhu více deformačních událostí a b) kinematicky kontinuální S-C struktury tvořené během jediné deformační události. Kinematicky nekontinuální S-C struktury byly studovány v západní části Taurského okna ve Východních Alpách a v Gemersko-veporské kontaktní zóně v Centrálních Západních Karpatech, kde předcházející geodynamické interpretace misinterpretovaly význam struktur lokalizace deformace. Kinematicky kontinuální S-C struktury byly studovány v Jihoarmorické střížné zóně, kde byly S-C struktury definovány a poprvé popsány (Berthé a kol., 1979).

Navzájem protínající se stavby pod malými úhly tvořící S-C geometrie byly dokumentovány v rámci terénních prací a dále studovány od makroměřítka, přes mikroměřítka až k nanoměřítka. Hlavní část práce byla věnována mikrostrukturním analýzám jednotlivých staveb a deformačním mechanismům, minerálním asociacím a změnám chemického složení minerálů, teplotně-tlakovým podmínkám, věkovým odhadům apod.

Kinematicky kontinuální S-C struktury jsou tvořené sledem několika deformačních mechanismů provázaných jednak s chemickými změnami v hornině, tak s mechanickými změnami a přítomností fluid. Sledované vztahy ukazují na významné snížení pevnosti v oblasti křehce-plastického rozhraní a nerovnovážený vývoj. Z druhé strany přítomnost kinematicky nekontinuálních S-C struktur odhaluje polyfázový vývoj zahrnující pohřbení a následnou exhumaci korových hornin v extenzním režimu, kdy subparalelní stavby S a C jsou tvořeny v průběhu odlišných deformačních událostí a za odlišných podmínek.

Tato disertační práce ukazuje, že detailní rozlišení kinematicky kontinuálních a nekontinuálních S-C struktur je zásadní pro interpretace geodynamického vývoje a podává důležité poznatky o propojení deformačních mechanismů a reologie hornin.

## Úvod a cíle práce

Tato práce je zaměřena na fenomén lokalizace deformace v horninách s existující anizotropií, která se projevuje formací např. střížných pásů, a interpretaci lokalizace deformace v úvahách o geodynamickém vývoji. Práce se tak zahrnuje charakterizaci struktur střížných pásů vznikajících lokalizací deformace v široké škále podmínek od regionálního měřítko přes mikro- až po nano-měřítko. Od doby, kdy byly poprvé popsány S-C stavby (Berthé a kol., 1979) a střížné pásy (White, 1980; Gapais a White, 1982) se přítomnost těchto struktur běžně využívá při interpretaci geodynamického vývoje, ačkoli jejich detailní vývoj není znám. Terénní výzkum byl doplněn o detailní makroskopickou a mikroskopickou analýzu deformačních struktur objasňující vznik struktur střížných pásů (shear bands) a tzv. S-C geometrií na příkladu vybraných hornin převážně variského stáří, které podlely obvykle vícenásobným deformačním událostem v průběhu variské a/nebo alpské orogeneze. Terénní práce proběhly v centrálních Západních Karpatech, armorickém masivu ve Francii a Taurském okně ve Východních Alpách s důrazem na charakterizaci S-C geometrií a střížných pásů v návaznosti na regionální geologický vývoj. Mikrostrukturní práce se zaměřily na charakteristiku deformačních mechanismů spjatých se vznikem těchto struktur s ohledem na objasnění deformačních mechanismů, odhadů teplotních a tlakových podmínek, změn chemismu a konsekvencí pro reologii studovaných korových hornin.

## Metodika

Základem celé práce byl terénní výzkum zahrnující strukturní a petrologickou dokumentaci a sběr vzorků. Na základě terénního výzkumu byla dále evaluována strukturní data, ze vzorků byl vytvořen výbrusový materiál, který byl dále studován mikroskopickými metodami s ohledem na mikrostrukturu a minerální a chemické složení hornin. Mikroskopické metody zahrnují kromě konvenční optické mikroskopie elektronovou mikroanalýzu na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) za využití zpětně odražených elektronů (BSE), sekundárních elektronů (SE) a difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD). Dále také mikrosondové analýzy (EMPA), transmisní elektronovou mikroskopii (TEM) a metodu koncentrovaného iontového proudu (focused ion beam, FIB). Bylo využito analytické vybavení pracovišť na Ústavu petrologie a strukturní geologie Univerzity Karlovy v Praze, Masarykovy univerzity v Brně, Freie Universität v Berlíně, Helmholtz Centre for Geosciences – GeoForschungsZentrum v Postupimi a Technische Universität ve Vídni.

Analýzy základních oxidů celkového složení hornin byly provedeny v laboratořích ACME Labs v Kanadě a Laboratořích České geologické služby v Praze. Pro modelování termodynamických podmínek deformačních fází bylo využito programu *Perple\_X* (Connolly, 2005), který umožňuje na základě známého horninového složení a přítomných minerálních asociací odhadnout teplotní a tlakové podmínky daných metamorfních událostí. Pro zjištění stáří metamorfózy bylo využito datování monazitů pomocí metody ICP-MS laserové ablace provedené na Univerzitě v Bergenu podle postupu popsaného Košlerem a kol. (2001). Pro zpracování dat bylo využito množství softwarových nástrojů určených pro mikroanalýzu – *polyLX toolbox for Matlab™* (Lexa, 2003) pro kvantitativní analýzu (mikro)strukturních dat, včetně metod PAROR a SURFOR (PannoZZo, 1983, 1984), *mtex toolbox for Matlab™* (Hielscher a SchaeBen 2008) pro analýzu krystalografických textur, počítačově integrovaná polarizační mikroskopie (CIP) (PannoZZo Heilbronner a Pauli, 1993), databázový nástroj pro strukturní data *pysdb* (<http://petrol.natur.cuni.cz/~ondro>), geografický informační systém Quantum GIS ([www.qgis.org](http://www.qgis.org)) a extenze *pysdb read* pro Quantum GIS (<http://petrol.natur.cuni.cz/~ondro>).

## Výsledky a diskuze

### Kapitola I.

Studium vývoje západní části Taurského okna ukazuje důležitost kombinace strukturních a petrologických dat. Strukturní vývoj ve studované oblasti je dominován alpskými deformačními událostmi, které vedly k exhumaci varských granitoidů z nadložních peninských a subpeninských příkrovů a příkrovů austroalpinika. Dominantní foliace S1 upadá ploše až mírně k SSZ-JJV a opisuje tak strukturu kontaktu granitoidů a nadložních hornin. Tato stavba se projevuje ve všech horninách a velmi často obsahuje metamorfni granát, který je syn- až post-metamorfni ve vztahu ke stavbě S1 a modelované teplotně-tlakové podmínky prokázaly jeho prográdní růst. Stavba S1 je v některých částech studovaného území přetisknuta zkrácením ve směru S-J (D2) a převážně v Z části studovaného je zaznamenána lokalizované S3 – ve formě kliváže, individuálních stříhů nebo vrás s poklesovou kinematikou k Z. Strukturní data v kombinaci s petrologickými prokázala přítomnost dvou fází extenze paralelní ose orogenu. Stavba S1 a růst prográdních granátů souvisí s roztékáním granitoidních příkrovů v Z-V směru pod nadložními jednotkami v rámci V-Z extenze, dále je tento soubor příkrovů zkrácen a vrásněn v S-J směru (D2) a tím je vyvolána druhá V-Z extenze a únik příkrovů k Z (D3) za odstřešení granitoidních hornin.

### Kapitola II.

V práci věnované kontaktní zóně významného rozhraní fundamentu veporské jednotky a nadložní gemerské jednotky v centrálních západních Karpatech hraje přítomnost S-C staveb významnou roli. Studie představuje strukturní vývoj oblasti ve spojení s metamorfni přetiskem a datováním jednotlivých staveb. Veporská jednotka a její kontaktní zóna jsou reprezentovány ortorulami, kvarcity a chloritoidovými břidlicemi s kyanitem. S-C stavby se vyskytují v oblasti významné střížné zóny odloučení, která protíná dříve imbrikovanou strukturu spojenou s nasunutím gemerské jednotky na veporskou. Tvorba S-C staveb je spjatá s křídovým násunem a tokem paralelním orogenu a s ním souvisejícím exhumačním odstřešením. Formace dvou staveb vytvářejících S-C geometrie je charakterizována dvěma odlišnými křemennými deformačními mikrostrukturami a metamorfni asociacemi oddělenými intertektonickým přerůstáním chloritoid-, kyanit- a monazitové asociace. Diskuze ukazuje, že S-C stavby dokumentované v této oblasti jsou tvořené dvěma kinematicky nezávislými deformačními událostmi. Věk této intertektonické asociace se ve srovnání s publikovanými  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  daty exhumace veporské jednotky liší o 10 milionů let, které oddělují formaci těchto dvou staveb. Stavba S

vznikala v rámci raně křídového subhorizontálního laterálního toku asociovaného s nasunutím gemerské jednotky a pohřbením veporské jednotky, zatímco stavba C souvisí s pozdně křídovým odstřešením veporské jednotky a laterálním ústupem gemerské jednotky k východu.

### Kapitola III.

Detailní mikrostrukturní studie vývoje S-C staveb z jihoarmorické střížné zóny ve Francii, kde byly poprvé definovány, odhalila komplikovanou souhru změn deformačním mechanismů a jejich pozitivní zpětnou vazbu s chemickými a mechanickými procesy v hornině. Obecně je růst těchto staveb spojován se synkinematickým chlazením plutonů podél jihoarmorické střížné zóny mezi 315 – 300 Ma. Formace těchto staveb se liší v teplotě o 200 °C. V této práci jsou vymezeny tři stádia růstu střížných pásů (C stavby), které zahrnují iniciaci střížných pásů mikrofrakturací (fáze I), následovaným subzrnovou rotační rekrystalizací křemene a zároveň tokem rozpouštění a precipitace (dissolution-precipitation creep) v mikroklinu (fáze II). Data získaná z rekrystalovaných křemenných zrn umožnila diskuzi mechanických souvislostí rozpouštění mikroklinu, která naznačuje tok za diferenciálního napětí 17 – 26 MPa a rychlosti deformace  $1,8 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ . Fáze III je charakterizována lokalizovaným skluzem na páscích světlých slíd akomodovaným dislokačním tokem za rychlosti deformace  $1,8 \cdot 10^{-14} \text{ s}^{-1}$  a napětí 5,75 MPa. Diskuze zahrnuje geometrický vývoj S-C staveb a střížných pásů, dále deformační mechanismy a jejich důsledky v granitoidech deformovaných ve střížné zóně a jejich souvislost s přítomností fluid a reologické důsledky. Mechanická data naznačují nerovnovážený vývoj na křehko-plastickém rozhraní v jihoarmorické střížné zóně charakterizovaný významným změkčením k pevnostem nižším než 10 MPa.

### Kapitola IV

Známky tlakového rozpouštění byly studovány pomocí transmisní elektronové mikroskopie v ortorule z jihoarmorické střížné zóny, na místech, která byla dříve vytipována za pomoci optické mikroskopie. Doklady tlakového rozpouštění byly nalezeny v překvapivě velkém rozsahu na rozhraních mezi křemenem, draselným živcem a světlou slídou. Na rozhraních zrn křemene a světlé slídy bylo pozorováno, že k tlakovému rozpouštění dochází v místech, kde jsou na hranici zrna přítomny dislokace a zároveň že významnou roli hraje krystalografická orientace jednotlivých zrn křemene. Nepravidelné a nedoléhající hranice zrn s nově tvořenou porozitou jsou přítomny tam, kde bazální plochy slídy jsou paralelní s rozhraním. Pokud jsou bazální plochy slídy kolmé, dochází k přerůstání

křemene slídou, v případě že jsou bazální plochy zrn slíd šikmo vůči rozhraní, pak se na rozhraní nachází amorfni vrstvy. Pro ověření 3D efektu takovéto novotvořené porozity byla využita metoda koncentrovaného iontového proudu (FIB), pomocí které byl sledován a ověřen rozsah těchto prostorů podél rozhraní zrn slídy a křemene. Na rozhraních draselného živce a slídy byly také pozorovány novotvořené prostory mezi zrny na nerovných rozhraních a dále také amorfni vrstvy draselného živce, který byl v přítomnosti slíd vyleptán na vrstvy o chemismu blízkém vermikulitu. Pozorování byla diskutována především vzhledem k modelům fungování mechanismu rozpouštění a precipitace či tlakového rozpouštění (např. Gratier a kol., 2013; Wassmann a Stöckhert, 2013). Kromě modelu kanálů a ostrovů (channel and island model (podle Wassmann a Stöckhert, 2013) byla potvrzeno také fungování modelu formace amorfni vrstev Hellmanna a kol. (2012) přes rozpouštění spjaté s rozhraním zrn (interface-coupled dissolution and precipitation).

## **Závěry**

Korové horniny reagují na koncentraci napětí v různých formách, lokalizace deformace je jedním z nejvýznamnějších projevů. Tato práce je zaměřena na vývoj S-C staveb, resp. střížných pásů a význam jejich studia. Geometrický vztah S-C staveb je významný pro interpretaci deformace hornin, ale vztah mezi deformací a metamorfózou hornin je u S-C staveb zásadnější. Studované horniny v různých regionech odhalily komplikovaný vývoj, který probíhá za jedné nebo za několika naložených deformačních událostí – kinematicky kontinuální a diskontinuální S-C struktury. Vznik S-C staveb zahrnuje více deformační mechanismů spjatých s chemickými změnami v hornině a přítomnosti fluid skrze pozitivní odezvu systému. Pozorování dokumentovaná v této práci ukazují důležitost propojení výše zmíněných faktorů na široké škále od regionálního měřítka reprezentovaného studiiemi z Taurského okna a centrálních Západních Karpat, přes mikroměřítko odhalující vývoj střížných pásů a S-C staveb z centrálních Západních Karpat a jihoarmorické střížné zóny až k tlakovému rozpouštění v nanoměřítku. Tyto poznatky jsou důležité pro interpretaci reologie korových hornin bez ohledu na to, zda se jedná o tlakové rozpouštění na hranicích zrn či odezvu ortoruly na formování střížných pásů. Zároveň jsou tyto procesy od nanoměřítka významné pro fungování deskových procesů (Platt a Behr, 2011).

## References / Použitá literatura

Berthé D., Choukroune P., Jegouzo P. (1979). Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *J Struct Geol* 1, 31-42.

Connolly, J.A.D. (2005). Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1), 524-541.

Gapais, D., White, S.H. (1982). Ductile shear bands in a naturally deformed quartzite. *Textures and Microstructures*, 5, 1-17.

Gratier J.P., Dysthe D.K., Renard F. (2013). The role of pressure solution creep in the ductility of the Earth's upper crust. *Advances in Geophysics* 54: 47-179

Hielscher, R., Schaeben, H., 2008. A novel pole figure inversion method: specification of the MTEX algorithm. *Journal of Applied Crystallography*, 41, 6, 1024–1037.

Hellmann R, Wirth R, Daval D, Barnes J-P, Penisson J-M, Tisserand D, Epicier T, Florin B, Hervig RL (2012). Unifying natural and laboratory chemical weathering with interfacial dissolution-precipitation: A study based on the nanometer-scale chemistry of fluid-silicate interfaces. *Chem Geol*, 294-295, 203-216.

Lexa O. (2003). Numerical approach in structural and microstructural analyses. PhD Thesis, *Charles University in Prague*.

Košler J., Tubrett M., Sylvester P. (2001). Application of laser ablation ICP-MS to U–Th–Pb dating of monazite. *Geostandards Newsletter*, 25, 375-386.

Panozzo R. (1983). Two-dimensional analysis of shape-fabric using projections of digitized lines in a plane. *Tectonophysics*, 95, 279-294.

Panozzo R. (1984). Two-dimensional strain from the orientation of lines in a plane. *Journal of Structural Geology*, 6, 215-221.

Panozzo Heilbronner R., Pauli C. (1993). Integrated spatial and orientation analysis of quartz *c*-axes by computer-aided microscopy. *Journal of Structural Geology* 15, 369-382.

Platt J.P., Behr W.M. (2011). Lithospheric shear zones as constant stress experiments. *Geology*, 39 (2), 127-130.

Wassmann S, Stöckhert B (2013) Rheology of plate interface – Dissolution precipitation creep in high pressure metamorphic rocks. *Tectonophysics*, 608, 1-29, doi: 10.1016/j.tecto.2013.09.030.

White, S.H., Burrows, S.E., Carreras, J., Shaw, N.D., Humpreys, F.J., (1980). On mylonites in ductile shear zones. *Journal of Structural Geology*, 2, 175-187.



## Curriculum vitae

Date and place of Birth: 6<sup>th</sup> February 1986 in Prague, CZ  
Nationality: Czech  
Home address: Křižovnická 60/10  
110 00 Prague 1  
Work address: Czech Geological Survey  
Klárov 131/3  
118 21 Prague 1  
Telephone: +420 257 089 488

### Education/Qualifications:

2010 – present Charles University, Faculty of Science, Prague, CZ  
Postgraduate Study of Geology  
I/2014 - present Czech Geological Survey, Prague, CZ  
Research Fellow  
XI/2013 – V/2014 Free University, Berlin and German Research Centre  
GFZ Potsdam, Erasmus Practical Placement Research  
Fellow  
2010 Master Degree in Structural Geology  
2005 – 2010 Charles University, Faculty of Sciences, Prague, CZ  
Undergraduate Study of Geology  
VIII – XII/2009 University of Tromsø, Erasmus Study Programme  
II – VI/2009 Lomonosov Moscow State University, scholarship in  
Geodynamics  
2008 Bachelors Degree in Geology, Charles University in  
Prague, CZ  
2001 – 2005 Gymnazium Arabská, Prague  
High school with direction to natural sciences

### Other educative experiences:

VI/2015 PETROCHRO 2015, University of Potsdam  
III - VI/2014 MOOC Reservoir Geomechanics, Stanford University  
IV/2014 Geo.X Spring School: Methods in Geosciences, Berlin,  
Potsdam, Germany  
XI/2013 Thermocalc and Perple\_X modelling shortcourse, Charles  
University in Prague, Czech Republic  
III/2012 Seafloor mineral resources: Scientific, Environmental and  
Societal Issues: international workshop, GEOMAR Kiel,  
Germany

II/2012	Shortcourse on microstructure and texture analysis using MATLAB toolboxes, University of Vienna, Austria
V/2011	Geomaterials - quantitative analysis of microstructures and textures, Charles University, Prague, Czech Republic
VIII/2010	First EGU Summer School, Neveesee Area, Italy
VII/2009	Characterization, interpretation and modelling of metamorphic textures, Conference Granulites and Granulites 2009, Charles University in Prague, Czech Republic
VI/2009	Image analysis workshop, Basel University, Switzerland

### **Funded projects:**

Grant Agency of the Charles University in Prague, CZ, 2012-2013: “Localization of deformation within anisotropic systems”

Grant Agency of the Charles University in Prague, CZ, 2014: “Structural and metamorphic evolution of a tectonic window, an example from western part of Tauern Window, Eastern Alps”

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

Bukovská Z., Jeřábek, P., in preparation. Two separate orogen-parallel extension events in the Tauern Window revealed by crystallization – deformation relations. *Journal of Metamorphic Petrology*

Bukovská, Z., Jeřábek, P., Morales, L.F.G., submitted. Major softening at brittle-plastic transition due to interplay between chemical and deformation processes: an insight from evolution of shear bands in the South Armorican Shear Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.

Bukovská, Z., Wirth, R., Morales, L.F.G., accepted. Pressure solution in rocks: FIB/TEM study on orthogneiss from South Armorican Shear Zone, France. *Contributions to Mineralogy and Petrology*.

Bukovská, Z., Jeřábek, P., Lexa, O., Konopásek, J., Janák, M., Košler, J., 2013. Kinematically unrelated C-S fabrics: an example of extensional shear band cleavage from the Vepor Unit, West Carpathians. *Geologica Carpathica* 64, 2, 103-116.