

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Ložisková geologie



Bc. Pavla Kocíková

Greiseny Slavkovského lesa a jejich stavební a sochařské využití

Greisens of Slavkovský les and their use as building and sculptural stone

Diplomová práce

Vedoucí závěrečné práce: prof. Mgr. Richard Příkryl, Dr.

Praha, 2014

Prohlášení:

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

V Praze 5. 5. 2014

Podpis:

ABSTRAKT

Použití greisenu, horniny těžené primárně pro získávání (Sn-W) rudní složky, v sochařství a stavebnictví je pro oblast Slavkovského lesa a blízkého okolí typické. Materiál těžený v greisenizovaném žulovém pni u Pramenů jako stavební kámen byl také zdrojovou lokalitou přírodního kamenného materiálu použitého při stavbě cenné barokní památky – sloupu Nejsv. Trojice v nedalekém městě Teplá.

Pro studium vlastností původního kamenného materiálu těženého u Pramenů byly analyzovány vzorky odebrané v opuštěném lomu na stavební kámen. Tyto vzorky byly za účelem potvrzení zdrojové lokality původního kamenného materiálu porovnány s materiálem odebraným z památky při předrestaurátorském průzkumu. Provenience původního kamenného materiálu byla zjištěna na základě srovnání kvalitativních a kvantitativních petrografických a mikrostrukturních parametrů. Mikroskopickým pozorováním s použitím petrografické obrazové analýzy (PIA) byly určeny a kvantifikovány mikrostrukturní petrografické parametry studovaných vzorků. Distribuce akcesorických fází a mikrostrukturní charakteristiky byly sledovány s použitím katodové luminescence. U materiálu odebraného v opuštěném lomu byly dále stanoveny indexové fyzikální a dynamické přetvárné vlastnosti s ohledem na využití materiálu v sochařství a stavebnictví.

Studovaný materiál z opuštěného lomu na stavební kámen nacházejícího se jz. od obce Prameny byl na základě kvalitativních a kvantitativních petrografických vlastností zjištěných petrografickou obrazovou analýzou klasifikován jako greisenizovaný granit. Stejně byl klasifikován i materiál odebraný z vlastní architektury sloupu. Studovaný materiál získaný z balustrády oproti ostatním neobsahuje hojně živce a klasifikujeme ho jako slídnato-křemenný greisen.

Zjištěné indexové fyzikální a dynamické přetvárné vlastnosti materiálu z lomu poukazují na změny v těchto vlastnostech způsobené postmagmatickými alteračními procesy. Hornina má např. výrazně větší pórovitost (~6 obj. %) oproti granitům, ze kterých vznikla, což přispělo k možnosti snazšího kamenosochařského opracování.

Vzhledové a dekorační vlastnosti greisenizovaných granitů a greisenů nejsou nikterak výjimečné, proto předpokládáme využívání tohoto kamenného materiálu pouze v oblastech těžby Sn rud z greisenů, kde docházelo k aplikaci v sochařství a stavebnictví v návaznosti na efektivní využívání lokálního zdroje.

SUMMARY

Use of greisen – a rock mined primarily for (Sn-W) ore components – in sculpture and construction industry is typical for the Slavkovský les area and its surroundings. Material mined in the greisenized granite stock near Prameny for construction purposes was the source of stone used for a valuable Baroque sight – the Holy Trinity column in a nearby town of Teplá.

Samples collected in the abandoned construction stone quarry were analysed for the study of properties of the original material mined in the locality Prameny. These samples were compared with the material collected from the monument in the pre-restoration research to prove the source locality of the original material. Provenance of the original material was determined on the basis of qualitative and quantitative petrographic and micro-structural characteristics. Micro-structural petrographic parameters of the studied samples were determined by the microscopic study using the Petrographic Image Analysis (PIA). Distribution of accessories and micro-structural characteristics were observed using the cathode-luminescence. Conventional index and mechanical parameters with respect to the use of the material in construction industry and sculpture were determined for the material collected in the abandoned quarry.

Studied material collected in the abandoned quarry SW of the village was determined as greisenized granite on the basis of qualitative and quantitative petrographic and micro-structural characteristics obtained by the microscopic study using the Petrographic Image Analysis (PIA). The same results were obtained for the material of the historical column. On the contrary, material collected from the balustrade does not contain abundant feldspar and so it is classified as quartz-mica greisen.

Measured conventional index and mechanical parameters of the material from the quarry show changes in these properties caused by postmagmatic alteration processes. For example, the rock has a significantly higher porosity (~6 vol. %) compared to granites, from which it originated, which contributed to the possibility of stone-sculpturing processing.

Appearance and decorative properties of the greisenized granite and greisen are not extraordinary, that is why we expect that this material was only used in the areas of Sn ores mining from greisen, where the use of the material in sculpture and construction was efficient due to the local source of material.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ	2
2.1	Greiseny a jejich využití	2
2.2	Přírodní kámen	3
2.3	Petrografické vlastnosti	3
2.4	Fyzikální vlastnosti	5
2.5	Metodika určování zdrojových oblastí přírodního kamene z památek	5
3	GEOLOGIE KRYSTALINIKA SLAVKOVSKÉHO LESA	8
3.1	Geologická stavba oblasti a její vývoj	8
3.2	Metalogeneze krystalinika Slavkovského lesa	9
3.3	Žulový peň u Pramenů	9
4	PŘÍKLADY POUŽITÍ GREISENU V SOCHAŘSTVÍ A STAVEBNICTVÍ	12
4.1	Barokní sloup Nejsv. Trojice v Teplé	12
5	STUDOVANÉ VZORKY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ	14
5.1	Odběr a zpracování vzorků	14
5.2	Základní principy a popis jednotlivých metod	15
5.2.1	Petrografické zkoumání	15
5.2.2	Skenovací elektronová mikroskopie s bodovou analýzou	15
5.2.3	Katodová luminiscence	15
5.2.4	Petrografická obrazová analýza PIA	16
5.2.5	Stanovení fyzikálních vlastností	17
6	VÝSLEDKY	18
6.1	Petrografické vlastnosti studovaného materiálu z opuštěného lomu u Pramenů	18
6.1.1	Makroskopický popis	18
6.1.2	Základní optická mikroskopie	18
6.2	Elektronová mikroanalýza SEM	19
6.3	Petrografické vlastnosti materiálu ze sloupu Nejsv. Trojice	21
6.3.1	Makroskopický popis	21
6.3.2	Základní optická mikroskopie	21
6.4	Elektronová mikroanalýza SEM	23
6.5	Kvantitativní stanovení pomocí petrografické obrazové analýzy	24
6.6	Katodová luminiscence	26
6.7	Fyzikální vlastnosti horniny odebrané z lomu	28
7	DISKUSE	30
7.1	Aplikace greisenů ve stavebnictví a sochařství	30

7.2	Evropské variscidy - greiseny.....	30
7.3	Možnosti stanovení zdrojové oblasti greisenů na památkách.....	31
7.4	Fyzikální vlastnosti horniny odebrané v lomu	33
7.5	Zonálnost greisenových těles.....	34
7.6	Sloup Nejsv. Trojice v Teplé	34
8	ZÁVĚR.....	36
9	LITERATURA	37

Seznam obrázků

- 1 Klasifikační diagram greisenů
- 2 Schématické znázornění testování horninového materiálu v lomech, laboratoři a na památkách
- 3 Poloha zájmové oblasti (greisenizovaného žulového pně jz. od Pramenů) v rámci ČM
- 4 Geologická skica greisenizovaného žulového pně u Pramenů
- 5 Současný stav opuštěného lomu založeného v greisenizovaném žulovém pni u Pramenů
- 6 Barokní sloup Nejsvětější Trojice na Masarykově nám. v Teplé
- 7 Příklad aplikace greisenu ve stavebnictví – budova obecního úřadu v obci Prameny
- 8 Příklad aplikace greisenu ve stavebnictví – kostel Nejsvětější Trojice v Nové Vsi
- 9 Mikrofotografie studovaného vzorku 146C se zkříženými a paralelními nikoly
- 10 Mikrofotografie studovaného vzorku 146D se zkříženými a paralelními nikoly
- 11 Rozsah zrnitosti analyzovaných křemenných zrn ve studovaných materiálech v SEM-BSE, SEM-CL – apatit
- 12 Mikrofotografie studovaného vzorku 146D v SEM-BSE a SEM-CL – zonálnost křemene
- 13 Mikrofotografie výbrusu S0258/IV se zkříženými a paralelními nikoly
- 14 Mikrofotografie výbrusu S0258/V se zkříženými a paralelními nikoly
- 15 Mikrofotografie výbrusu S0258/VI se zkříženými a paralelními nikoly
- 16 Mikrofotografie výbrusu S0258/VII se zkříženými a paralelními nikoly
- 17 Mikrofotografie výbrusu S0258/VIII se zkříženými a paralelními nikoly
- 18 Mikrofotografie studovaného vzorku S0258/IV v SEM-BSE
- 19 Mikrofotografie studovaného vzorku S0258/V v SEM-BSE
- 20 Mikrofotografie studovaného vzorku S0258/VII a S0258/VIII v SEM-BSE
- 21 Poměrné zastoupení hlavních horninotvorných součástí ve studovaných materiálech z opuštěného lomu (I), z vlastní architektury sloupu (II) a balustrády (III)
- 22 Rozsah zrnitosti analyzovaných křemenných zrn ve studovaných materiálech
- 23 CL - mikrofotografie studovaného vzorku 146C

- 24 CL - mikrofotografie studovaného vzorku S0258/IV a V
- 25 CL - mikrofotografie studovaného vzorku 146D
- 26 CL - mikrofotografie studovaného vzorku S0258/VI
- 27 CL - mikrofotografie studovaného vzorku S0258/VII a VIII
- 28 Evropské variscidy
- 29 Nově osazené kuželky balustrády sloupu Nejsvětější Trojice na Masarykově náměstí v Teplé

Seznam tabulek

- 1 Technické požadavky na přírodní stavební kámen používaný k dalšímu zpracování v kamenické výrobě
- 2 Přehled zpracovaných vzorků a použitých metod
- 3 Petrografická obrazová analýza – základní měřené mikrostrukturní parametry
- 4 Průměrné hodnoty indexových fyzikálních vlastností vzorků horniny odebraných z opuštěného lomu u Pramenů 146C a 146D
- 5 Průměrné hodnoty dynamických přetvárných vlastností vzorků horniny odebraných z opuštěného lomu u Pramenů 146C a 146D
- 6 Porovnání složení horninového materiálu ve třech studovaných skupinách vzorků
- 7 Poměrné zastoupení hlavních horninotvorných součástí a zrnitost studovaných materiálů z opuštěného lomu (I) z vlastní architektury sloupu (II) a z balustrády (III)

Seznam použitých zkratk

Alb.	albit
Apt.	apatit
AM	Armorický masív
ASTM	American Society for Testing Materials
BSE	zpětně odražené elektrony
CL	katodová luminiscence
Cwl	Cornwall
ČM	Český masív
ČSN	Česká státní norma
EDS	energiově disperzní spektrometr

ICP – MS	hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem
ISRM	International Society of Rock Mechanic
Kfs.	draselný živec
OM-CL	optická katodová luminiscence
PIA	Petrographic Image Analysis
RTG	rentgenové záření
REE	prvky vzácných zemin
SEM	skenovací elektronový mikroskop
SEM-CL	skenovací katodová luminiscence
TEM	transmisní elektronový mikroskop
ÚGMNZ	Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů
ÚPSG	Ústav petrologie a strukturní geologie
XRD	rentgenová difrakce

Seznam příloh za textovou částí

- I Petrografický popis studovaných vzorků s mikrofotografiemi
- II Výsledky bodových analýz chemického složení SEM-EDS
- III Výsledky měření parametrů PIA
- IV Výsledky fyzikálních vlastností materiálu odebraného z opuštěného lomu u Pramenů
- V Výsledky silikátové analýzy

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému školiteli prof. Mgr. Richardu Příkrylovi, Dr. za spolupráci při tvorbě této práce. Dále všem ostatním, kteří se mnou konzultovali, případně se podíleli na přípravě vzorků a dalších procesech spojených s tvorbou této práce.

1 ÚVOD

Tato práce je zpracována v rámci grantového projektu Ministerstva kultury České republiky "Přírodní kámen v sochařství a architektuře zemí koruny České - komplexní znalostní systém o zdrojích, vlastnostech, využití, trvanlivosti, historie využití, kompatibilitě a vzájemné zaměnitelnosti".

Greiseny jsou v České republice spojovány převážně s významným cín - wolframovým (Sn-W) zrudněním vázaným na variské granitoidní plutony sasko-durynské oblasti. Jedná se o hydrotermálně alterované granitické horniny s převahou křemene a slíd, které obvykle tvoří svrchní část granitových elevací (Breiter 2012).

Klasickou oblastí s výskytem greisenizovaných žul je Slavkovský les, dnes chráněná krajinná oblast. Nachází se jihozápadně od Karlových Varů a tvoří významnou oblast ložiskových akumulací variské metalogeneze s dlouhou a bohatou historií těžby známou jako rudní revír Krásno - Horní Slavkov. Právě v okolí Slavkovského lesa a Mariánských lázní se lze setkat s fenoménem greisenů ve stavebnictví. Mezi nejzajímavější příklady patří barokní sloup Nejsvětější Trojice v nedalekém městě Teplá, který byl vztyčen roku 1721 a patří k nejcennějším památkám města a bude v práci dále diskutován. Dále lze greiseny pozorovat v pilířích železničního viaduktu v Horním Slavkově na budově obecního úřadu v obci Prameny, na barokním kostele Nejsvětější Trojice v Nové Vsi a hojně byl používán při stavbách v Mariánských lázních a okolí (Rybařík 1994). Vzhledem k tomu, že se v oblasti Slavkovského lesa nachází mnoho jak lokalizovatelných, tak nelokalizovatelných důlních prací, předpokládá se, že horniny použité ve stavbách pocházejí z těchto důlních děl. Zde byly pravděpodobně vytěženy jako hlušina, případně byly získávány po ukončení těžby rud v nově vzniklých lomech na stavební kámen (Fiala a kol. 1962). Hlubinná těžba se v oblasti rozvinula již na konci 15. st. (Beran a Sejkora 2006) a jak ukazují historické prameny, byl například v lokalitě greisenizovaného žulového pňe "STEINBRUCHSWALD" u Pramenů koncem 16. st. založen jámový lom na stavební kámen (Jarchovský a Pavlů 1988).

Nakolik je případ historického využití greisenů ve stavebnictví fenoménem pouze České republiky nelze odhadovat, jelikož stejné polymetalické akumulace vázané na greiseny variských granitoidních plutonů a rozsáhlou těžbu lze pozorovat i jinde v Evropě zejména ve Španělsku, Portugalsku a jihozápadním anglickém Cornwallu (Robb 2009). Nicméně podobné případy stavebního využití greisenů nebyly pozorovány ani popsány. Vzhledem k tomu, že v případě greisenizované žuly se nejedná o horninu, která by svým vzhledem a dekoračním přínosem patřila k atraktivním horninám, které jsou často v sochařství a stavebnictví požadovány a mnohdy jsou pak převáženy na dlouhé vzdálenosti (Török 2007), nelze předpokládat takovéto využití greisenů v oblastech vzdálenějších od míst těžby Sn-W rud. Proti původním granitickým horninám, z nichž vznikly, však greiseny mají výrazně vyšší pórovitost a tudíž jsou dobře kamenicky nebo sochařsky opracovatelné.

Tato diplomová práce si klade za cíl ověřit fyzikálně mechanické vlastností horniny odebrané z opuštěného lomu založeného v greisenizovaném žulovém pňi u Pramenů "STEINBRUCHSWALD" (dále jen pňe u Pramenů) s ohledem na využití v sochařství a stavebnictví. Dále porovnání vzorků odebraného v opuštěném lomu s materiálem odebraným z barokního sloupu Nejsvětější Trojice v Teplé, který procházel v nedávné době řadou restaurátorských zásahů a při aplikaci kvalitativních a kvantitativních petrografických metod zhodnotit, zdali je opuštěný lom založený v greisenizovaném žulovém pňi u Pramenů zdrojovou lokalitu původního kamenného materiálu použitého při tvorbě sloupu před rokem 1721.

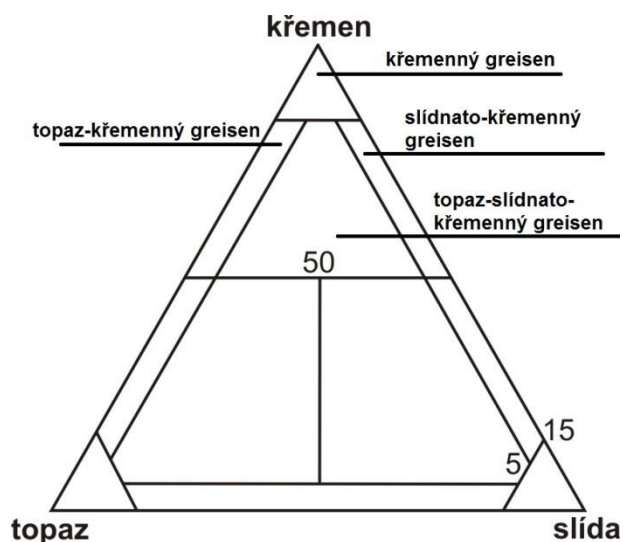
2 PŘEHLED DOSAVADNÍCH VÝZKUMŮ

2.1 Greiseny a jejich využití

Greiseny jsou nejen v České republice známy převážně jako rudonosná horniny s Sn-W mineralizací a váže se na ně dlouhá historie těžby. Jako greiseny se označují horniny, postižené sledem postmagmatických přeměn, soustředěné v oblastech granitoidních těles. V České republice bylo v oblasti Slavkovského lesa dle evidovaných záznamů z greisenů vytěženo 3 949 kt rudy (v letech 1945 - 1991) o kovnatosti 0,237 % Sn a 0,053 % W (DIAMO). Nicméně intenzivní těžba cínu je z oblasti známá již z období poloviny 16. st., kdy jej bylo v průměru vydobyto 400-500 tun a vůbec první psané zmínky o cínu z Krásna pocházejí z roku 966 (Beran a Sejkora 2006).

Vznik greisenů je popisován jako charakteristická metasomatická přeměna, doprovázející vznik některých rudonosných granitů. Patří k postmagmatickým alteracím, které obvykle mění mineralogické složení granitů v několika postupných etapách od vlastního vmístění magmatického tělesa (Štemprok 1987). Greisenizace probíhá v prostředí s pH ~2-4 a teplotách 400-600 °C (Zharikov a kol. 2007). Greiseny obvykle tvoří svrchní část granitových elevací (Breiter a kol. 1999). S greiseny se lze setkat i u alterací v okolí ložisek porfyrového typu, od kterých se liší přítomností fluorslíd a topazu (Robb 2009; Pirajno 2009).

Za počátek greisenizačních etap je možné považovat alkalickou fázi, draselnou a sodnou alteraci, která je následně završena rozsáhlým nahrazením původních složek systému při procesu silicifikace. Proces je vázán na vysoce frakcionované granitoidní plutony, kdy v systémech bohatých B, F a Li dochází k sérii dalších reakcí, vedoucích k vytváření topazu, turmalínu a oxidických minerálů (Štemprok 1987; Pirajno 2013). Produktem greisenizace jsou postmagmaticky alterované granitické horniny, které lze klasifikovat např. podle Štemproka a kol. (2005) na základě kvantitativního zastoupení hlavních složek (Obr. 1.) Mezi hlavní složky greisenů patří křemen a světlá slída, které jsou v proměnlivém množství doprovázeny dalšími fázemi, jako jsou turmalín, fluorit a topaz. Obecně lze říci, že proces greisenizace je nastartován Na metasomatózou, (albitizací), během které jsou produkovány H⁺ ionty, ty následně iniciují proces destabilizace K-živce, plagioklasu a slíd a jejich nahrazení křemenem a muskovitem. Muskovit preferenčně nahrazuje biotit i živce, v průběhu tohoto procesu se do systému uvolňují kationty z mřížky biotitu. Tyto kationty jsou pravděpodobně zodpovědné za parageneticky pozdější rudní mineralizaci. Mezi další slídy generované fluidy podílejícími se na procesu greisenizace lze zahrnout lithný siderofylit, protolithionit, zinvadit a lepidolit (Pirajno 2013).



Obr. 1. Klasifikační diagram greisenů (dle Štemproka a kol. 2005, upraveno).

Mezi greiseny lze zahrnout i greisenizované granity, které na rozdíl od greisenů jako takových obsahují reliktů původních živců. Greisenizované granity jsou oproti původnímu granitu postiženy sericitizací, která postihuje nejprve plagioklasy, posléze K-živce. Přechod mezi greisenizovaným granitem a muskovit-křemenným greisem je definován poklesem obsahu živců (více než 90 % původních živců je rozloženo). Ve slídnato-křemenných greisech je drobný sericit postupně rekrystalizován na muskovit parketového habitu, popř. na vějířovité agregáty (Heřmanská 2013, Štemprok a kol. 2005).

2.2 Přírodní kámen

Úloha a význam přírodního kamene ve stavitelství a zejména v architektuře vždy byl a stále zůstává zcela mimořádný. Kámen je využíván nejen jako konstrukční stavební hmota, ale též jako prostředek k vyjádření ideové závažnosti stavby (Syrový 1984). Zjednodušeně je možné přírodní kámen rozdělit na kámen stavební a dekorační. Stavební kámen je mnohostranně použitelným a nezbytným materiálem hlavně v oblasti dopravních, vodohospodářských a průmyslových staveb (Rybařík 1983). Kameny dekorační svými vlastnostmi vyhovují pro ušlechtilé kamenické a kamenosochařské práce a na rozdíl od stavebního kamene se jedná o surovinu mnohem hodnotnější (Krutský a kol. 1983). Zásadní podmínkou pro možnost využití určité horniny ať už k sochařským nebo některým stavebním účelům je až na výjimky možnost ekonomického dobývání horniny v blocích. Způsob dobývání kamene pro jednotlivé účely jeho použití se často liší a mění se i během doby životnosti jednotlivých ložisek (Syrový 1984). V případě ušlechtilých dekoračních kamenů jsou těžitelná i malá ložiska s malým rozsahem těžby, prováděné speciálním způsobem (Krutský a kol. 1983).

Pro technické i vzhledové vlastnosti hornin používaných k sochařským a stavebním účelům je určující jejich původ a složení. Na základě petrografických i fyzikálních poznatků lze horniny klasifikovat do určitých skupin, což umožňuje usuzovat na podobnost nebo rozdílnost vlastností zkoumaných při výběru vhodného materiálu k určitému technologickému zpracování. Při využívání horniny k sochařským a architektonickým účelům je mimo specifické fyzikální a technologické vlastnosti zohledňována například barva, dekorativní charakter a její tvarová únosnost (Syrový 1984). Pro materiály používané v exteriérech je mimo jiné důležitým kritériem pro výběr odolnost horniny vůči zvětrávacím vlivům (Rybařík 1994). Obecně lze říci, že každé specifické využití může vyžadovat jiné vlastnosti. Vlastnosti přírodního stavebního kamene respektive jejich zkoušení je standardizováno platnými českými normami: Zkušební metody přírodního kamene. Technické požadavky na tzv. ušlechtilé (dekorační) kameny, tedy horniny se specifickými petrografickými i technickými vlastnostmi, které jsou používány převážně v architektuře a sochařství, jsou dále odvozovány z normy ČSN 721800 Přírodní stavební kámen pro keramické výrobky, technické požadavky (Tab. 1.), a dalších technických norem (Rybařík 1994). České normy jsou průběžně doplňovány a přizpůsobovány normám evropským. V anglicky psané odborné literatuře jsou zkušební postupy často upraveny podle standardů ASTM (American Society for Testing Materials) a ISRM (International Society of Rock Mechanic).

2.3 Petrografické vlastnosti

Základní vlastnosti přírodního kamene jsou vlastnosti petrografické, úzce související s genezí horniny, přítomnými minerály a přeměnami. Petrografické vlastnosti hornin zjišťujeme makroskopickým pozorováním nezpracovaných vzorků, mikroskopickým výzkumem a dalšími doplňkovými analytickými metodami. Zjištění petrografických vlastností horniny (složení, vnitřní stavba, klasifikace horniny) má určující vliv na způsob jejich dalšího využití ať už k sochařským nebo stavebním účelům. Při využití k sochařským účelům je u hornin mimo minerálního složení, které je určující pro barvu a tvrdost horniny, důležitým petrografickým faktorem struktura a textura horniny.

K základním strukturním znakům hornin mající zásadní vliv na možnosti sochařského opracování patří například zrnitost, přičemž nejlepší technické vlastnosti žul mají obvykle typy drobnozrné s průměrnou velikostí zrna 1- 0.33 mm (Rybařík 1994). Zrnitost jednotlivých typů hornin, tvar a způsob opracování zrn a další petrologické faktory v mnoha případech korelují s vlastnostmi fyzikálními. Petrografické pozorování hornin by tedy mělo vždy předcházet zjišťování fyzikálních vlastností (Příkryl 2007).

Tab. 1. Technické požadavky na přírodní stavební kámen používaný k dalšímu zpracování v kamenické výrobě tedy i tzv. ušlechtilé kameny pro sochařské a architektonické využití (převzato a upraveno z Rybařík 1994).

Skupina	Hornina (příklad)	Objemová hmotnost (g/cm ³) minimální	Nasákavost (hm %) maximální	Pevnost v tlaku (suchého kamene) (MPa) minimální	Pevnost za ohybu (vysušeného kamene) (MPa) minimální	Součinitel mrazuvzdornosti v tlaku (tahu za ohybu) po 25 cyklech minimální
Magmatické horniny	granit, granodiorit	2,5	0,7	90	6	0,75
	syenit					
	diorit, gabro	2,8				
	andezit	2,5	5,5	80	6	0,75
	trachyt	2,0	3,0	80	7	0,75
ryolit	1,6	9,0	60	5	0,75	
Sedimentární horniny	hutný pískovec	2,5	5,0	40	5	0,75
	pórovitý pískovec, opuka	1,8	15,0	15	2	0,75
	jílovitá břidlice	2,5	2,0	-	25	0,6
	pórovitý vápenec, travertin	2,3	4,0	30	5	0,75
	hutný vápenec	2,6	0,8	40	4	0,75
Metamorfované horniny	krystalický vápenec	2,6	0,8	40	4	0,75
	serpentinit	2,5	1,0	60	6	0,75
	ruly, granulit					
fylit	2,6	1,5	-	30	0,6	

2.4 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti hornin lze rozdělit na fyzikální vlastnosti související s hmotou, např. měrná, objemová hmotnost, vlastnosti ovlivněné volným prostorem mezi jednotlivými zrny, vlastnosti deformačně pevnostní, tedy odezvy na působení vnějších sil a vlastnosti hydrofyzikální a teplotní. Tyto i další vlastnosti definují a jejich stanovování v praxi předepisují výše zmíněné normy. Vzájemný vliv jednotlivých vlastností na chování horniny při opracování, vystavení zvětrávacím a antropogenním vlivům a jinému fyzikálně mechanickému zatěžování je cílem studia mnoha autorů, např. Sousaa a kol. (2005), Török a Vásárhelyi (2010), Vásárhelyi a Ván (2006).

Dalším důležitým technologickým požadavkem na horniny používané v sochařství a stavebnictví je tzv. leštitelnost, tedy schopnost vytvářet při působení vhodného technologického postupu lesklý povrch. Zjišťování této vlastnosti není normováno a provádí se na základě doporučených metodických postupů (Rybařík 1994).

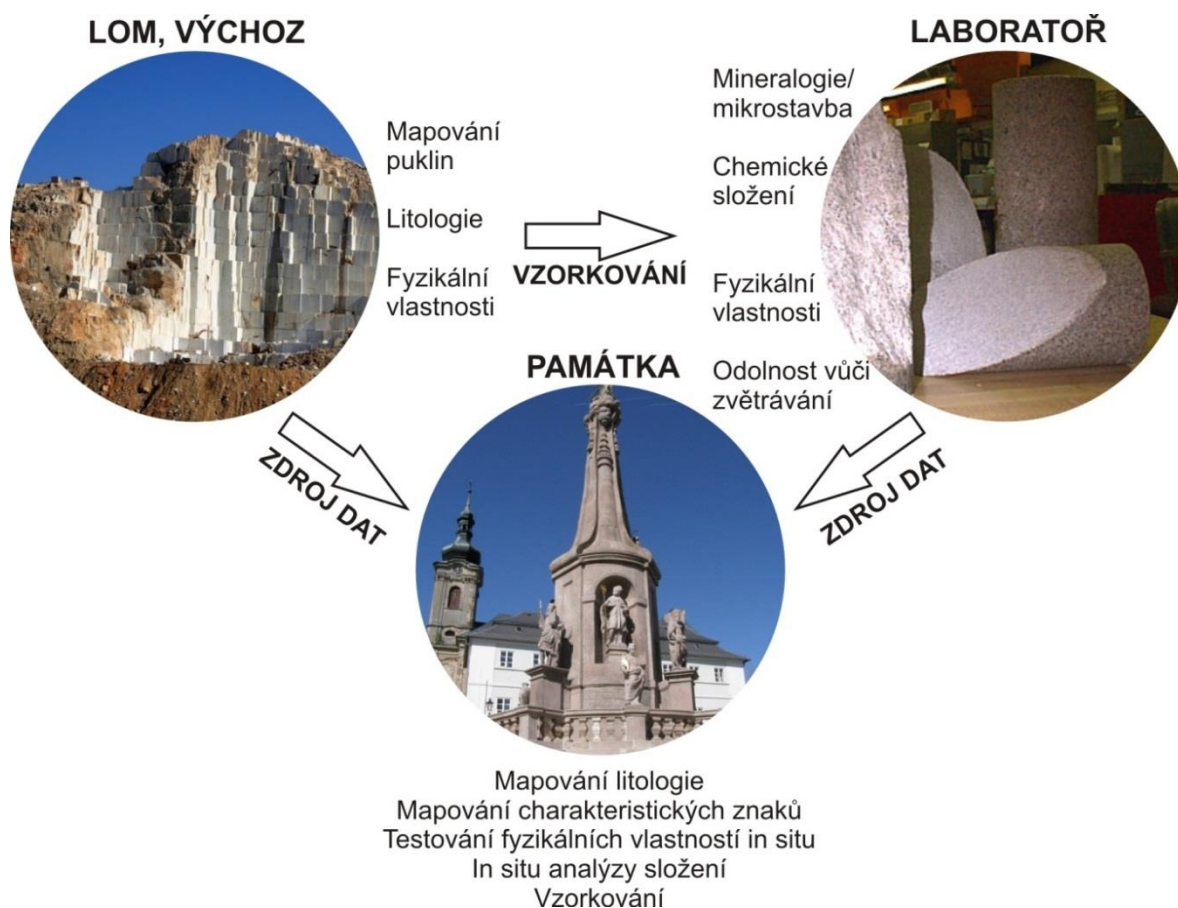
Vzhledem k faktu, že vlastnosti hornin mohou být různé i v rámci jedné klasifikační skupiny, do které jsou horniny rozděleny podle geneze, je nutné při výběru horniny k sochařskému nebo stavebnímu zpracování, znát účel jejího použití tak, aby se předcházelo nežádoucím projevům horniny, kterým by se dalo předejít volbou materiálu vhodnějšího (Rybařík 1994, Syrový 1984).

2.5 Metodika určování zdrojových oblastí přírodního kamene z památek

Studium a určování zdrojových oblastí přírodního kamene použitého při tvorbě historických architektonických a uměleckých památek je nedílnou součástí jejich před-restaurátorského materiálového průzkumu (Příkryl 2007). Cílem zjištění zdrojové oblasti materiálu je nejen laboratorní ověření petrografických a fyzikálně mechanických vlastností horniny použité při realizaci díla (schematicky znázorněno v Obr. 2.), ale i její přesná klasifikace, možnost přesného datování objektu samotného a také porozumění historickým obchodním trasám (Šťastná a Příkryl 2010). Neméně důležitým je i fakt, že lze materiál použít při údržbě a rekonstrukcích díla. Případně snadněji, na základě zjištěných vlastností původního použitého kamenného materiálu, hledat zdroj náhradní. V historii bývaly pro tvorbu rozměrnějších kamenných děl využívány převážně kameny z dostupných zdrojů v blízkosti realizace díla, a to vzhledem k technické a ekonomické náročnosti transportovat materiál na delší vzdálenosti. Tato skutečnost vede také k tomu, že mnoho kamenných děl odráží místní geologické poměry a poskytuje cenné informace o historické dobývací činnosti v dané oblasti. (Török a Příkryl 2010). V současné době je v České republice k dispozici pouze 10-15% dostupných zdrojů z dříve běžně používaných typů kamene (Török a Příkryl 2010) a tak je hledání náhradního materiálu pro rekonstrukci památek velmi aktuální téma.

Prvním krokem pro zjišťování zdrojové oblasti je klasifikace horniny makroskopickým zkoumáním materiálu in situ na památce, určení typu horniny je založené na zjištění makroskopicky rozeznatelných minerálech, barvě, texturních a strukturních znacích pozorovatelných na povrchu. Všechny tyto znaky mohou být výrazně ovlivněny zvětráváním, tvorbou zvětrávacích krust a dalšími faktory působícími na exponovaný materiál v průběhu času. Pro přesnou klasifikaci horniny je tedy nutné provést laboratorní petrografické analýzy na odebraných vzorcích z památky (Příkryl 2007). Problematika odběru vzorků z památek s ohledem na pozorování zvětrávacích projevů kamenného materiálu (Smith a Macalister 2000) je často diskutována a ve většině případů provádí značně omezený odběr vzorku restaurátor (Příkryl 2007). V našem případě byly z restaurátorem odebraných vzorků zhotoveny horninové výbrusy pro zobrazovací metody umožňující detailní petrografickou charakteristiku materiálu. Studium horninových výbrusu je základní metoda při zjišťování petrografických charakteristik a dalších mikrostrukturních parametrů materiálu z památek zejména proto, že se jedná o metodiku nedestruktivní a lze na jednom výbrusu provádět několik zobrazovacích analýz.

Mimo základní optické mikroskopie, kde určujeme hlavní horninotvorné a akcesorické minerály, velikost a tvar zrn atd., jsou výbrusy zkoumány pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou pro detailnější studium hlavních, vedlejších, sekundárních a akcesorických fází a pro pozorování mikrostrukturních znaků jednotlivých zrn neprojevujících se v optické mikroskopii. Pro další studium mikrostrukturních parametrů, jako je například velikostní distribuce zrn jednotlivých minerálních fází nebo přesné zjištění modálního složení horniny (Přikryl 2001, 2006), je v současné době využíváno tzv. petrografické obrazové analýzy PIA (Petrographic Image Analysis), která se stala nedílnou součástí petrografického výzkumu při určování zdrojové lokality přírodního kamene (Šťastná a Přikryl 2010). Pro obrazovou analýzu byl v této práci použit software SIGMASCAN Pro 5 (Jandel Scientific, USA). Další metodou petrografické charakteristiky studovaného materiálu je katodová luminiscence CL, a to jak optická OM-CL, tak skenovací SEM-CL, která výrazně rozšiřuje možnosti pozorování petrografických výbrusů. Pomocí CL je možné rozlišovat jednotlivé generace minerálů, pozorovat zonálnost krystalů, texturní vztahy mezi minerály, lokalizovat stopové prvky (Boggs a Krinsley 2006) a mnoho dalších jevů, které jsou v polarizačním mikroskopu nepozorovatelné, nebo obtížně detekovatelné.



Obr. 2. Schématické znázornění testování horninového materiálu v lomech, laboratoři a na památkách (převzato a upraveno podle Töröka a Přikryla 2010).

Další mineralogicko-geochemické a fyzikální analýzy sloužící ke studiu vlastností horniny za účelem zjištění zdrojové lokality přírodního kamene jsou např. rentgenová prášková difrakce XRD, kde

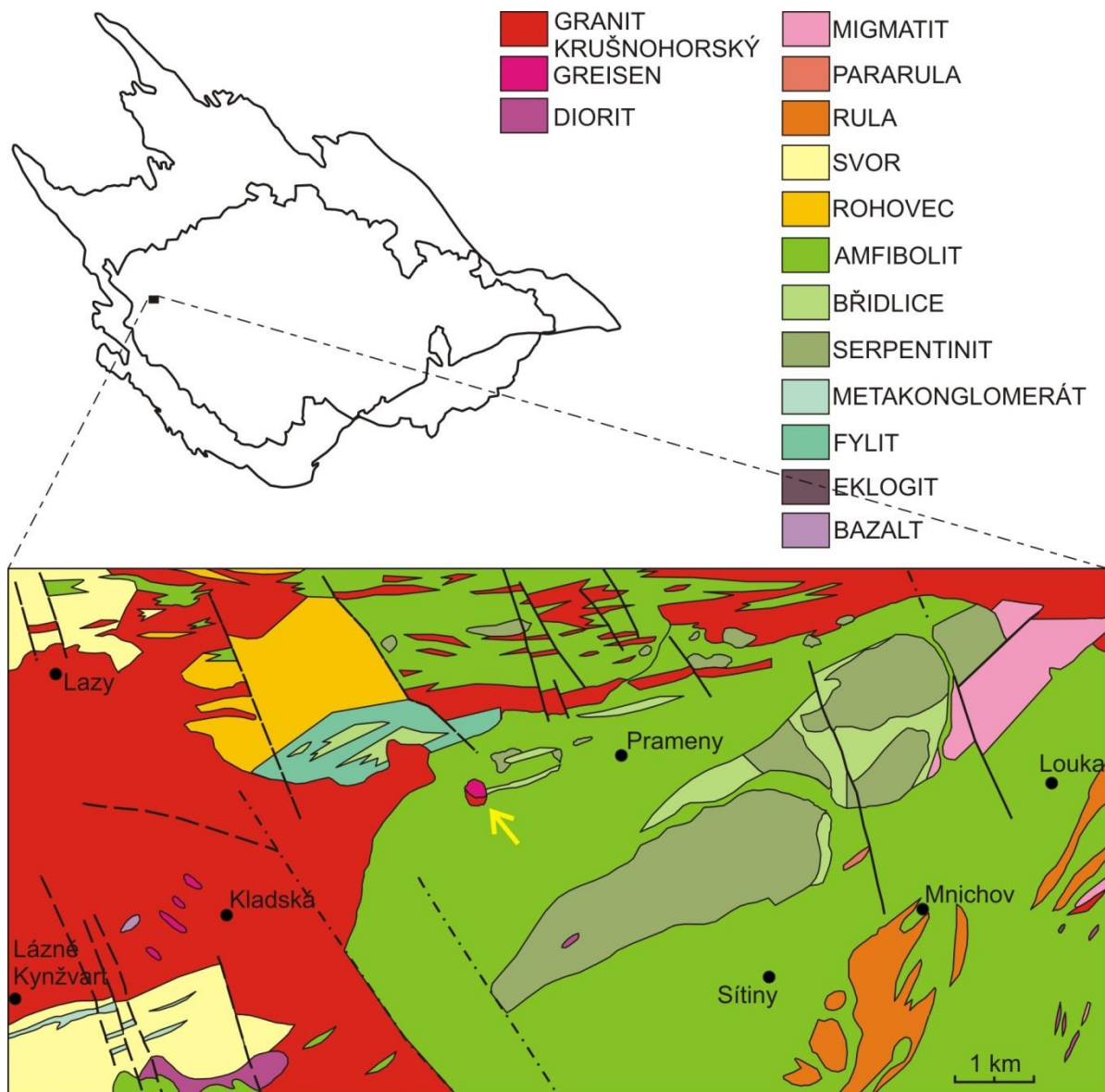
zjišťujeme semi-kvantitativní fázové složení studovaného vzorku. Geochemické analýzy hlavních, vedlejších i stopových prvků, např. ICP-MS. Stabilní izotopová geochemie a studium fyzikálně mechanických a indexových vlastností horniny (pevnost v tlaku, pórovitost, specifická hmotnost), (Šťastná a Příkryl 2010).

Pro možnost určení zdrojové oblasti přírodního kamene použitého při tvorbě barokního sloupu v Teplé a dalšího studia vlastností možného zdrojového kamenného materiálu byly v této práci použity převážně zobrazovací metody využívající horninotvorné výbrusy. Studovaný materiál byl podroben detailní petrografické charakteristice zejména pomocí optické mikroskopie, skenovací elektronové mikroskopie s elektronovou bodovou analýzou, kvantitativní petrografické analýze pomocí petrografické obrazové analýzy, katodové luminiscenci. Více o jednotlivých metodách je uvedeno v metodické části. Materiál odebraný z možného zdrojového lomu byl podroben dalším fyzikálně mechanickým zkouškám.

3 GEOLOGIE KRYSTALINIKA SLAVKOVSKÉHO LESA

3.1 Geologická stavba oblasti a její vývoj

Studovaná oblast se nachází v jihovýchodní okrajové části saxothuringika a je součástí karlovarského granitového plutonu (Obr. 3.) Oblast saxoturingika je tvořena převážně metamorfovanými horninami proterozoického až kambricko-ordovického stáří (silně metamorfované ruly a migmatity v Krušných horách a slaběji metamorfované horniny svory či fylity v okrajových jednotkách). Tyto krystalinické jednotky jsou prostoupeny intruzemi variských granitoidů, které kontaktně metamorfuji své okolí a jsou svrchnokarbonského až permského stáří. Tyto variské granitoidy tvoří především karlovarský pluton, jehož jižní část ve Slavkovském lese je od části severní v Krušných horách oddělena oherským riftem (Chlupáč a kol. 2011). Obecně lze říci, že pluton je tvořen dvěma řadami intruzí, starší tzv. horský granit a mladší tzv. krušnohorský granit. Mezi těmito dvěma hlavními skupinami jsou vyčleněny další přechodné skupiny dvojslídňých granitů (Fiala 1968).



Obr. 3. Poloha zájmové oblasti v rámci ČR (upraveno podle mapy České geologické služby; list 11-23; 1:50 000), šipkou označen žulový peň u Pramenů, zdrojová lokalita studovaného kamenného materiálu z opuštěného lomu.

3.2 Metalogeneze krystalinika Slavkovského lesa

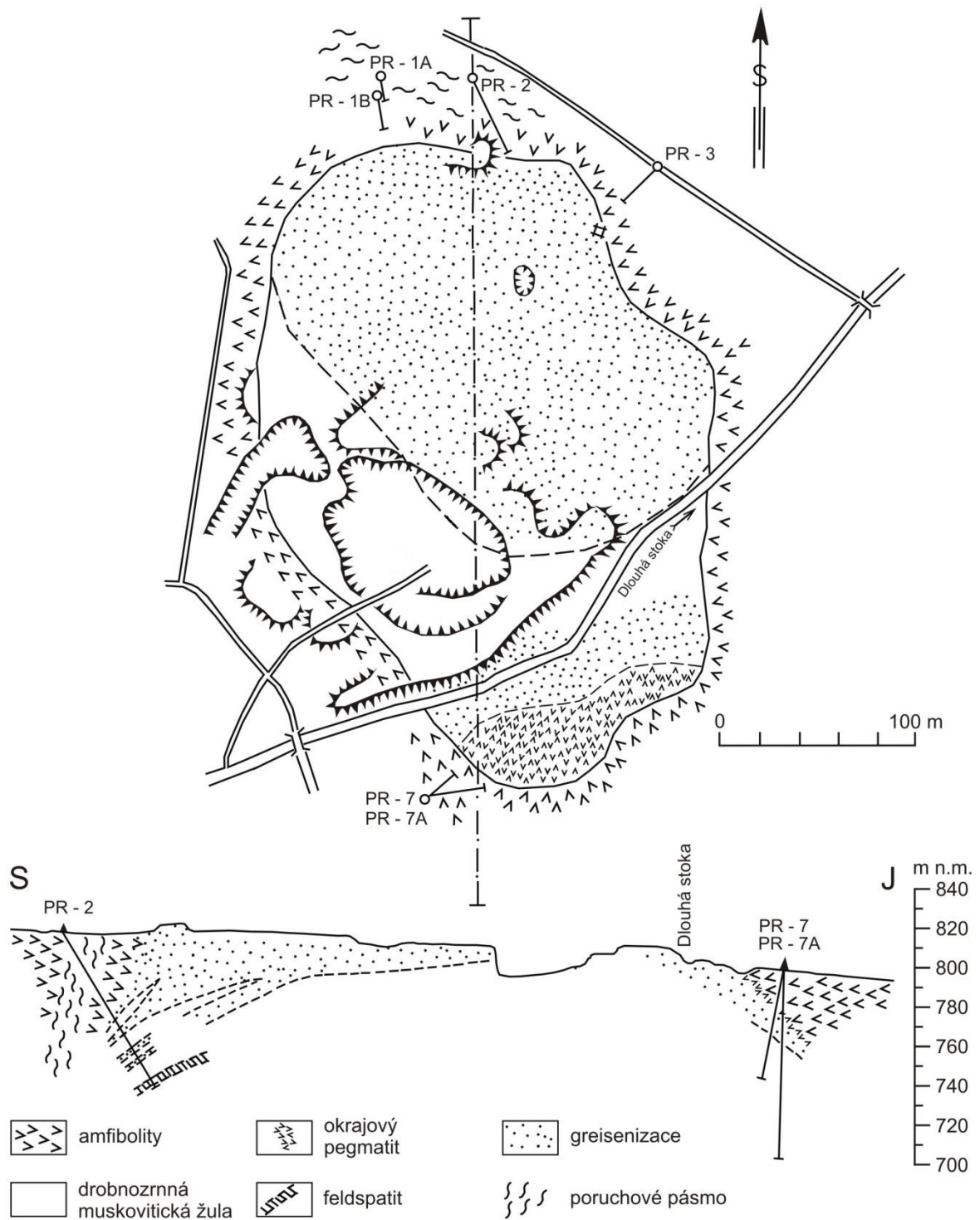
Slavkovský les je historicky proslulý převážně těžbou cínu, wolframu, stříbra a bismutu v jeho severní části. Oblast je reprezentovaná mineralizací v několika granitických elevacích Karlovarského plutonu (Beran a Sejkora 2006). Největším ložiskem je Huberův peň tvořený greiseny s převládajícím křemenem, topazem, kasiteritem, wolframitem a dalšími minerály. Spodní partie obsahují greiseny bohaté lithnými slídami a kasiteritem. Jižní část slavkovského lesa je z hlediska Sn-W rud chudší. Za relativně největší výskyt cínowolframové mineralizace greisenového typu lze považovat právě greisenizovaný žulový peň u Pramenů (Jarchofský a Pavlů 1988). Celá oblast Slavkovského lesa je považována za charakteristickou metalogenetickou oblast středoevropských variscid stejně tak, jako další části sasko-durynské oblasti.

Historie metalogeneze Krušných hor a Slavkovského lesa trvala od konce karbonu do mesozoika a je úzce spojena s variskou orogenezí a jejich doznívajících pochodů, kdy docházelo k pronikání intruzí variských granitoidů do provrásněných nebo metamorfovaných hornin staršího paleozoika nebo prekambria a vývoji rozsáhlých granitoidních těles. Samotný původ vzniku Sn a W ložisek je vysvětlován různě. Je zde předpoklad magmatické koncepce s přímou souvislostí mezi průběhem plutonismu. Geotektonické koncepce vážou Sn-W zrudnění na předpokládané roztoky hlubinného původu, které vystupují podél hluboce založených zlomů. Důležitý vliv mají hranice plutonu vůči okolní hornině. Tyto plochy diskontinuity určují přírodní dráhu rudonosných roztoků diferencovaných v blízkosti zdrojů žulového magmatu (Štemprok a Tenčík 1986). Obecně lze říct, že ekonomické Sn-W mineralizace jsou spojeny s krystalizací a chladnutím frakcionovaných Sn-W-Li-Rb-Cs-F granitových plutonů (Breiter a kol. 1999).

3.3 Žulový peň u Pramenů

Studovaná oblast greisenizovaného žulového pně u Pramenů je součástí chráněné krajinné oblasti Slavkovského lesa, který se nachází mezi Karlovými Vary, Mariánskými lázněmi a Kynšperkem nad Ohří. Slavkovský les tvoří výrazně omezenou orografickou jednotku oproti pokleslým pánvím sokolovské a chebské. Krystalinikum je na velké části území proráženo variskými granitoidy karlovarského plutonu. Pluton je tvořen dvěma hlavními řadami intruzí, staršími OIC granity (středně zrnité muskoviticko-biotitické granity a porfyrické granitoidy) a mladšími YIC (granity, které jsou zastoupeny převážně narůžovělými muskovit-biotitickými žulami postiženými hlavně pneumatolytickými přeměnami minerálního složení a dále je vyčleněn přechodný typ zastoupený převážně dvojslídými granity (Fiala 1968, Breiter a kol. 1999).

Mineralizovaný žulový peň u Pramenů je vyvinut v masivu Li-F muskovitické žuly, který má po erozi vrchlíku v půdorysu rozměry přibližně 300 × 200 metrů (Obr. 4.). Jedná se o jemnozrnnou leukokratní žulu, která je místy greisenizovaná a zrudnělá. Okolní horninu tvoří metabazity mariánskolázeňského komplexu. V jižním okraji pně je vyvinuto těleso okrajového pegmatitu a křemenné žíly malých mocností. Největší cínové zrudnění je uváděno právě na kontaktech pně (Jarchofský a Pavlů 1988). Směrem nahoru v severní a severovýchodní stěně se projevuje zesílená autometamorfní přeměna žuly a v nejvyšší části stěny je vyvinut greisen (Fiala a kol. 1962). Greiseny vytvořené ve vrcholu elevace vyklíňují podél šikmo ukloněných kontaktů pně a proces přeměny směrem do hloubky vyznívá a greiseny přecházejí do greisenizovaných a postupně slaběji alterovaných žul.



Obr. 4. Geologická skica greisenizovaného žulového pně u Pramenů s vyznačenou pozicí opuštěného lomu ("STEINBRUCHSWALD") a příčný řez s vyznačenou lokalizací průzkumných vrtů z dřívějších ložiskově průzkumných prací (upraveno podle Jarchovského a Pavlů 1988).

Podle archivních údajů se hlubinná těžba na této lokalitě rozvinula koncem 15. a na začátku 16. st., kdy byla v činnosti celá řada dnes nelokalizovatelných důlních prací (Jarchovský a Pavlů 1988). Podle Bílka a kol. (1964) se celková těžba na této lokalitě odhaduje na 350 až 500 tun cínu. Po vydobytí nejbohatších okrajových partií dolování stagnovalo a koncem 16. st. úplně zaniklo (Jarchovský a Pavlů 1988). V žule v centru výchozu byl v pozdější době založen lom na stavební kámen (Jarchovský a Pavlů 1988). V lomu bylo těženo značné množství stavebního kamene pro stavby v obci Prameny a okolí, lom dosahoval velikostí 70 × 120 × 15 m (Fiala a kol. 1962). Podle ústního sdělení kronikáře obce Prameny pana Brtníka (2014) došlo na lokalitě k poslednímu odstřelu bloků hornin v roce 1972, materiál byl zpracován v drtírně ve Vítkově jihovýchodně od Sokolova a byl použit při stavbě silnic v okolí. Současné době je dno lomu zarostlé vzrostlým smrkovým lesem a místy se vytvořila jezírka. Stěny lomu jsou však na většině jeho obvodu stále ještě dobře přístupné (Obr. 5.).



Obr. 5. Současný stav opuštěného lomu založeného v greisenizovaném žulovém pni u Pramenů.

4 PŘÍKLADY POUŽITÍ GREISENU V SOCHAŘSTVÍ A STAVEBNICTVÍ

4.1 Barokní sloup Nejsvětější Trojice v Teplé

Sloup Nejsvětější Trojice, stojící pod budovou Městského úřadu na Masarykové náměstí v Teplé (Obr. 6.), patří mezi sochařské a architektonické dominanty města. Tento trojiční sloup byl vztyčen v roce 1721, což je uvedeno přímo na sloupu a byl pravděpodobně zhotovený žlutickou dílnou O. Wendy a tepelským kameníkem W. Braunbockem. Zvláštností a důvodem vysoké cennosti stavby je skutečnost, že se jedná o jednu z prvních staveb s barokními prvky na našem území. Barokní architektonické prvky, kterými sloup vyniká, pozorujeme na našem území v dílech tvořených spíše až ve třicátých až čtyřicátých letech 18. st. (Círglová 2000). Tepelský sloup se zvedá z trojstupňového soklu a jeho tělo je obepnuto balustrádou, na níž můžeme pozorovat první trojici soch. Z kuželky balustrády byl při restaurování odebrán jeden z vzorků pro naše analýzy, tato kuželka byla následně nahrazena novým kamenným materiálem. Hlavní architektura sloupu je tvořena válcem, na kterém můžeme pozorovat tři vysoké půlkruhové niky s další trojicí soch. Jednu z těchto soch tvoří sv. Norbert (na čelní straně sloupu) za jehož sochou byl při restaurování památky z výklenu niky odebrán další analyzovaný vzorek původního kamenného materiálu. Mezi nikami je válec rozčleněn listinami, k nimž jsou přistavěné ořímsované podstavce nesoucí opět trojici soch. Vrcholovou částí sloupu je do výšky se zužující válcový dřík zakončený další plastikou.



Obr. 6. Barokní sloup Nejsvětější Trojice na Masarykově nám. v Teplé.

Kamenný materiál použitý pro stavbu sloupu je obecně označován jako pískovec. Při makroskopickém pozorování horniny (in situ na památce) můžeme materiál popsat jako jemně zrnitou, celistvou horninu spíše granitoidního charakteru. Barva horniny je světlá, šedavá místy narůžovělá i žlutavá. Makroskopicky jsou pozorované křemeny, světlá slída, místy biotit a vyrostlice živočů. Hojně se na materiálu vyskytují dutiny mm rozměrů, které jsou zbarveny oxidy železa. Hornina svým vzhledem připomíná kamenný materiál využívaný na stavbách v okolních oblastech, který je označován jako sangerberský kámen (Rybařík 2000). Materiál byl těžen jako stavební kámen v blízkosti obce Prameny v granitoidním tělese, které bylo opuštěné po těžbě rudy a jedná se o greisenizované granitoidy až greiseny. Greisen resp. greisenizovaná žula byl, jak uvádí Rybařík (1994), v minulosti hlavním stavebním i dekoračním kamenem. Lámal se u Pramenů (dříve Sangersberg) a byl použit na většině budov i pomníků v Mariánských lázních a okolních oblastech např. (Obr. 7. a 8.).



Obr. 7. Podezdívka na budově Obecního úřadu v obci Prameny.



Obr. 8. Barokní kostel Nejsvětější Trojice v Nové Vsi.

5 STUDOVANÉ VZORKY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

5.1 Odběr a zpracování vzorků

Opuštěný lom u Pramenů

Studovaný materiál byl odebrán z opuštěného lomu, založeném v greisenizovaném žulovém pni u Pramenů, prof. Příkrylem dne 25. 6. 2001. Celkem byly odebrány 4 bloky horniny, každá o rozměru přibližně 35×30×25 cm. Vzorky jsou vedeny pod pořadovým číslem 146 (dílčí vzorky A, B, C, D) v litotéce přírodního kamene zemí Koruny české.

Z materiálu byly zhotoveny horninové výbrusy pro mikroskopické zkoumání horniny v sériích (146C, 146D) tvořících (I) pozorovanou skupinu. Konkrétně byly zhotoveny zakryté výbrusy pro základní polarizační optickou mikroskopii a leštěné výbrusy pro katodo-luminiscenční pozorování. Leštěné výbrusy byly následně opatřeny uhlíkovým povrchem pro možnost mikrosondové bodové analýzy na SEM. Pro pozorování pórového prostoru horniny byly nezakryté výbrusy zhotoveny ze vzorků napuštěných směsí epoxidové pryskyřice s fluorescenčním barvivem (Nishiyama a Kusuda 1994). Dále byla zhotovena pravidelná válcová tělesa se štíhlostním poměrem (výška: průměr) 2:1 pro zkoumání fyzikálně mechanických vlastností horniny opět ve dvou sériích (146C, 146D) vždy po pěti kusech. Pro další doplňkové a speciální rozborů chemismu a mineralogického složení horniny byly zhotoveny standardní vzorky vhodné pro další použité analytické zpracování.

Sloup Nejsv. Trojice v Teplé

Studované vzorky původního kamenného materiálu plastiky a vzorky povrchových vrstev byly odebrány prof. Petrem Sieglem, akad. soch a rest. v rámci předrestaurátorského materiálového průzkumu plastiky dne 27. 9. 2002.

Z odebraného materiálu byly zhotoveny výbrusy zakryté pro základní mikroskopické pozorování, nezakryté opatřené fluorescenční pryskyřicí a leštěné pro mikroskopické zkoumání horniny pomocí SEM a mikrosondové bodové analýzy v sériích (II) S0258/IV a V, které byly odebrány z výklenku za sochou Sv. Norberta a (III) S0258/VI, VII a VIII odebrané z kuželky balustrády obíhající tělo sloupu.

Tab. 2. Přehled zpracovaných vzorků a použitých metod.

Skupina	Označení vzorku	Výbrusy nezakryté, zakryté	Výbrusy leštěné	Katodová luminiscence	Elektronová bodová analýza SEM	Tělesa pro fyzikální zkoušky	Místo odběru
I	146C	+	+	+	+	+	opuštěný lom u Pramenů
	146D	+	+	+	+	+	opuštěný lom u Pramenů
II	S0258/IV	-	+	+	+	-	výklenek za sochou sv. Norberta
	S0258/V	-	+	+	+	-	výklenek za sochou sv. Norberta
III	S0258/VI	+	+	+	+	-	kuželka balustrády
	S0258/VII	+	+	+	+	-	kuželka balustrády
	S0258/VIII	+	+	+	+	-	kuželka balustrády

5.2 Základní principy a popis jednotlivých metod

5.2.1 Petrografické zkoumání

Makroskopické pozorování proběhlo na nezpracovaných vzorcích greisenizované žuly odebrané v opuštěném lomu. Byla charakterizována barva, zrnitost, stavba, viditelné minerály a přítomnost přeměn. V případě trojičního sloupu bylo makroskopické pozorování provedeno na plastice samotné a na materiálu odebraném při restaurování, tedy na materiálu, který prošel jistým druhem kamenického zpracování a ošetření při dřívějších restaurátorských zásazích.

Základní mikroskopické zkoumání výbrusů studovaného materiálu bylo v obou případech provedeno v laboratoři optické mikroskopie ÚGMNZ PřF UK na binokulárním mikroskopu Leica DMLP. Veškeré výbrusy byly zhotoveny v laboratořích Českého geologického ústavu (pí. Bláhová). Účelem základní optické mikroskopie bylo získat petrografické charakteristiky studovaného materiálu; zejména zjištění přítomných minerálů (hlavní, vedlejší, akcesorické), odhad jejich kvantitativního zastoupení a popis jejich základních parametrů. Dále byla popsána horninová stavba, pórový prostor a další pozorované fenomény.

5.2.2 Skenovací elektronová mikroskopie s bodovou analýzou

Elektronová mikroanalýza byla provedena v laboratořích ÚPSG PřF UK na SEM TESCAN Vega vybaveným EDS detektorem X-Max 50. Tato fyzikální metoda prvkové analýzy je založena na interakci vysoce energetických elektronů se studovaným vzorkem (Chvátal 1999), kdy při dopadu svazku primárních elektronů na preparát dochází k interakci projevující se vznikem sekundárních elektronů, zpětně odražených elektronů (BSE), RTG záření, katodoluminiscence (CL) atd. Pro zjištění akcesorických minerálních fází ve studovaném materiálu 146C,D a S0258 IV-VIII bylo použito bodových analýz prvkového složení při EDS detekci spektra za následujících podmínek - urychlovací napětí 15 kV, proud svazku 1,5 nA. Zpětně odražených elektronů SEM - BSE bylo použito pro získání fotografií. Dále byl pomocí bodové mikroanalýzy stanoven obsah fosforu v živcích, konkrétně ve výbrusech I a II skupiny. Produkce odražených elektronů je závislá na atomové hmotnosti studované fáze, těžší prvky se na snímáném obraze v BSE projevují jako světlé plochy a oblasti tvořené lehčími prvky jsou tmavé (Prior a kol. 1999) Analýza lehkých prvků, jako např. Li, jehož obsah je ve studovaném materiálu předpokládán, je na SEM z tohoto důvodu problematická a pro potvrzení Li ve vzorcích bylo doplnkově použito analýzy stopových prvků na ICP-MS. Dále byly na SEM pořízeny mikrofotografie s použitím detektoru CL, pro pozorování charakteristických mikrostrukturálních parametrů. Preparáty pro SEM byly zhotoveny v laboratořích Českého geologického ústavu. Pozorování proběhlo na standardních leštěných horninových výbrusech opatřených uhlíkovým pokovením.

5.2.3 Katodová luminiscence

Katodová luminiscence, tedy emise viditelného světla vyvolaná dopadem proudu urychlených elektronů na horninový vzorek (Barbin a kol. 1992), je metoda užitečná pro široké spektrum hornin, ale její největší uplatnění nacházíme při studiu hornin sedimentárních, karbonátových (Boggs a Krisley 2006), kde je možné podle rozdílných luminiscenčních vlastností pozorovat zonálnost tmelů nebo identifikovat fosilie. Pro účely této práce bylo snímání výbrusů v katodové luminiscenci využito pro pozorování distribuce akcesorických minerálů a k identifikaci a plošnému rozložení živců. Katodoluminiscenční jevy jsou totiž ovlivněny chemickými prvky obsaženými v minerálech, což umožňuje snadné pozorování plošné distribuce minerálních fází, která se v optické mikroskopii obtížně pozoruje. Dále je možné pomocí katodoluminiscence jednotlivé fáze kvantifikovat, rozlišovat generace jednotlivých minerálů, a studovat mikrotrhliny a další mikrostrukturální parametry (Machel

2000). Jednotlivé chemické prvky můžeme podle jejich luminiscenčního účinku rozdělit na tzv. aktivátory, stabilizátory a zhašedla. Mezi běžné aktivátory katodoluminiscenčního jevu zahrnujeme stopové prvky, tranzitní kovy, prvky vzácných zemin obsažené ve fluoridech, fosfátech, sulfátech, wolframitech, silikátech a oxidech a aktinoidy obsažené v krystalové mřížce daného minerálu. Velký význam má pak celková symetrie a valence atomu daného prvku (Boggs a Krisley 2006). Mezi stabilizátory patří především Pb^{2+} a Ce^{3+} . Nejvýznamnějšími zhašedla pak jsou Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} a Co^{2+} (Machel 2000).

Zařízení, umožňující pozorování katodové luminiscence, se dělí podle budící energie na tzv. "studené" a "horké" katody. "Studené" katody jsou připojovány k optickým mikroskopům. "Horké" katody pracují ve spojení se skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) nebo transmisním mikroskopem (TEM).

Pro účely této práce bylo pozorování provedeno pomocí studené katody CCI 8200 Mk4 v optickém mikroskopu Leica DMLP na ÚGMNZ PřF UK. Podle luminiscenčních barev, které jsou dány rozdílnými druhy přítomných aktivátorů, jsou rozpoznávány jednotlivé minerální fáze. Podmínky pozorování luminiscence byly: napětí 14,3 - 14,7 kV a proud 323 - 349 μA . Výsledný barevný obraz byl zachycen digitálním fotoaparátem Canon 1100D s nastavením dlouhé expozice, při zvětšení objektivu 5 \times . Účelem studia katodové luminiscence bylo především pozorování distribuce akcesorických fází ve studovaném materiálu a rozšíření a rozlišení živců vyskytujících se ve vzorcích.

5.2.4 Petrografická obrazová analýza PIA

Petrografická obrazová analýza horninových výbrusu pomocí softwaru SIGMASCAN Pro 5 (Jandel Scientific, USA) je důležitým nástrojem při určování typu horniny v rámci průzkumu památek. Analýza je využívána především pro přesné určení modálního složení, zrnitosti (průměrná ED a maximální MGS), tvaru zrn (kompaktnost C, tvarový faktor SF, poměr hlavní a vedlejší osy zrn AR) a pro další analýzy mikrostrukturních prvků studovaného vzorku. Tato kvantitativní analýza mikrostruktur je výhodná pro přesnou klasifikaci horniny, zjištění provenience a dále k interpretaci rozdílů v mechanických vlastnostech horniny (Příkryl 2001, 2007).

Proces získání a následného zpracování obrazu v softwaru SIGMASCAN se skládá z několika základních na sebe navazujících kroků (Příkryl 2007). Pro účely této práce byly pořízeny mikrofotografie horninových výbrusu digitálním fotoaparátem Canon 1100D, který snímá obraz z binokulárního mikroskopu Leica DMLP v laboratořích optické mikroskopie ÚGMNZ PřF UK. Z každého studovaného výbrusu byl pořízen takový počet snímků, aby bylo možné analyzovat reprezentativní vzorek, přibližně 600 objektů z výbrusu. Určujícím faktorem pro počet nasnímaných snímků, respektive počtu analyzovaných ploch je předpokládaná zrnitost studované horniny. Veškeré mikrofotografie nasnímané při zkřížených nikolech a 2,5 \times zvětšení byly opatřeny náležitým měřítkem a ve formátu JPEG byly importovány do programu SIGMASCAN. Po přenesení fotografie je nutné program kalibrovat na reálné hodnoty, což provedeme pomocí následujících nástrojů: "Measurements/Settings" - vybereme měření vzdálenosti, tedy "Distance/Ok", následně pomocí funkce Trace Mode označíme známou vzdálenost na snímku, tedy vložené měřítko. Tímto postupem získáme hodnotu známé vzdálenosti vyjádřenou v pixelech a program kalibrujeme pomocí funkce "Image/Calibrate/Distance and Area/2 PointRescaling", kde získaný údaj převedeme na mm. Před samotnou analýzou v programu je nutné vybrat požadované měřené parametry v nabídce hlavní lišty "Measurements/Settings". Pro účely této práce byly z parametrů vybrány následující měření: plocha (Area), kompakce (Compactness), Feretův obvod (Feret Diameter), délka hlavní osy (Major Axis Length), délka vedlejší osy (Minor Axis Length), obvod (Perimeter) a tvarový faktor (Shape Factor). Popis jednotlivých měření je uveden v (Tab. 3.).

Tab. 3. Základní mikrostrukturní parametry (upraveno podle Příkryla 2006).

Měřený parametr	Symbol	Výpočet	Význam
Plocha	A_i	počet pixelů v objektu	modální zastoupení
Kompakce	C	L_p^2/A_i	tvár průřezu zrn
Ferretův průměr	D_{ekviv}	$D_{ekviv} = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}$	velikost zrn
Délka hlavní osy	D_{max}	vzdálenost dvou bodů (pixelů) definující délku hlavní osy	délka zrna
Délka vedlejší osy	D_{min}	vzdálenost dvou bodů (pixelů) definující délku vedlejší osy	šířka zrna
Obvod	L_p	délka pixelů opisujících objekt	délka hranic zrn
Tvarový faktor	SF	$4\pi A_i/L_p^2$	cirkularita objektu kruhu (1=kruh, 0=linie)

Všechny tyto parametry jsou měřeny na plochách (zrnech), které jsou pomocí funkce Trace Mode vykresleny přímo na fotografii. Touto metodou byly na získaných mikrofotografiích rozlišeny následující fáze: křemen, živce (respektive jejich patrné relikt), slída, zřetelné póry a plochy velmi jemnozrné hmoty alteračních produktů (produkty sericitizace, jílové minerály atd. a další akcesorické fáze) s drobnými úlomky okolních minerálů. Při jejich rozlišování je využito možnosti přiřadit každé fázi jinou barevnou výplň v "Measurements/Overlays". Získaná data o jednotlivých zrnech a plochách jsou následně zpracována v programu Microsoft Excel.

5.2.5 Stanovení fyzikálních vlastností

Stanovení základních fyzikálních vlastností materiálu odebraného v opuštěném lomu u Pramenů bylo provedeno v laboratořích fyzikálních vlastností hornin geologického ústavu Akademie věd ČR. Stanovení indexových fyzikálních a dynamických přetvárných vlastností bylo provedeno na tělesech pravidelného válcového tvaru se štíhlostním poměrem 2:1, vždy na pěti kusech z materiálu odebraném v lomu 146C a 146D. Na vysušených a vodou nasáklých tělesech do ustáleného stavu byla stanovena hodnota objemové hmotnosti (poměr hmotnosti a objemu vzorku v g.cm^{-3}), nasákavosti za atmosférického tlaku (poměr hmotnosti vody přijaté horninou za daných fyzikálních podmínek ~ 5 dní k hmotnosti vysušeného kamene (hm. %)) a hodnota zdánlivé neboli otevřené pórovitosti v (obj. %). Stanovení dynamických přetvárných vlastností bylo provedeno pomocí ultrazvukového prozvučování válcových těles s osou ultrazvukového prozvučování kolmo k předpokládanému horizontálnímu uložení. Údaje z intervalu průchodu ultrazvukových impulzů tělesy byly použity pro výpočet rychlosti šíření podélných a příčných vln, dynamického modulu, Poissonovy konstanty a střížného modulu.

6 VÝSLEDKY

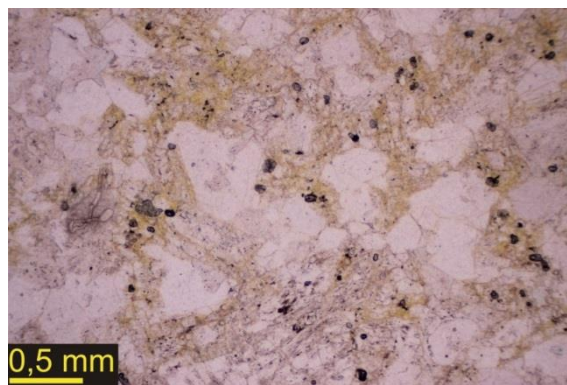
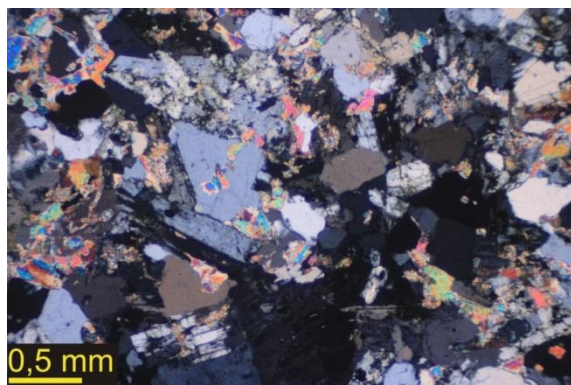
6.1 Petrografické vlastnosti studovaného materiálu z opuštěného lomu u Pramenů

6.1.1 Makroskopický popis

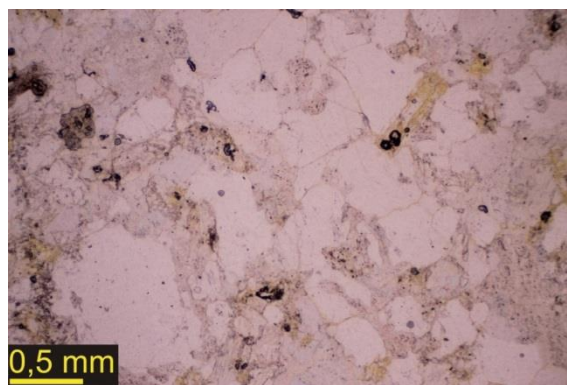
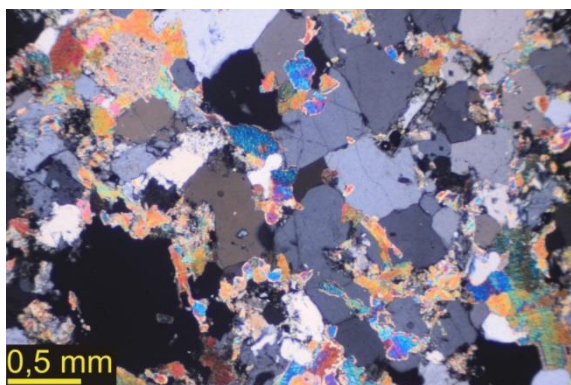
Makroskopicky lze horninu odebranou z opuštěného lomu u Pramenů (146C, 146D) popsat jako světlou, šedou až šedozelenou místy narůžovělou jemnozrnnou horninu granitoidního charakteru s výraznou převahou křemene a makroskopickými slídami. Charakteristickým znakem je přítomnost nahodile rozmístěných, ne příliš četných narezlých agregátů velikosti mm. Hornina má izotropní makrostavbu. Na stěnách opuštěného lomu ani na volně ležících blocích nejsou patrné specifické zvětrávací jevy, hornina se celkově jeví jako značně odolná vůči zvětrávacím vlivům.

6.1.2 Základní optická mikroskopie

Studovaná hornina (Obr. 9., 10.) je tvořena převládajícím křemenem (40%), který se vyskytuje v podobě zrn křemene magmatického a xenomorfně omezenými zrny křemene novotvořeného hydrotermálního. Na některých novotvořených zrnech je možné pozorovat slabé undulózní zhášení a četně se v křemenných zrnech vyskytují inkluze okolních minerálů, převážně světlé slídy a místy je možné pozorovat drobné plynokapalné inkluze. Světlá slída (20%) se vyskytuje v několika typech agregátů různých generací od drobných rozptýlených útržků přes produkty sericitizace vyplňující reliktu živcových tabulek a vějířovité až sféricky lupenité agregáty vrůstající do volných prostor a okolních minerálů. Ve výbruse 146D jsou agregáty slíd větších rozměrů než ve výbruse 146C. Další mikrofotografie (Obr. přílohy I. A)



Obr. 9. Mikrofotografie studovaného vzorku 146C s zkříženými a paralelními nikoly.



Obr. 10. Mikrofotografie studovaného vzorku 146D s zkříženými a paralelními nikoly.

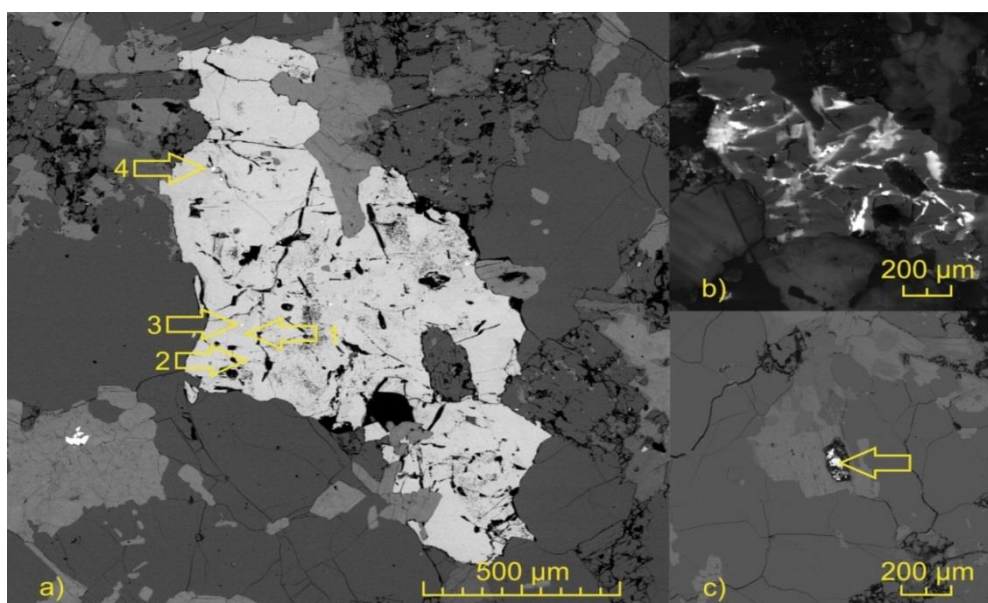
Oba živce jsou zatlačovány muskovitem a křemenem, draselný živec (10-15%) ve formě xenomorfně omezených zrn $0,6 \times 1,2 - 1 \times 1,6$ mm je alterovaný a místy lze po štěpných trhlinách pozorovat inkluze Fe oxidů. Plagioklas je zastoupen albitem (5-10%), původní automorfní až hypautomorfní lišty

s lamelováním se vyskytují v drobných zrnech v ploše celého výbrusu (více ve výbruse 146C), jejich relikty jsou vyplněny novotvořenými alteračními fázemi (sericit, jílové minerály). Ve výbruse 146C je pozorovaná lišta albitu dosahující délky 2,8 mm. Zhruba (20%) z pozorovaných výbrusů zaujímá extrémně jemnozrná hmota, která je tvořena směsí alteračních produktů, úlomků původních horninotvorných minerálů a jílovými minerály. Pórový prostor v hornině je soustředěn převážně v oblastech výskytu reliktních tabulek živců, respektive v místech s velmi jemnozrnými produkty hydrotermálních procesů a při postižených okrajích zrn. Póry lze popsat jako shluky navzájem propojených mikropórů mezi velmi jemnozrnou hmotou. Hornina je jemnozrná a v obou výbrusech jsou hlavní minerály zastoupené ve značném velikostním rozpětí od 0,001 mm do prvních mm. Velikostní heterogenita je nejlépe patrná na zrnech křemene, kde největších velikostí dosahují zrna křemene novotvořeného hydrotermálního. Jako akcesorický minerál byl pomocí optické mikroskopie identifikován apatit, jehož rozpukané největší zrna $1,5 \times 0,7$ mm bylo pozorováno ve výbruse 146C (Obr. 11. ze SEM). Horninu odebranou z opuštěného lomu u Pramenů je možné na základě petrografického popisu klasifikovat jako greisenizovanou žulu.

6.2 Elektronová mikroanalýza SEM

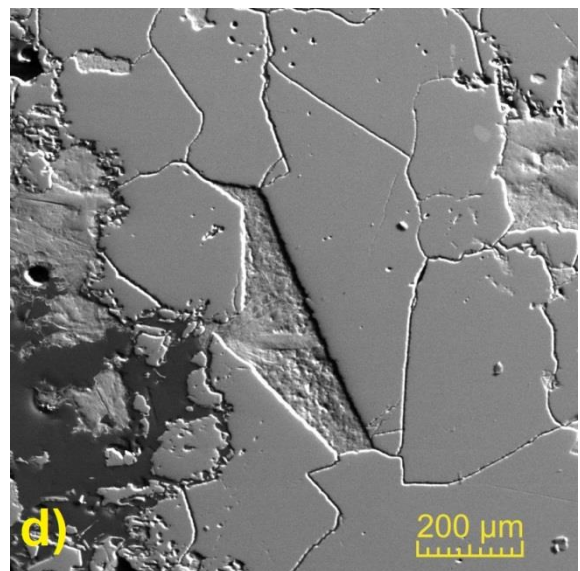
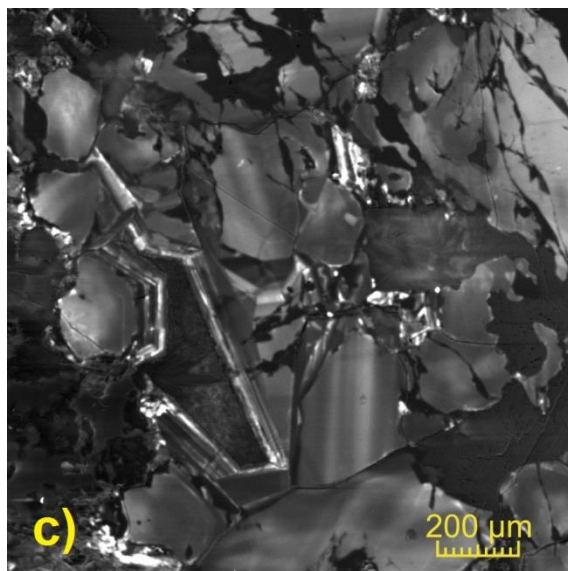
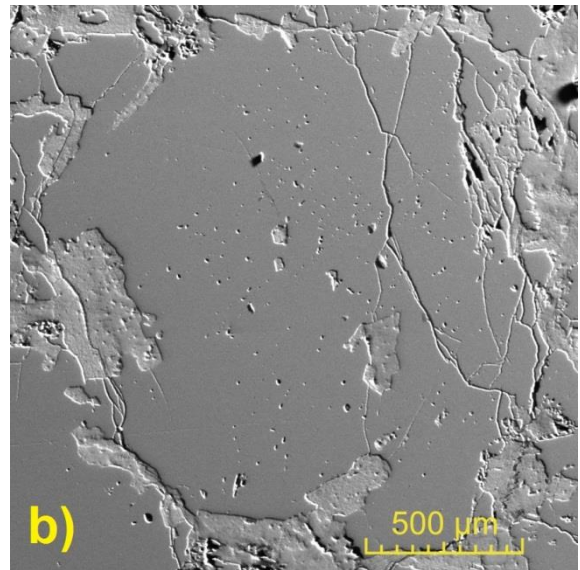
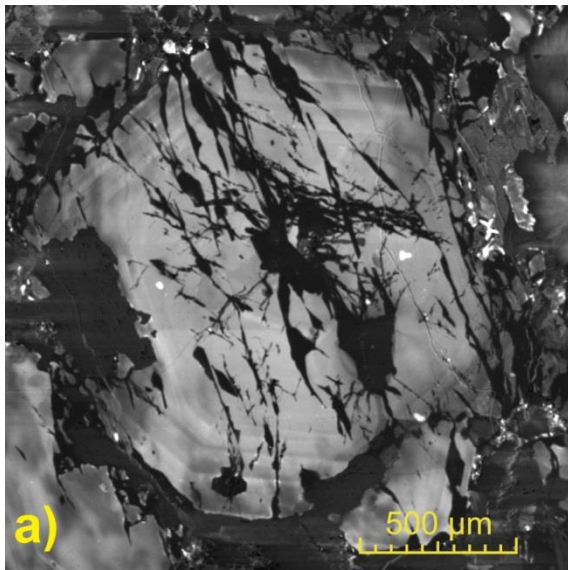
Pro identifikaci dalších akcesorických minerálů ve studovaných horninách bylo použito elektronové mikroskopie s mikroanalýzou na SEM TESCAN Vega vybaveném EDS detektorem X-Max50 (ÚPSG PřF UK). Stanovení provedl operátor Mgr. Martin Racek Ph.D. Celkem bylo provedeno 24 bodových analýz na leštěných, uhlíkem potažených výbrusech vzorku 146C a 146D.

Ve vzorku 146C (14 bodových analýz) a 146D (10 bodových analýz), (příloha II. A) byly identifikovány jako akcesorické minerály apatit (Obr. 11a,b), obsahující drobné inkluze fází s obsahem vzácných zemin (monazit, xenotim). Monazit byl ve vzorku pozorován nejen ve formě inkluzí v minerálních zrnech ale i samostatně. Ve vzorku 146C byl dále bodovou analýzou zjištěn uraninit, Ca, Al alterovaný zirkon, drobné výskyty hematitu a hydroxidů Fe. Analýzou slíd byl potvrzen muskovit s malým obsahem Fe, Mg, v zonálních zrnech slídy byly zjištěny fáze s oxidy Nb, Ta. Byl potvrzen výskyt plagioklasu (albit) a draselného živce. Ve výbruse 146D byl dále jako akcesorický minerál zjištěn kasiterit (Obr. 11c), jílové minerály a fosfáty s obsahem Th a Ca.



Obr. 11. Zrno apatitu s inkluzemi monazitu (3) a xenotimu (4) ve zpětně odražených elektronech (a) vykazující luminescenční zonálnost (b). Šipky s čísly na snímku a odkazují k bodovým analýzám uvedeným v příloze II. A. Drobné zrno kasiteritu (c) ve zpětně odražených elektronech (vzorek 146D).

Pomocí CL detektoru byla ve studovaných horninách zjištěna přítomnost mikrostrukturních jevů, které nelze pozorovat ve viditelném světle v optickém mikroskopu. Jedná se zejména o křemenná zrna s dobře patrnou růstovou zonálností a výrazným postižením systémem křemenných žilek bez luminiscence (Obr. 12.)



Obr. 12. Růstová zonálnost křemenných zrn (vzorek 146D) protnutých systémem křemenných žilek bez výrazné luminiscence (a, c) při pozorování CL detektorem. Při pozorování ve zpětně odražených elektronech (b, d) jsou zrna celistvá bez patrných známek postižení.

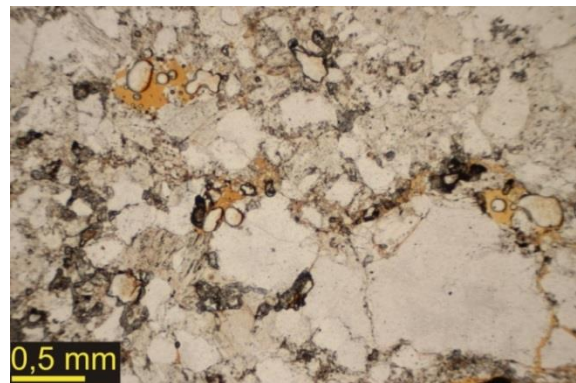
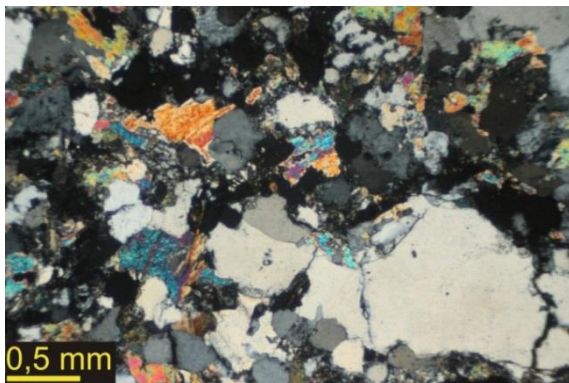
6.3 Petrografické vlastnosti materiálu ze sloupu Nejsvětější Trojice

6.3.1 Makroskopický popis

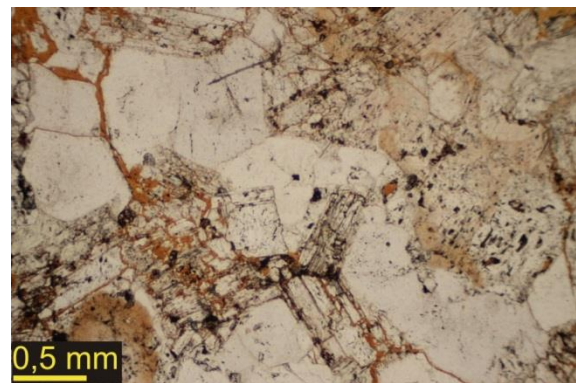
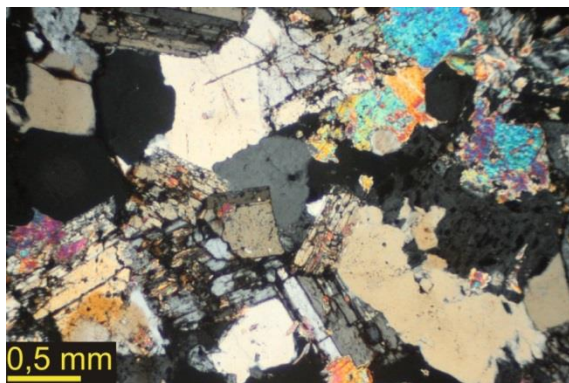
Při makroskopickém pozorování horniny (in situ na památce) lze materiál popsat jako jemně zrnitou, celistvou horninu spíše granitoidního charakteru. Barva horniny je světlá, šedavá místy narůžovělá i žlutavá. Makroskopicky jsou pozorované křemeny, světlá slída a vyrostlice živců. Hojně se na materiálu vyskytují dutiny mm rozměrů, které jsou zbarveny oxidy železa do červeno hněda.

6.3.2 Základní optická mikroskopie

Ve výbrusech vzorku S0258/IV, S0258/V (Obr. 13., 14.) odebraných z plastiky z výklenku za sochou sv. Norberta byly pomocí polarizační optické mikroskopie jako hlavní horninotvorné minerály identifikovány: křemen v podobě křemene magmatického a xenomorfně omezenými zrny křemene novotvořeného s širokou velikostní distribucí zrn od 0,1mm až 1,4mm (45%). Světlá slída (15%) nahrazuje původní živce, velikost jednotlivých zrn slídy se opět pohybuje od drobných 0,1mm zrn až po zrna v řádech prvních mm. Dobře patrné jsou relikty draselných živců i plagioklasů. Místy jsou hojně postižené a nahrazené slídou (pseudomorfóza). Plagioklas je zastoupen albitem, který se vyskytuje v drobných úlomcích původních lišt (S0258/IV) s patrným lamelováním. Ve vzorku S0258/V jsou živce lépe zachovány, živcové tabulky dosahují místy velikostí $2 \times 0,5$ mm. Vzorek S0258/V je v porovnání s S0258/IV místy hrubozrnnější, nicméně v obou případech se jedná o horninu jemnozrnnou až drobnozrnnou. Jako akcesorické minerály byly ve výbrusech identifikovány pomocí základní optické mikroskopie apatit s velikostí zrn až 0,2mm, zirkon a jílové minerály. Póry se v hornině objevují v podobě malých izolovaných pórů, podél hranic zrn i jako mikropóry v extrémně jemnozrnné hmotě (další mikrofotografie přílohy I. B). Horninu lze na základě optické mikroskopie klasifikovat jako greisenizovanou žulu.

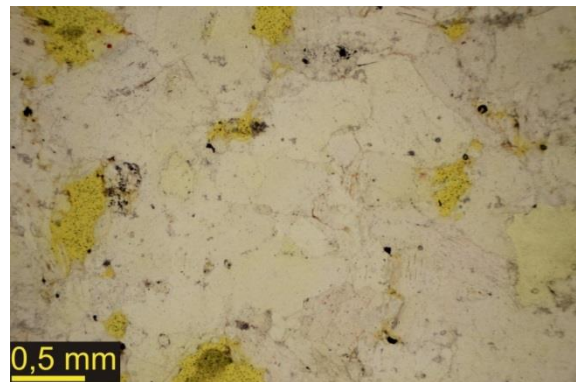
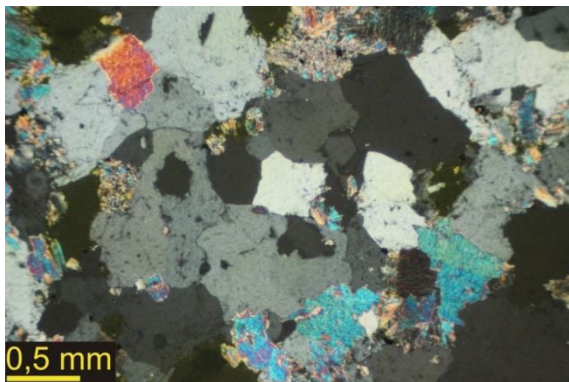


Obr. 13. Mikrofotografie výbrusu S0258/IV se zkříženými a paralelními nikoly.

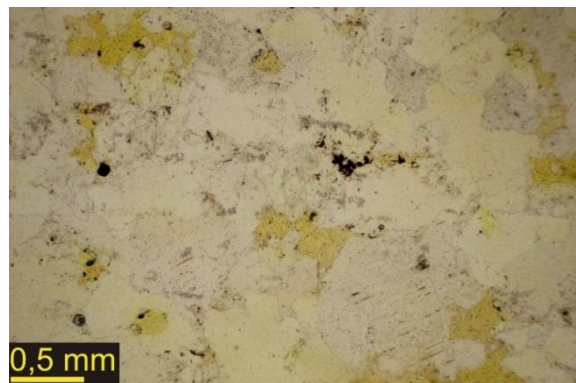
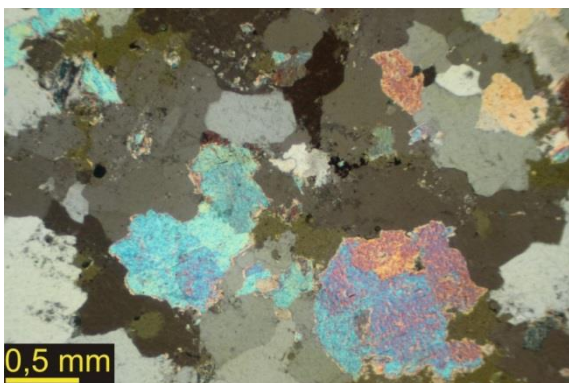


Obr. 14. Mikrofotografie výbrusu S0258/V se zkříženými a paralelními nikoly.

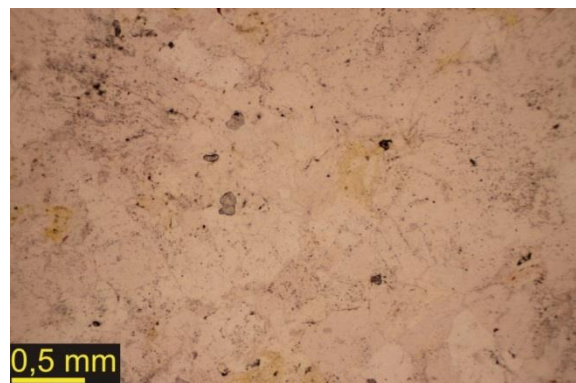
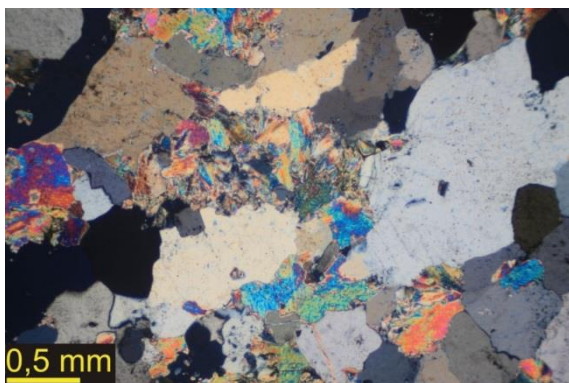
Výbrusy vzorků S0258/VI, S0258/VII a S0258/VIII zhotovené z horniny použité na balustrádu obepínající vlastní sloup (Obr. 15., 16., 17.) lze na základě optické mikroskopie popsat následovně. Jedná se o drobnozrnnou až jemnozrnnou horninu tvořenou převážně křemenem (~70 obj. %) a světlou slídou (~15 obj. %), jílovými minerály a dalšími produkty hydrotermálních přeměn (~10 obj. %). Zhruba 5 obj. % zaujímá pórový prostor. Vzorky hornin z balustrády se zdají více homogenní než vzorky z vlastní architektury sloupu (S0258/IV, S0258/V). Křemenná zrna ve výbrusech dosahují velikosti až 3,2 mm (výbrus S0258/VII), křemeny jsou zastoupeny převážně xenomorfně omezenými zrny. Živce nejsou v hornině pozorovány ani v podobě relictů, došlo k úplnému nahrazení živců slídou. Hornina se jeví mineralogicky dosti chudě a z akcesorických minerálů byly pomocí polarizační mikroskopie identifikovány pouze hojné Fe oxidy, místy zabarvující výbrusy hnědočervenou barvou. Na základě optické mikroskopie lze horninu klasifikovat jako křemenný až slídnato - křemenný greisen.



Obr. 15. Mikrofotografie výbrusu S0258/VI se zkříženými a paralelními nikoly.



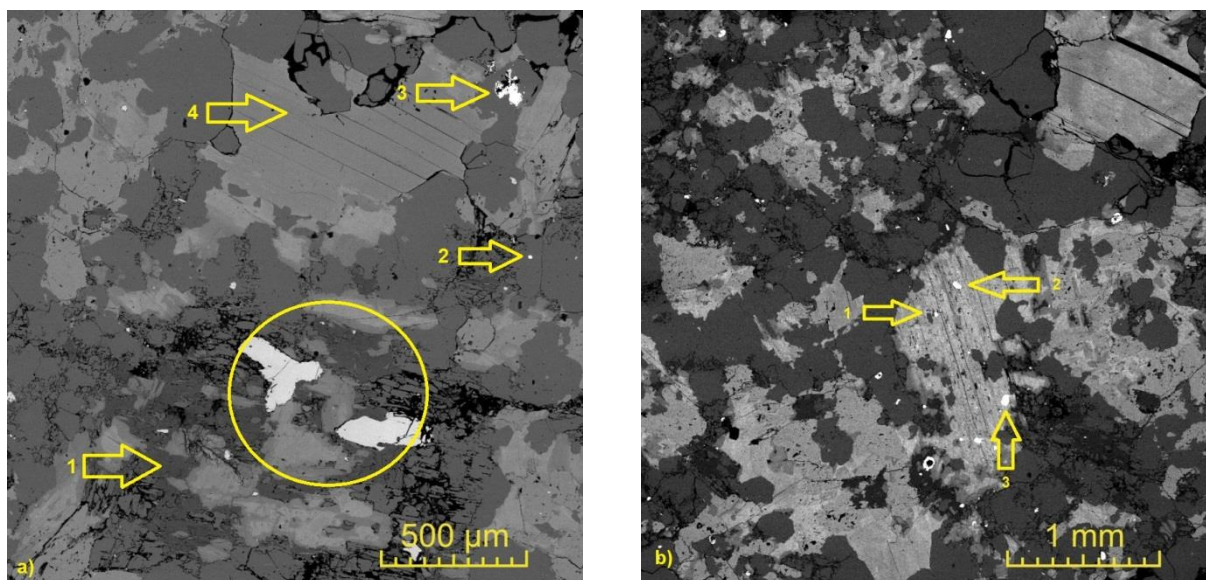
Obr. 16. Mikrofotografie výbrusu S0258/VII se zkříženými a paralelními nikoly.



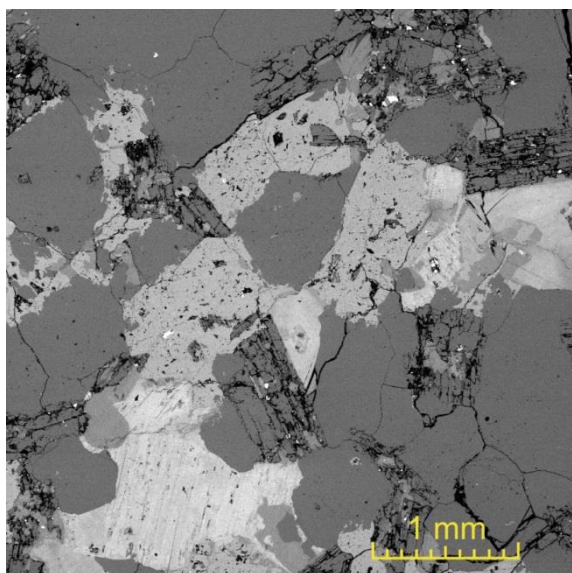
Obr. 17. Mikrofotografie výbrusu S0258/VIII se zkříženými a paralelními nikoly.

6.4 Elektronová mikroanalýza SEM

Ve vzorcích S0258/IV a S0258/V byly jako akcesorické minerály identifikovány, apatit (Obr. 18a), který se ve výbruse S0258 V vyskytuje s inkluzemi REE, Al, P a Sr po trhlinách, dále kasiterit, monazit a zirkon (s vysokým obsahem U a Th) - mnohde jako uzavřeniny v muskovitu, jílové minerály (kaolinit). Ve výbruse S0258 V byl dále pozorován drobný galenit. Ve vzorku S0258 IV je potvrzen albit a K-živce, ale výskyt živců není výrazný. Je pozorován muskovit primární (velká zrna) i slídy novotvořené s hojnými inkluzemi (Obr. 18b). Ve vzorku S0258 V jsou živce a jejich relikty pozorovány hojně (Obr. 19.). V obou výbrusech je v SEM-CL pozorováno hydrotermální žilkové vyhojení křemenných zrn.



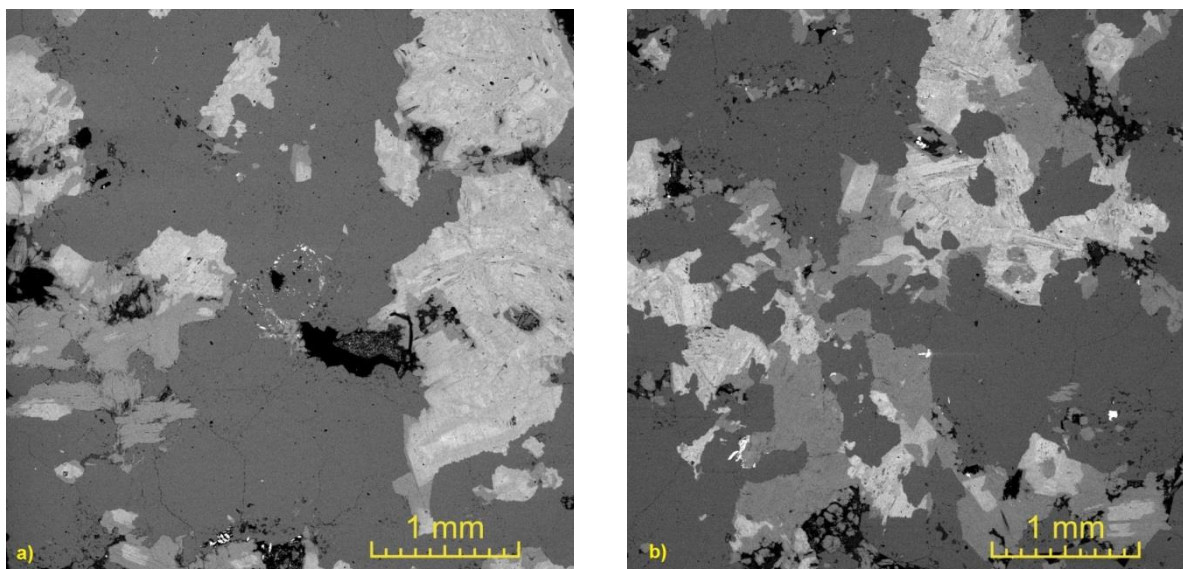
Obr. 18. Mikrofotografie ve zpětně odražených elektronech S0258/IV: a) apatit (v kruhu, bodová analýza č. 1 viz. Příloha II. B) 1 - kaolinit, 2 - zirkon, 3 - kasiterit, 4 - muskovit primární; b) 1 - zirkon, 2 - apatit, 3 - monazit.



Obr. 19. S0258/V líšty albitu.

Vzorky S0258/VI, S0258/VII, a S0258/VIII byly při pozorování v SEM oproti předchozím preparátům chudé na akcesorické fáze. Ve všech vzorcích byly hojně zjištěny pouze oxidy Fe, často vázané na dutiny s jílovými minerály. Dále byly ve všech třech výbrusech pozorovány drobné výskyty oxidů Nb a Ta, které ve vzorku S0258/VII tvoří společně s oxidy W, Mn kruhové shluky (Obr. 20a.) Ve výbrusech zhotovených z horniny balustrády nebyly pozorovány žádné živce, a to ani v reliktech. Ve

vzorku S0258/VI bylo dále pozorováno drobné zrnko xenotinu uzavřené v křemeni, ve vzorku S0258/VII a VIII byl identifikován apatit vyskytující se jako drobná zrnka v křemeni.



Obr. 20. Mikrofotografie materiálu odebraného z balustrádového zábradlí v BSE: a) S0258VII kruhové shluky oxidů Nb, Ta (uprostřed snímku, výsledky bodových analýz viz tabulka přílohy II. B. S0258VIII pohled na celkovou strukturu s akcesorickým výskytem Fe oxidů (bodová anal. 7, Tab. P3. přílohy II. B)

Pomocí mikroanalýzy chemického složení byl dále ve vzorcích (I) a (II) skupiny stanoven obsah fosforu v albitu a K-živci. Naměřené hodnoty (příloha II. C) P_2O_5 v (hm. %) ukazují na vývoj z peraluminických granitů bohatých fosforem.

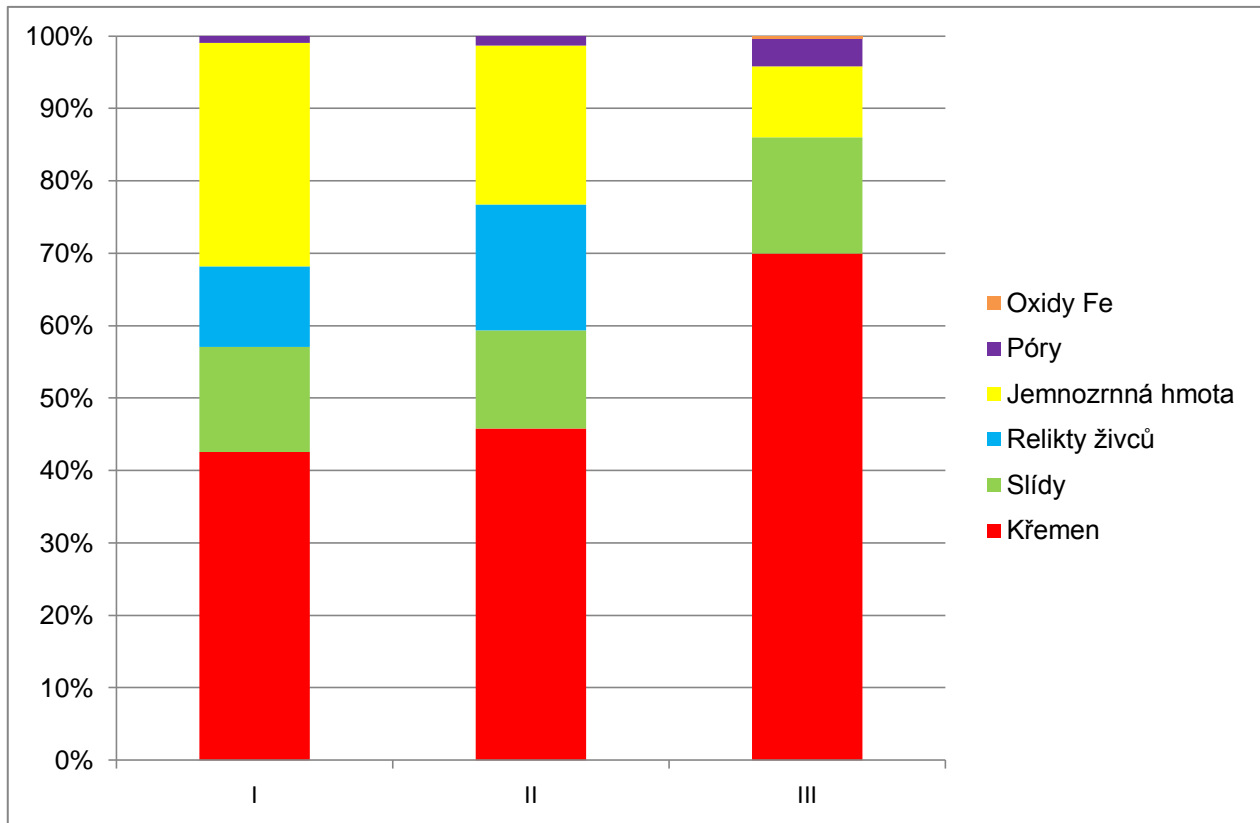
Maximální naměřené hodnoty P_2O_5 byly v albitu a K-živci ve výbrusu (146C) 0,34 respektive 0,08 hm. % a ve výbruse (S0258/V) 0,12 respektive 0,28 hm. %. Naměřené hodnoty jednotlivých analýz ve vzorcích mají značný rozptyl i v rámci jednotlivých zrn.

6.5 Kvantitativní stanovení pomocí petrografické obrazové analýzy

Ve výbrusech byla analyzována jednotlivá zrna: křemene, slíd, reliktů živců a dále plochy extrémně jemnozrné hmoty alteračních produktů (extrémně jemnozrné slídy jílové minerály a útržky okolních minerálů, akcesorické minerály, pórový prostor). Pokud bylo možné vymezit izolované póry samostatně, byly analyzovány jako další fáze. Ve výbrusech z horniny balustrády byly dále samostatně analyzovány plochy s hojným výskytem Fe oxidů. Na všech mikrofotografiích byly plochy pro analýzu vybírány při stejném zvětšení snímku. Z každého výbrusu bylo analyzováno přibližně 600 samostatných objektů. Zpracované výsledky z obrazové analýzy výbrusů jsou uvedeny v příloze č. III.

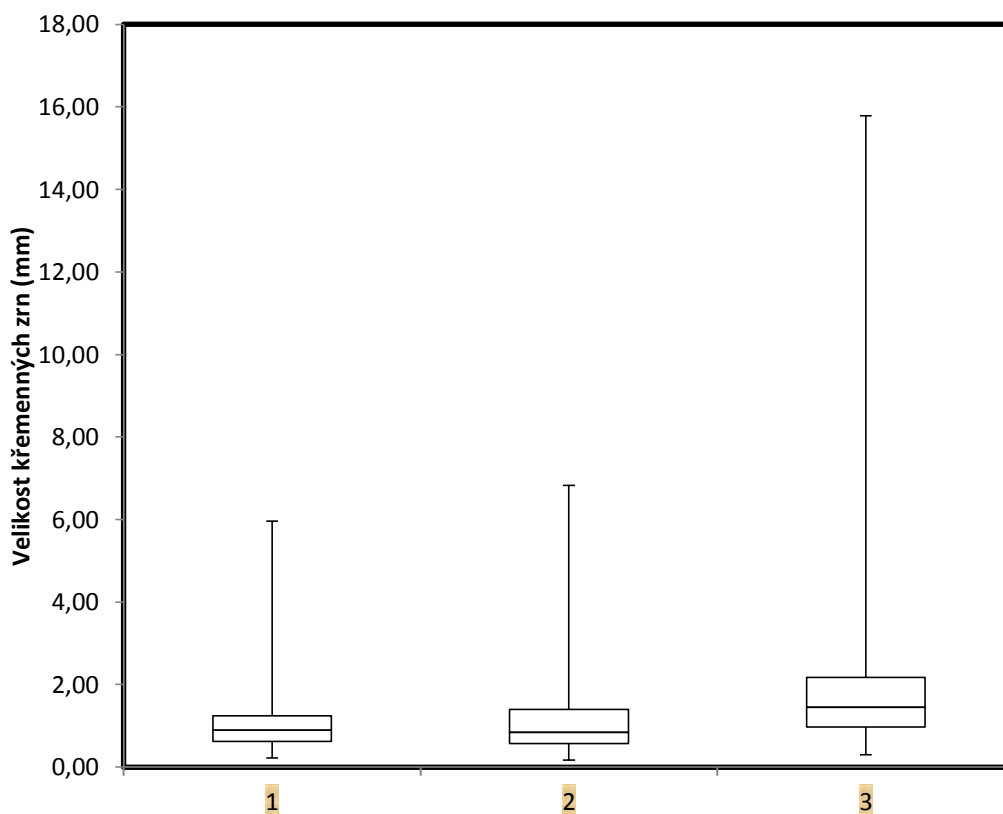
Horniny odebrané z opuštěného lomu (skupina hornin I na Obr. 21.) obsahují: křemen 42,5 obj. %, slídy 14,5 obj. %, reliktů živců 11,1 obj. % a 30,8 obj. % plochy zaujímá extrémně jemnozrná hmota (produkty seritizace, jílové minerály, další akcesorické fáze, úlomky okolních zrn a póry). Vzorky odebrané z výklenku za sochou sv. Norberta (skupina hornin II na Obr. 21.) jsou svým modálním složením velmi blízké hornině z lomu, křemen 45,8 obj. %, reliktů živců 17,4 obj. %, 21,9 obj. % plochy zaujímá jemnozrná hmota a 1,3 obj. % tvoří analyzovaný pórový prostor. Vzorky hornin z balustrády (III na Obr. 21.) mají výrazně vyšší obsah křemene (až 70 obj. %) a slíd (16 obj. %) na úkor živců, které v těchto vzorcích nebyly patrné. Dále je patrný značný úbytek výskytu ploch tvořených

extrémně jemnozrnnou hmotou. Výrazný je také nárůst analyzovaného pórového prostoru, který se na výbrusech vyskytuje v izolovaných pórech, dosahujících místy velikosti až 0,7 mm.



Obr. 21. Poměrné zastoupení hlavních horninotvorných součástí ve studovaných materiálech z opuštěného lomu (I), z vlastní architektury sloupu (II) a z balustrády (III).

U studovaných hornin byla pomocí počítačové analýzy obrazu dále podrobně analyzována zrnitost horninotvorných minerálů. Zrnitost byla vyjádřena pomocí tzv. ekvivalentního průměru, což je průměr kruhu, zaujímajícího stejnou plochu jako analyzované zrno nepravidelného tvaru. Takto definovaná zrnitost však byla měřena pouze u zřetelně odlišitelných zrn, v oblastech s velmi jemnozrnnou alterační matrix nebylo možné určit zrnitost tímto způsobem. Při posuzování zrnitosti studovaných hornin byla nejvíce zohledněna zrnitost křemene, který je hlavní a ve většině hornin převládající fází. U křemenných zrn lze, na rozdíl od relativně hojných slíd, předpokládat relativně izotropní tvary v jakémkoliv řezu. Průřezy křemennými zrny ve studovaných výbrusech tedy nejvíce vyjadřují zrnitost studovaných hornin. Z výsledků vyplývá (Obr. 22.) značná shoda v zrnitostních parametrech křemenných zrn hornin z historického lomu a z architektury sloupu a zřetelně odlišný charakter zrnitosti horniny z balustrády.



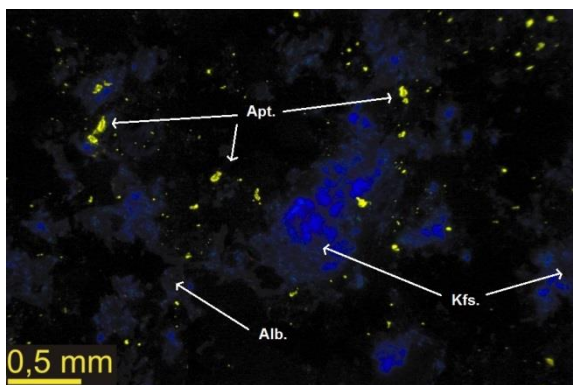
Obr. 22. Rozsah zrnitosti analyzovaných křemenných zrn ve studovaných materiálech z opuštěného lomu (1), z vlastní architektury sloupu (2) a z balustrády (3).

Hodnoty obvodu křemenných zrn u jednotlivých hornin korelují s rostoucí zrnitostí, u horniny odebrané v opuštěném lomu a horniny z vlastní architektury sloupu se průměrný obvod křemenného zrna pohybuje v hodnotách 1,04 mm respektive 1,10 mm. Průměrný obvod křemenných zrn III. vzorku z kuželky balustrády je 1,81 mm. Stejnou narůstající tendenci pozorujeme u parametru délky hlavní osy 0,34 mm, 0,37 mm, a 0,60 mm u hornin I, II a III skupiny. Další zjištěné mikrostrukturní parametry jednotlivých křemenných zrn jsou uvedeny v tabulkách přílohy č. III.

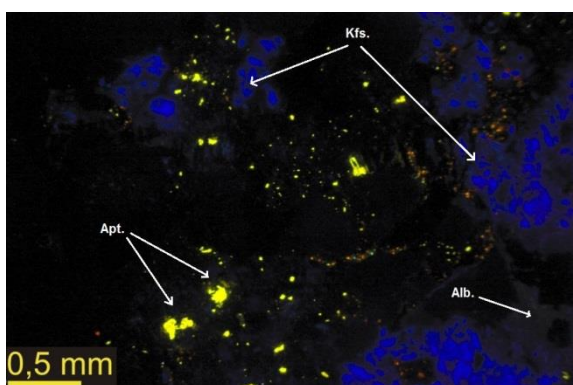
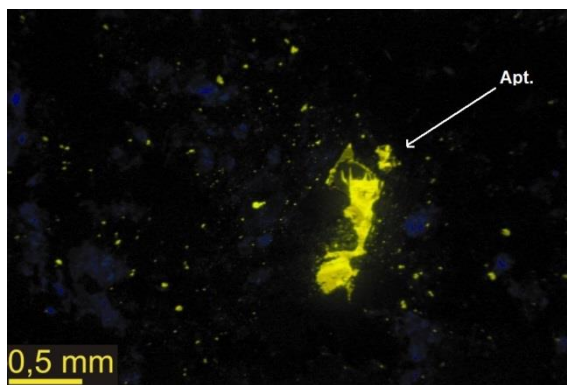
Průměrná hodnota obvodu ploch velmi jemnozrné alterační matrix v jednotlivých horninách poukazuje na úbytek těchto alteračních produktů ve III. skupině vzorků, kde dosahuje 1,59 mm u hornin skupiny I (1,90 mm) a II (1,99 mm). Hodnoty dalších sledovaných mikrostrukturní parametrů analyzovaných fází jednotlivých hornin jsou uvedeny v tabulkách přílohy č. III.

6.6 Katodová luminiscence

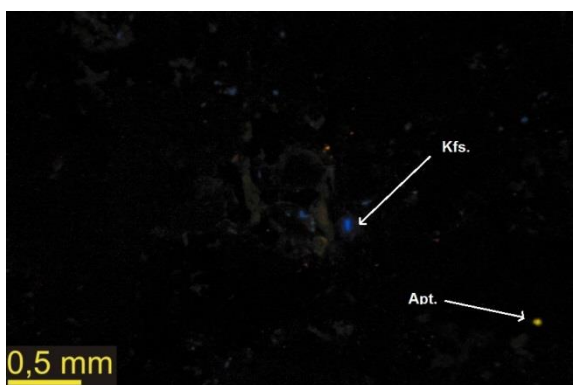
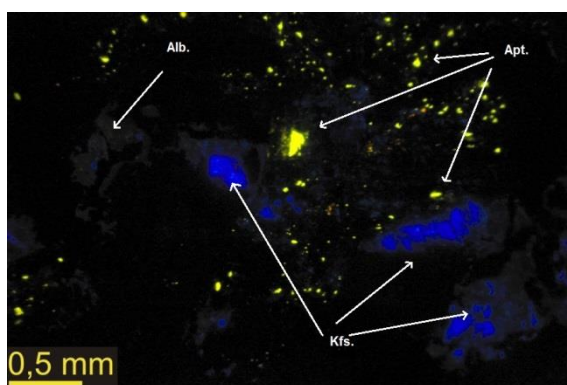
Pomocí katodové luminiscence byla v horninách pozorována distribuce akcesorických fází a plošné rozmištnění živců v jednotlivých horninových výbrusech. Distribuce hlavního akcesorického minerálu apatitu, horniny odebrané v lomu, je v případě vzorku 146C shodná se vzorky S0258/IV a S0258/V, jak ukazují mikrofotografie (Obr. 23. a 24.) Drobná zrnka apatitu (Apt.), (žlutá luminiscence) jsou rozptýlena v ploše celých výbrusů a jsou soustředěna do oblastí výskytu živcových zrn nebo jejich reliktnů. Ve zmíněných výbrusech místy pozorujeme zrna albitu (Alb.) větších rozměrů s šedou luminiscencí. Draselné živce (Kfs.) projevující se modrou luminiscencí pozorujeme zřetelněji ve výbrusech S0258/IV a V.



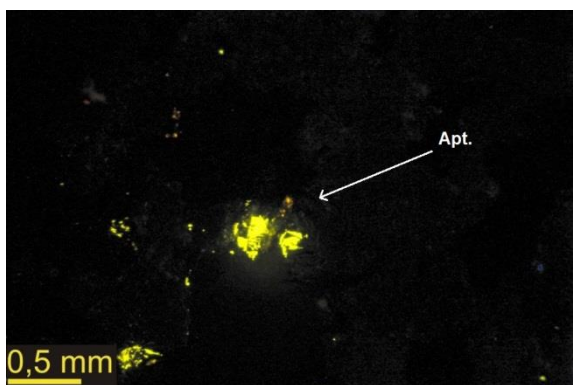
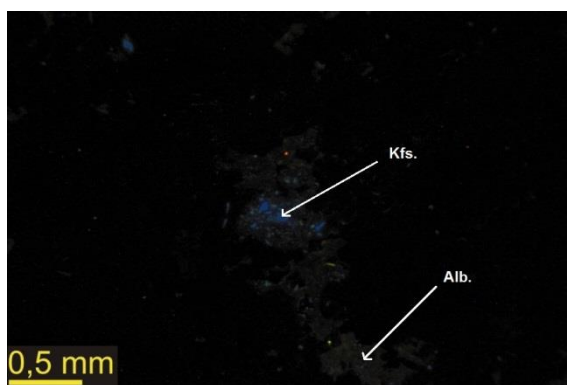
Obr. 23. Mikrofotografie snímané při katodové luminiscenci vzorku 146C.



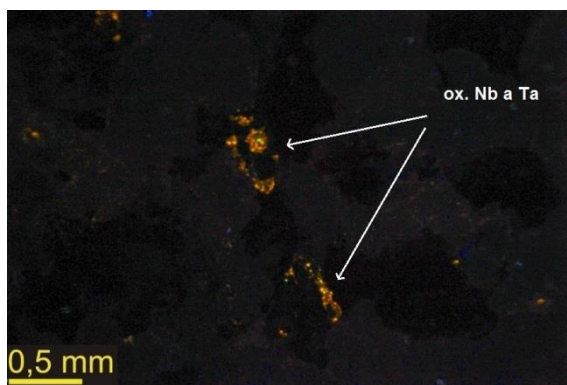
Obr. 24. Mikrofotografie snímané při katodové luminiscenci vzorku S0258/IV (vlevo) a S0285/V (vpravo).

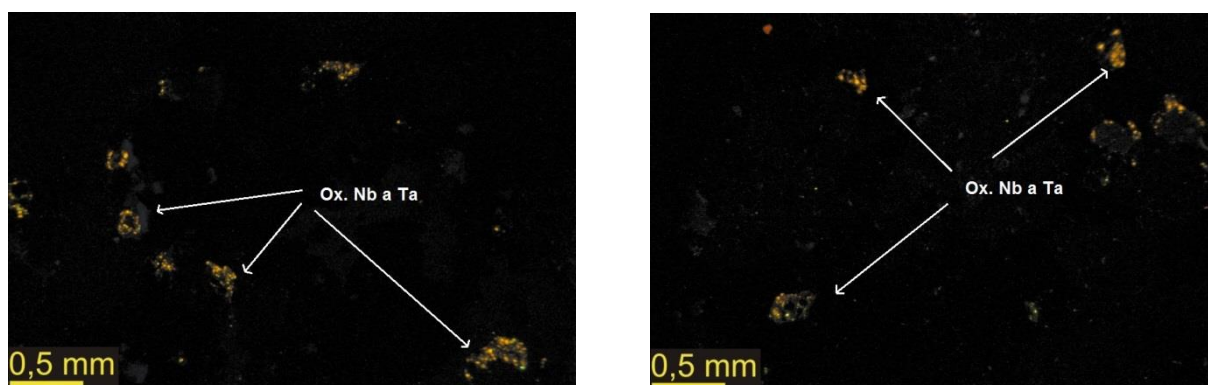


Obr. 25. Mikrofotografie snímané při katodové luminiscenci vzorku 146D.



Obr. 26. Mikrofotografie snímané při katodové luminiscenci vzorku S0258/VI





Obr. 27. Mikrofotografie snímané při katodové luminiscenci vzorku S0258/VII (vlevo) a S0258/VIII (vpravo).

Ve výbruse zhotoveném z horniny z lomu s označením 146D (Obr. 25.) nebyl pozorován zřetelný plošný výskyt apatitu ani draselného živce a luminiscenční projevy jednotlivých akcesorických fází jsou bližší pozorovaným vzorkům S0258/VI, VII a VIII (Obr. 26., 27.) u kterých jsou charakteristické luminiscenční barvy živců i apatitu pozorovány vzácně až ojediněle. Luminiscenční barvy oranžovou až červenou pozorujeme pouze na shlucích akcesorických fází oxidů Nb a Ta.

6.7 Fyzikální vlastnosti horniny odebrané z lomu

Zjištěné základní indexové fyzikální vlastnosti horniny odebrané v lomu (146C a 146D) shrnuté v (Tab. 4.) ukazují, že v případě materiálu (146C) se hodnoty objemové hmotnosti vyjádřené jako poměr hmotnosti a objemu vzorku pohybují od 2,366 g/cm³ do 2,396 g/cm³ u vzorku (146D) 2,447 g/cm³ až 2,479 g/cm³, což jsou běžné hodnoty u hornin s převahou světlých minerálů. Hodnoty nasákavosti za atmosférického tlaku (po 5 dnech) se v obou případech pohybují pod hodnotou 3 hm. %, u vzorku (146C) pozorujeme vyšší hodnoty nasákavosti za atmosférického tlaku než u vzorku (146D). Zdánlivá pórovitost respektive otevřená pórovitost byla vyšší u vzorku (146D) a maximální hodnota otevřené pórovitosti dosáhla hodnoty 6,35 obj. %. Podrobné statistické zhodnocení sledovaných parametrů je uvedeno v tabulkách IV. přílohy.

Tab. 4. průměrné hodnoty indexových fyzikálních vlastností vzorků horniny odebraných z opuštěného lomu u Pramenů 146C a 146D.

Materiál odebraný v opuštěném lomu vzorek:	Objemová hmotnost (celková hustota) $\rho_{b(s)}$ (g/cm ³)	Nasákavost za atm. tlaku NV_u (hm. %)	Zdánlivá pórovitost (otevřená) P_z (obj. %)
146C	2,386	2,56	6,10
146D	2,464	2,20	5,41

Dynamické přetvárné vlastnosti studovaného materiálu (dynamický modul, Poisonova konstanta, střížný modul) vyjádřené pomocí rychlosti šíření akustických vln tělesy (Tab. 5.) ukazují na vyšší hodnoty u všech sledovaných parametrů v případě vzorku (146C). Vyšší rychlost šíření podélných vln ve vzorku 146C koreluje s vyššími hodnotami dynamického modulu 23,59 GPa v suchém tělese. Ve vzorku 146D je hodnota dynamického modulu 14,19 GPa, což vychází z výrazně nižších rychlostí průchodu příčné vlny tělesem. Jistá nehomogenita těchto vlastností v rámci jednoho ložiska je ovlivněna zonálním systémem greisenizovaných žulových těles.

Tab. 5. průměrné hodnoty dynamických přetvárných vlastností vzorků horniny odebraných z opuštěného lomu u Pramenů 146C a 146D.

Materiál odebraný v opuštěném lomu, vzorek:	Rychlost podélných vln $v_{P(s)}$ v (m/s) suchý/mokvý	Rychlost příčných vln $v_{(s)}$ v (m/s) suchý/mokvý	Dynamický modul $E_{dyn(s)}$ v (GPa) suchý/mokvý	Poissonova konstanta $\nu_{(s)}$ v (-) suchý/mokvý	Střižný modul $\mu_{(s)}$ v (GPa) suchý/mokvý
146C	3232 / 3745	2073 / 2041	23,59 / 26,27	0,15 / 0,29	10,26 / 10,19
146D	2431 / 2898	1612 / 1460	14,19 / 14,28	0,11 / 0,33	6,41 / 5,37

Statistické vyhodnocení měřených indexových fyzikálních a dynamických přetvárných vlastností horninového materiálu odebraného v opuštěném lomu u Pramenů je uvedeno v tabulkách IV. přílohy.

Doplňkově byla provedena silikátová analýza materiálu z lomu. Vzorky určené na tuto analýzu byly připraveny v drtírně ÚGMNZ PřF UK v Praze. Horninový materiál byl nejdříve nadrcen v čelistových drtičích a následně namlet na analytickou jemnost. Výsledky silikátové analýzy jsou uvedeny v příloze č. V za textovou částí.

7 DISKUSE

7.1 Aplikace greisenů ve stavebnictví a sochařství

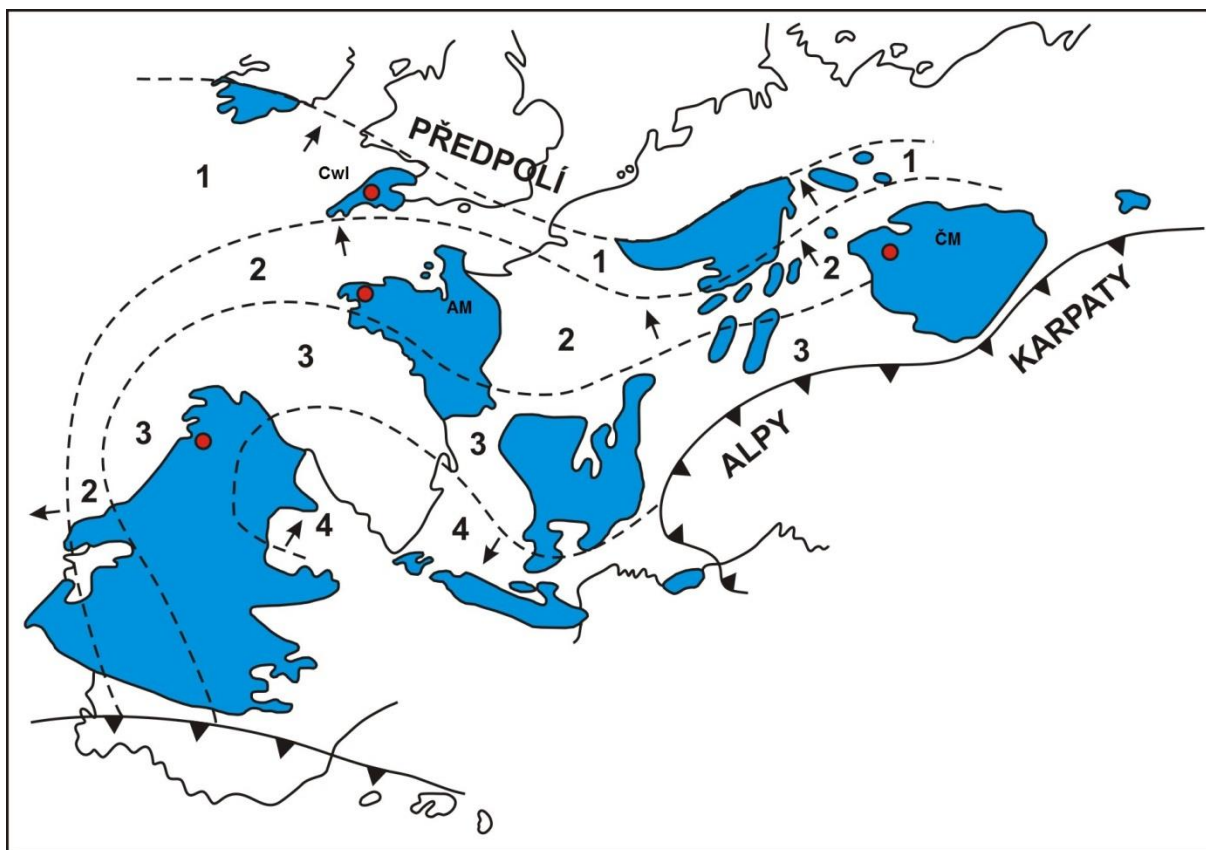
Použití greisenu, horniny těžené primárně pro získávání rudní složky ve stavebnictví a sochařství, je pro oblast Slavkovského lesa a blízkého okolí typické. Hornina, která byla v této oblasti hlubinně dobývána od 13. st. zejména pro získávání Sn – W rud (Beran a Sejkora 2006), našla v těchto oborech přirozené využití jako „vedlejší produkt“ získaný právě při těžbě rudy, případně v později založených lomech, kde byl přírodní kámen primární těženou složkou právě jako v greisenizovaném žulovém prameni u Pramenů. Zde byl dobýván tzv. sangerberský kámen (dle staršího názvu obce Prameny – Sangerberg) hojně uplatňovaný ve stavbách Mariánskolázeňska hlavně v 19. st. (Rybařík 2000).

Žulový peň u Pramenů lze na základě petrografického studia označit jako zdrojovou lokalitu původního kamenného materiálu, který byl použit i při stavbě barokní památky, sloupu Nejsvětější Trojice v nedalekém městě Teplá (viz. Obr. 6). Uplatňování greisenu ve stavebnictví a sochařství bylo vzhledem k možnostem blokové těžby přírodního kamene z granitoidního tělesa přirozeným vyústěním efektivního využívání lokální suroviny. Hornina byla využívána i vzhledem k snadné opracovatelnosti kamene postiženého sledem postmagmatických přeměn, které přispěly ke zvýšení pórovitosti původní hůře opracovatelné žuly. Hornina těžená u Pramenů, tedy greisenizovaná žula až greisen, byla označována již dříve jako dosti kvalitní s ohledem na využití v sochařství a stavebnictví, jak uvádí závěrečná zpráva základního geologického výzkumu Císařského (Slavkovského) lesa, provedeného v letech 1955 – 1960 (Fiala a kol. 1962). Využití greisenizované žuly případně greisenů například při stavbě známého a rozsáhlého kláštera premonstrátů ve městě Teplá není v publikaci zabývající se kamenným materiálem stavby uváděno. V této stavbě se bohatě uplatňuje např. trachyt těžený nedaleko kláštera (Lehrberger a Gillhuber 2004).

Dekorativní charakter, vyhledávaný parametr u hornin používaných k sochařskému opracování, není u greisenů nikterak exklusivní. Hornina své uplatnění v sochařství a stavebnictví v Čechách nachází pouze v oblastech úzce spjatých s místy historické těžby rud vázaných na granitoidní tělesa variské metalogeneze. Vzdálenost, na kterou lze aplikaci greisenů do stavebnictví pozorovat lze odhadnout na maximálně 20 km od míst těžby rud, což by mohlo odpovídat tehdejšími přepravními možnostmi. Vzdálenější využívání greisenu např. v sochařství není předpokládáno hlavně vzhledem ke zmíněné nízké exkluzivitě dekorativního charakteru materiálu.

7.2 Evropské variscidy - greiseny

Greiseny a s nimi spojená Sn ložiska vyskytující se v České republice nejen v oblasti Slavkovského lesa, lze v širším měřítku označit jako charakteristický metalogenetický prvek variscid. Greiseny jsou podmíněny přítomností granitoidních plutonů, které intrudovaly ve svrchním karbonu nebo spodním permu do provrásněných nebo metamorfovaných hornin staršího paleozoika nebo prekambria. Výskyty Sn ložisek je možné spojit v jeden pás, táhnoucí se severozápadního okraje Českého masívu (ČM) do Armorického masívu (AM) a Cornwallu (Cwl) a v mírném oblouku do oblasti Hesperického masívu (Štemprok a Tenčík 1986), (Obr. 28.). Například na oblast Cornwallu v jihozápadní Anglii se váže dlouhá historie těžby Sn rud z greisenu (Buckley 2005), nicméně o aplikaci greisenu v sochařství nebo stavebnictví nejsou v literatuře zmínky. Další historickou těžbu Sn rud v Evropě lze pozorovat v oblasti Pyrenejského poloostrova (Portugalsko, Španělsko), kde je mineralizace stejně jako v předchozích případech vázaná na plutonická granitoidní tělesa (Sainsbury 1969). Ve všech těchto oblastech lze předpokládat aplikaci greisenu do stavebnictví, například v návaznosti na efektivní využívání vytěžené hlušiny při těžbě rudy. Nicméně, jak bylo zmíněno, konkrétní případy zatím popsány nebyly.



Obr. 28. Schematické znázornění denudovaného variského horstva (modře) s příklady oblastí historicky těžených Sn ložisek z greisenů (červeně). 1- rhenohercynská zóna, 2 – sasko-durynský zóna, 3 – moldanubická zóna, 4 – jihoevropská zóna (převzato a upraveno podle Bromleye a Holla 1986).

7.3 Možnosti stanovení zdrojové oblasti greisenů na památkách

Pro zjištění zdrojové lokality původního kamenného materiálu barokní památky sloupu Nejsvětější Trojice v Teplé bylo pro účely této práce použito mineralogicko-petrografických metod založených na porovnávání vzorku odebraném z památky při restaurátorském zásahu s greisenizovanou žulou odebranou z nedalekého historického lomu na stavební kámen. Zjištění proveniencí přírodního kamene bylo založeno na detailní petrologické charakteristice studovaného materiálu s využitím metod používaných například pro zjišťování proveniencí mramorů hojně uplatňovaného právě v sochařství a stavebnictví (Šťastná a Příkryl 2010).

Ve studovaných skupinách vzorků I, II a III byly pomocí mikroskopického zkoumání rozlišeny rozdíly v zastoupení hlavních horninotvorných složek, akcesorických fází a dalších mikrostrukturních parametrů. Pomocí skenovací elektronové mikroskopie byly upřesněny akcesorické fáze studovaných vzorků a při použití CL detektoru byly pozorovány charakteristické mikrostrukturní parametry. Základní petrografické parametry studovaných hornin (Tab. 6.) ukazují, že v hornině kuželky balustrády (skupina vzorků III) chybí živce jako vedlejší horninotvorný minerál a celkově je hornina proti vzorku z lomu a z vlastní architektury sloupu chudší na akcesorické fáze. Apatit, pozorovaný ve skupinách vzorků I a II jako hlavní a hojná akcesorická fáze, je ve skupině vzorků III pozorován velmi vzácně.

Tab. 6. Porovnání složení horninového materiálu ve třech studovaných skupinách vzorků.

Skupina vzorků	Hlavní minerály	Vedlejší minerály	Akcesorické minerály	Zrnitost a klasifikace horniny
I - Materiál odebraný z lomu 146C, 146D	křemen, světlé slídy	albit, K-živce	apatit, jílové minerály, monazit, xenotim, kasiterit, zirkon	jemnozrnný greisenizovaný granit
II - Materiál odebraný z vlastní architektury sloupu S0258/IV, S0258/V	křemen, světlé slídy	albit, K-živce	apatit, jílové minerály, monazit, kasiterit, zirkon	jemnozrnný greisenizovaný granit
III - Materiál balustrády S028/VI, S0258/VII, S0258/VIII	křemen, světlé slídy	-	oxidy Fe	drobnozrnný křemenný greisen

Při pozorování horninových výbrusů na skenovacím elektronovém mikroskopu s použitím CL detektoru byly ve všech třech skupinách vzorků pozorovány mikrostrukturní projevy převážně na plutonických křemenných zrnech, a to charakteristická růstová zonálnost a vyhojení mikrotrhlin křemenných zrn (Obr. 12. výše), projevující se při pozorování na CL detektoru jako síť černých linií v rámci jednotlivých zrn. Tyto vyhojené žilky nejsou patrné při pozorování výbrusu ve zpětně odražených elektronech, což indikuje, že materiál, kterým jsou mikrotrhliny vyhojeny, je shodného složení jako okolní zrno čili SiO_2 . Podle Boggse a Krinsleye (2006) je vznik mikrotrhlin v křemenných zrnech způsoben přechodem beta křemene na alfa křemen, k čemuž dochází v průběhu chladnutí magmatu při teplotách 570 až 600 °C.

Růstová zonálnost byla pozorována u skupin vzorků I a II i na hlavním akcesorickém minerálu apatitu. Apatit je charakteristickou akcesorií právě v původním granitu mladšího intruzivního komplexu, v literatuře označovaném jako kladská žula (Fiala 1968), v jehož masivu se pozdějšími autometamorfními pochody vyvinul greisen. Granity mladšího intruzivního komplexu jsou charakteristické právě zvýšeným obsahem fosforu (Breiter 2012). Pomocí bodové mikroanalýzy chemického složení byl dále sledován obsah fosforu v živcích (Frída a Breiter 1995). U obou sledovaných skupin vzorků I a II lze sledovat stejné trendy v obsahu P_2O_5 v albitu i K-živci.

Pomocí petrografické obrazové analýzy byly kvantitativně vyjádřeny hlavní horninotvorné fáze studovaných vzorků. Z výsledků je patrné, že v hornině kuželky balustrády (skupina vzorků III) má převládající zastoupení křemen, který zaujímá 70 obj. %, na rozdíl od ostatních pozorovaných skupin vzorků I a II, kde se vyskytuje v rozmezí 42 – 46 obj. %.

Studované horniny se rovněž liší zrnitostí (viz Obr. 22. výše). Na základě kvantitativního vyjádření velikosti zrn lze horniny I a II skupiny klasifikovat podle Teuscherovy klasifikace jako horniny jemnozrnné a horninu III jako drobnozrnnou.

Při aplikaci PIA na zjištění zdrojové lokality přírodního kamene použitého na památky, v tomto případě na horninu postiženou sledem autometamorfních přeměn, je nutné brát zřetel na omezení, vyplývající ze samotného složení horniny. Ve studovaných vzorcích lze pozorovat hojně zastoupená (31 obj. %) extrémně jemnozrnná zrna alteračních produktů, které tvoří společně s pórovým prostorem více či méně souvislé shluky. Tyto fáze není možné pomocí PIA hodnotit samostatně jako jednotlivé objekty a je nutné tyto fáze kvantifikovat jako směsné plochy. Z tohoto důvodu není možné pozorovat měřené parametry vztahující se k jednotlivým zrnům, jako například délku hlavní a vedlejší osy, tvarový faktor, obvod zrn atd. Toto omezení platí i v případě agregátů slíd v návaznosti na rozdílnou orientaci os symetrie. Zmíněné parametry jednotlivých zrn, jejichž měření lze provést příslušným počítačovým programem (Příkryl 2006), mohou být v případě greisenizovaných hornin vztaheny

pouze na zrna křemene, u kterých je možné jasně definovat hranice jednotlivých zrn. U zmíněných extrémně jemnozrnných ploch alteračních produktů lze kvantifikovat pouze jejich procentuální objemové zastoupení v jednotlivých vzorcích. Popis jednotlivých analyzovaných fází je uveden v metodice. V případě materiálu z opuštěného lomu a z vlastní architektury sloupu se zastoupení této složky podílí 30,8 obj. % ve skupině vzorků I a 21,9 obj. % ve skupině vzorků vzorku II. U horniny z kuželky balustrády je patrný značný úbytek zastoupení až na hodnotu 9,8 obj. %. Kvantifikované parametry zjištěné pomocí PIA jsou shrnuty v (Tab. 7.)

Tab. 7. Poměrné zastoupení hlavních horninotvorných součástek a zrnitost studovaných materiálů z opuštěného lomu (I), z vlastní architektury sloupu (II) a z balustrády (III).

vzorek	křemen (obj. %)	slídy (obj. %)	relikty živců (obj. %)	jemnozrnná hmota (obj. %)	póry (obj. %)	Fe- oxidy (obj. %)	průměrná velikost křemenných zrn (mm)
I	42,54	14,54	11,13	30,85	0,93	-	0,243
II	45,81	13,52	17,43	21,93	1,32	-	0,265
III	69,96	16,06	-	9,79	3,80	0,39	0,408

Na mikrofotografiích, nasnímaných s použitím CL s chladnou katodou, byla pozorována rozdílná distribuce akcesorických fází jednotlivých hornin. U horniny odebrané z opuštěného lomu (výbrus 146C) a u materiálu z vlastní architektury sloupu lze pozorovat rovnoměrnou plošnou distribuci apatitu v rámci celého výbrusu jako hlavního akcesorického minerálu projevující se charakteristickou intenzivní žlutou luminiscenční barvou (Mariano 1988). Dobře se projevuje i modrá luminiscence K-živce, který je ve vzorcích II skupiny (z vlastní architektury sloupu) hojnější a jeho plošná distribuce je srovnatelná s výbrusem 146C (z I skupiny). Ve výbrusech zhotovených z materiálu balustrády tyto luminiscenční jevy nepozorujeme vzhledem k faktu, že apatit je v hornině zastoupen velmi vzácně stejně jako drobné relikty živců. Luminiscenční projevy mají pouze drobná zrnka akcesorických fází složených z oxidů Nb a Ta. Výbrusy zhotovené z horniny z lomu s označením 146D se svými luminiscenčními projevy blíží spíše vzorkům odebraným z balustrády.

7.4 Fyzikální vlastnosti horniny odebrané v lomu

Zjištěné fyzikální vlastnosti horniny odebrané v opuštěném lomu na stavební kámen u Pramenů dobře ukazují na změny způsobené postmagmatickými alteračními vlivy, které se na granitoidním tělese uplatnily. Granity, které jsou běžně používány jako stavební materiál (Příkryl 2006), vykazují značně odlišné indexové fyzikální vlastnosti než greisenizované granity, které byly předmětem studia této práce. U horniny je patrný nárůst obzvláště v hodnotách pórovitosti (P_z v obj. %) pohybující se okolo 6 obj. %, zatímco hodnoty pórovitosti jemnozrnných granitů dosahují běžně hodnot okolo 0,1 – 3 % (Příkryl 2001). Vyšší pórovitost hornin ovlivňuje jejich fyzikálně mechanické vlastnosti a má i vliv na schopnost hornin odolávat zvětrávacím vlivům (Sousa a kol. 2005). Na druhou stranu má nárůst pórovitosti vlivem postmagmatických alteračních procesů pozitivní vliv na možnost horninu sochařsky opracovávat. Studovaný materiál odebraný z greisenizovaného žulového pně u Pramenů, který je klasifikován jako greisenizovaná žula, lze na základě zjištěných indexových fyzikálních vlastností (objemová hmotnost $\sim 2,5 \text{ g/cm}^3$, nasákavost za atmosférického tlaku 2,2 – 2,6 %, pórovitost 5,4 – 6,1 obj. %) přirovnat spíše než k žule, tak k horninám jako je například pískovec nebo trachyt. Nelze tedy předpokládat, že hodnoty pevnostních technických požadavků na stavební kámen budou odpovídat hlubinným magmatickým horninám. V indexových vlastnostech vzorku samotného s označením 146C a 146D lze pozorovat největší rozdíl (0,7 obj. %) v hodnotě pórovitosti. Další patrnější rozdíly lze najít u dynamických přetvárných vlastností jednotlivých vzorků (viz Tab. 5) výše, kde materiál

s označením 146D dosahuje výrazně nižších hodnot stanovovaných parametrů (dynamický modul, Poisonova konstanta a střížný modul). Vzhledem k jisté nehomogenitě materiálu pocházejícího z jednoho lomu je patrné, že vliv alteračních pochodů nezasáhl těženou oblast rovnoměrně a fyzikálně mechanické vlastnosti horniny se mohou lišit v rámci jednoho ložiska.

7.5 Zonálnost greisenových těles

Těleso pně, ve kterém byl historický lom založen, odpovídá svým tvarem i geologickou stavbou tělesům lithnofluoridových a dvojslídnych žul mladšího intruzivního komplexu krušnohorského plutonu. Greiseny jsou tvořeny převážně ve vrcholku elevace a vyklíňují podél šikmo ukloněných kontaktů pně. Proces greisenizace směrem do hloubky vyznívá a největší rudní akumulace jsou soustředěny do kontaktů pně s okolní horninou (Jarchovský a Pavlů 1988).

Pně se vyznačují typickou zonálností, která se projevuje rozdílnými petrografickými vlastnostmi zvláště v samotném složení horniny, v zastoupení jednotlivých horninotvorných složek a v zrnitosti. Tato zonálnost granitových pňů byla podrobně studována např. na ložiscích Sn-W rud v nedalekém krásenském rudním revíru (Jarchovský 2006). Geologické a petrografické studium ložiska v Krásně ukázalo na existenci sub-horizontální zonálnosti dané postupně se měnícím složením hornin směrem do hloubky. Prvotní zóna v nejsvrchnější části kopule byla tvořena drobnozrnným granitem, který podlehl v následující etapě greisenizaci, tato zóna postupně do hloubky vyznívá až k přechodným granitům obsahujících mimo převládajícího křemene i oba živce (Jarchovský 2006). Vývoj a následný charakter hornin ve vertikálním profilu je ovlivňován pohybem a charakterem fluidní fáze společně s mechanismy spojenými s chladnutím zbytkové taveniny uplatňujících se na greisenizaci a s ní spojených alteračních pochodech (Jarchovský 2006).

7.6 Sloup Nejsv. Trojice v Teplé

Barokní památka, sloup Nejsv. Trojice stojící na Masarykově náměstí v Teplé (vztyčen roku 1721), je jednou z nejcennějších památek města. Studium a ochrana historických kamenných monumentů má svůj důležitý význam obzvláště při předrestaurátorském výzkumu památek, a to nejen s ohledem na fakt, že je nutné zjistit mnohé informace o typu kamenného materiálu, jeho poškození a možnostech oprav (Příkryl 2007), ale také vzhledem k faktu, že kamenné památky často poukazují na těžební minulost oblasti, neboť v historii mnohdy docházelo při budování kamenných památek k využívání lokálních zdrojů. Cílem této práce bylo porovnání vzorků odebraných z barokní památky s materiálem z předpokládané zdrojové lokality kamenného materiálu použitého při její stavbě. Studium zdrojové lokality přírodního kamene uplatněného na kamenných monumentech sebou přináší značnou problematiku. Z monumentů není mnohdy možné odebrat větší množství vzorku. Vzhled původního kamenného materiálu může být ovlivněn zvětrávacími procesy, které se na materiálu po dobu jeho expozice podepsaly. Vzhled kamenného materiálu je dále ovlivněn způsobem jeho opracování a v neposlední řadě i vlivem restaurátorských zásahů, které byly na památce za dobu její existence provedeny. Všechny tyto faktory mohou vést k problematickým výkladům obzvláště v otázce klasifikace horninového materiálu *in situ* na památce. Při zjišťování zdrojové lokality je tedy důležité detailní petrografické zhodnocení odebraného materiálu.

Vzorky původního kamenného materiálu barokního sloupu byly odebrány prof. Petrem Sieglem, akad. soch a rest. v rámci předrestaurátorského materiálového průzkumu památky (více v kapitole o odběru vzorků). Petrografické vlastnosti vzorků byly porovnány s materiálem odebraným prof. Příkrylem z nedalekého historického lomu na stavební kámen, který se nachází jihozápadním směrem od obce Prameny. Hornina zde těžená, nazývána sangerberský kámen (Rybařík 2000), byla hojně využívaná

jako stavební kámen v okolních oblastech a svým složením odpovídá původnímu kamennému materiálu sloupu.

Na základě petrografického zhodnocení studovaných vzorků je patrné, že původní kamenný materiál použitý při stavbě sloupu před rokem 1721 byl vytěžen v tělese greisenizované žuly typu Kladská (Fiala 1968) zejména s ohledem na výskyt typického akcesorického minerálu apatitu. Tento typ horniny byl těžen ve výše zmíněném lomu na stavební kámen, založeném v greisenizovaném žulovém pni po ukončení těžby rudy. Podle archivních údajů hlubinná těžba rudy na tomto tělese probíhala koncem 15. a na začátku 16. st. (Jarchofský a Pavlů 1988). Přesné období dobývání této horniny jako stavebního kamene není známo, nicméně k poslednímu odstřelu bloků horniny na ložisku došlo podle ústního sdělení pana Brtníka (2014) v 70. letech minulého století.

Při studiu kamenného materiálu odebraného ze sloupu lze pozorovat rozdíly v materiálu odebraném z původního kamenného materiálu z výklenku za sochou sv. Norberta (tělo sloupu) a materiálu odebraném z kuželky balustrády, která tělo sloupu obepíná. Materiál z těla sloupu je znatelně jemnozrnější a značnou část horniny tvoří živce, které v materiálu balustrády nepozorujeme. Charakter horniny z těla sloupu odpovídá vzorkům 146C odebraným z opuštěného lomu. V obou případech se jedná o jemnozrný greisenizovaný granit s typickým akcesorickým minerálem apatitem. Materiál z balustrády je, jak již bylo řečeno, hrubozrnější a výskytem akcesorických fází se blíží vzorku z lomu s označením 146D.

Kamenný materiál použitý při stavbě sloupu byl obecně označován jako pískovec, protože greisenizované granity z opuštěného lomu u Pramenů svým vzhledem i možnostmi opracování pískovec připomínají, jak uvádí Rybařík (2000). Na základě zjištěných indexových fyzikálních vlastností se materiál odebraný v lomu i pískovci hojně využívaném v sochařství a stavebnictví blíží, a to zejména v hodnotách pórovitosti. V návaznosti na tuto skutečnost byl pískovec použit i jako náhradní kamenný materiál při opravě sloupu (Obr. 29.). Nevyužití greisenizované žuly z lomu u Pramenů při restaurování památky je do jisté míry nepochopitelné, nicméně vzhledem ke skutečnosti, že se ložisko nachází v chráněné krajinné oblasti, by bylo získání původního kamenného materiálu dosti legislativně, časově a pravděpodobně i finančně náročné.



Obr. 29. Balustráda sloupu Nejsv. Trojice v Teplé na Masarykově náměstí. Nově osazené kuželky balustrády z pískovce v kontrastu s dříve použitým kamenným materiálem.

8 ZÁVĚR

Při ověření zdrojové lokality původního kamenného materiálu sloupu Nejsv. Trojice v Teplé byly porovnávány dva typy vzorků odebraných z kamenné památky se vzorky odebranými z nedalekého opuštěného lomu. Pomocí kvalitativního a kvantitativního petrografického studia byly ve vzorcích stanoveny základní rozdíly v petrografických vlastnostech a mikrostrukturních parametrech jednotlivých studovaných materiálů. Na vzorcích z lomu byly dále provedeny zkoušky základních fyzikálních vlastností s ohledem na jejich využití ve stavebnictví a sochařství.

Pomocí petrografické obrazové analýzy byly ve všech třech sériích studovaných vzorků kvantifikovány hlavní horninotvorné složky. Na základě těchto výsledků lze horninu, odebranou v opuštěném lomu (I) jihozápadně od Pramenů, klasifikovat jako jemnozrnnou greisenizovanou žulu, stejně je klasifikován i materiál odebraný z vlastní architektury sloupu (II). V obou vzorcích lze pozorovat jako hlavní akcesorickou fázi apatit, jehož distribuce je dobře patrná při pozorování horninových výbrusů v katodové luminiscenci. Zvýšený obsah fosforu byl pozorován i v živcích, které jsou jím obohaceny. Vzhledem k předpokládanému vysokému obsahu fosforu jsou studované horniny řazeny k mladšímu intruzivnímu komplexu silně peralumických granitů krušnohorského komplexu. Materiál odebraný z balustrády, obepínající tělo sloupu (III) se odlišuje převážně v objemovém zastoupení křemen jako hlavní horninotvorné složky (až 70 obj. %). Hornina je prokazatelně hrubozrnnější a lze ji klasifikovat jako drobnozrnný křemenný až slídnato-křemenný greisen (průměrná velikost kvantifikovaných křemenných zrn 0,408 mm). V materiálu balustrády nebyla nalezena zrna živců nebo jejich relikty; rovněž apatit jako hlavní akcesorická fáze předešlých vzorků byl v materiálu balustrády pozorován pouze vzácně. Hornina je celkově chudá na akcesorie. Byly pozorovány pouze nečetné agregáty drobných akcesorických zrn oxidů Nb-Ta, Mn a W. Materiál odebraný z kuželky balustrády vykazuje také výrazně větší zastoupení velkých (místy až 0,5 mm) izolovaných pórů. Ve všech třech studovaných vzorcích lze pozorovat při SEM-CL charakteristické mikrostrukturní projevy magmatických křemenných zrn a to konkrétně růstovou zonálnost a vyhojení mikrotrhlin novotvořenou fází SiO₂. Na základě kvalitativního a kvantitativního studia jednotlivých vzorků lze opuštěný lom na stavební kámen založený v greisenizovaném žulovém pni u Pramenů označit jako zdrojovou lokalitu původního kamenného materiálu použitého při stavbě sloupu. Vzhledem k odlišnosti materiálu balustrády od materiálu z vlastní architektury lze připustit možnost, že v případě studované kuželky se nemusí jednat o původní kamenný materiál. Tento materiál mohl být do balustrády osazen při některém z restaurátorských zásahů prováděných v minulosti.

Zjištěné fyzikální vlastnosti materiálu odebraného v lomu ukazují značný vliv autometamorfních přeměn, které se na hornině uplatnily. U materiálu došlo vlivem těchto přeměn k výraznému zvýšení pórovitosti až na 5-6 obj. %. Granity běžně používané ke kamenickému zpracování dosahují přitom hodnot pórovitosti výrazně nižších. Zvýšená pórovitost horniny má dopad i na odlišné dynamické přetvárné vlastnosti horniny. S ohledem na tyto skutečnosti nelze u horniny z lomu předpokládat technické vlastnosti sledované při aplikaci přírodního kamene do stavebnictví a sochařství typické pro světlá intruziva. Je nutné předpokládat výrazně nižší hodnoty u parametrů jako je pevnost v tlaku a pevnost za ohybu.

Při pozorování materiálu z lomu byla u jednotlivých vzorků pozorována určitá nehomogenita, která se projevovala převážně v zastoupení apatitu jako hlavní akcesorické fáze, kde ve výbrusech s označením 146D byl pozorován méně často, dále jsou výbrusy 146D mírně hrubozrnnější. Tato skutečnost svědčí o nerovnoměrném postižení hornin pně sledem autometamorfních přeměn a zonálním vývoji typickým pro greisenizované žulové pně krušnohorské oblasti. Proto nelze vyloučit možnost, že i materiál použitý na balustrádu sloupu pochází také z lomu jihozápadně od Pramenů, nicméně byl pravděpodobně vydobyt z jiné polohy než materiál vlastní architektury sloupu.

9 LITERATURA

- Barbin V., Ramseyer K., Decrouez D., Burns S. J., Chamay J., Maier J. L., 1992. *Cathodoluminescence of White Marbles: Determination of Provenance by Isotopic Analysis*. Science, 176, str.
- Beran P., Sejkora J., 2006. The Krásno Sn-W ore district near Horní Slavkov: mining history, geological and mineralogical characteristics. *J. of the Czech Geological Society. Abstr.*, 51/1-2: 3-42.
- Boggs S., Krinsley D., 2006. *Application of Cathodoluminescence Imaging to the Study of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, New York, 176 str.
- Breiter K., Förster H.-J., Seltmann R. 1999. Variscan silicic magmatism and related tin-tungsten mineralization in the Erzgebirge-Slavkovský les metallogenic province. *Mineral. Depos.*, 34: 505-521.
- Breiter K. 2012. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Krušné hory/Erzgebirge Mts., Central Europe. *Lithos* 151. Str. 105-121
- Bromley A. V., Holl J. 1986. Tin mineralisation in south west England. In: Willis, B. A. & Barley, R.W. (eds) *Mineral processing at a crossroads*, NATO ASI Ser. No. 117. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 159-262.
- Buckley A., 2005. *The Story of Mining in Cornwall*. Cornwall editions Ltd. Fowey Cornwall. 240 str.
- Cirgllová K., 2000. Sloup Nejsvětější Trojice v Teplé. *Průzkumy památek I/2000:105-111*
- Fiala F., Holubec J., Jarchovský T., Kratochvíl F., Mrňa F., Odehnal L., Pácal Z., Pokorný L., Sattran V., Škvor V., Šmejkal V., Šorf F., Štemprok M., Vejnar Z., Zemánek V., Zikmund J., 1962. *Základní geologický výzkum Císařského (Slavkovského) lesa, 1955 - 1960*. MS Geofond Praha (P013973)
- Fiala F. 1968. Granitoids of the Slavkovský (Císařský) les Mountains. *Sbor. Geol. Věd. Geol.*, 14, 93-160.
- Fryda J., Breiter K., 1995. Alkali feldspars as a main phosphorus reservoir in rare-metal granites: three examples from the Bohemian Massif (Czech Republic). *Terra Nova* 7, 315–320
- Heřmanská M., 2013. *Minerální asociace, alterační reakce a transportní model pro vznik greisenů blatenského granitového masívu v Krušných horách*. MS diplomová práce, katedra petrologie a strukturní geologie PřF UK, Praha, 79 str., 5 příl.
- Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stránil Z., 2011. *Geologická minulost České republiky*. Academia, Praha, 436 str.
- Chvátal 1999. *Mineralogie pro první ročníky - krystalografie*. Nakladatelství Karolinum, Praha. 179 str.
- Jarchovský T., Pavlů D., 1988. Greisenizovaný žulový peň Steinbruchswald U Pramenů. V: *Sborník západočeského muzea (Plzeň), Ložiskové problémy Krušných hor a Slavkovského lesa. Sborník semináře*. Boží dar 13.-15.5., 1987, Příroda 67, str. 49-55.
- Jarchovský T. 2006. The Nature and Genesis of Greisen Stock at Krásno, Slavkovský les Area – western Bohemia, Czech Republic. *J. of the Czech Geological Society*. 51/3-4 (2006)
- Krutzký N., Hašlar O., Grunnerová P., Čtyroky V. 1983. Dekorační kameny In: Kužvart M. (ed.) *Ložiska nerudných surovin ČSR*. str. 290-315.

- Lehrberger G., Gillhuber S., 2004. Types of dimension stones in the Teplá monastery in Western Bohemia. In: Příkryl R. (ed.) *Dimension Stone 2004 New Perspectives for a Traditional Building Material*. 2004 Taylor & Francis Group, London, str. 73-78.
- Machel H. G., 2000. Application of Cathodoluminescence to Carbonate Diagenesis. In: Pagel M., Barbin V., Blanc P., Ohnenstetter D. (ed.). *Cathodoluminescence in Geosciences: An Introduction*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, str. 271-301.
- Mariano A. N., 1988. Some further geological applications of catodoluminescence. In: Marshall, D. J., *Catodoluminescence of Geological Materials*. Boston Unwin Hyman, str. 94-123.
- Nishiyama T., Kusuda H., 1994. Identification of porespaces and microcracks using fluorescentresins. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 31(4): 369-375.
- Pirajno F., 2009. *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, Berlin, 1250 str.
- Pirajno F., 2013. Effect of Metasomatism on Mineral Systems and Their Host Rocks. In: Harlov D. E., Austrheim H., *Metasomatism and Chemical Transformation of Rock*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, str. 203-253
- Prior D. J., Boyle A. P., Brenker F., Cheadle M. C., Day A., Lopez G., Peruzzo L., Potts G.J., Reddy S., Spiess R., Timms N. E., Trimby P., Wheeler J., Zetterstrom L., (1999): The application of electron back scatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problem with rock. *American Mineralogist*, 84, 1741-1759.
- Příkryl R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstr.*, 38(5): 671-682.
- Příkryl R., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*, 87(3-4): 149-162.
- Příkryl R., 2007. Understanding the Earth scientists role in the pre-restoration research of monuments: an overview. In: Příkryl R., Smith B. J. (ed.), *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society of London, Special Publications, 271, 99-107.
- Robb L., 2009. *Introduction to ore-forming processes*. Blackwell Publishing, Oxford, 373 str.
- Rybařík V., 1994. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích v Podkrkonoší, 218 str.
- Rybařík V., 2000. Kámen v architektuře západočeských lázní. *Kámen* 6(3): 55-68.
- Rybařík V., 1983. Stavební kámen. In: Kužvart M. (ed.) *Ložiska nerudních surovin ČSR*. str. 408-459.
- Sainsbury C. L., 1969. *Tin Resources of the World. Geological Survey Bulletin 1301*. United States Government Printing Office, Washington. 68 str.
- Smith B. J., McAlister J. J. 2000. Sampling and pre-treatment strategies for the chemical and mineralogical analysis of weathered rock. *Zeitschrift fur geomorphologie, Supplementbande*, 120, 159-173.
- Sousa L.M.O., Suárez del Río L.M., Callejab L., Ruiz de Argandona V.G., Rodríguez Rey A., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology* 77 (2005): 153-168.
- Syrový P., Ťahan P., Tomáš J., Volf M., Wagner J., 1984: *Kámen v architektuře*. SNTL - nakladatelství technické literatury, Praha, 349 str.

Štemprok M., Tenčík I. 1986. Hydrotermální ložiska cínu a wolframu. In: Bernard J. H., Pouba Z., a kol. (eds.) *Rudní ložiska a metalogeneze československé části Českého masivu*. Ústřední ústav geologický. Praha, str. 122-133.

Štemprok M., 1987. Greisenization: a review. *Geol. Rundsch.*, 76 (1): 169-175.

Štemprok, M., Pivec, E., Langrová, A. (2005): The petrogenesis of a wolframite-bearing greisen in the Vykmánov granite stock, Western Krušné hory pluton (Czech Republic). *Bulletin of Geosciences*, 80(3), 163-184.

Šťastná A., Příkryl R., 2010. Determination of Source Areas of Natural Stones: A Methodology Approach Applied to Impure Crystalline Limestones. In: M. Bostenaru Dan, Příkryl R., Török Á. (eds.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Springer Science + Business Media B.V. 2010. Str. 157-175.

Török Á., 2007. Hungarian dimensional stones: an overview. *Z. Dtsch. Ges. Geowissensch.* 158 (3), 361-374.

Török Á., Vásárhelyi B., 2010. The influence off a bric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*. 115 (3-4): 237-245.

Török Á., Příkryl R., 2010. Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments. *Engineering Geology* 115 (2010): 139-142.

Vásárhelyi B., Ván P., 2006. Influence of water content on the strength of rock. *Engineering Geology*. 84 (2006): 70-74.

Zharikov V., Pertsev N., Rusinov V., Callegari E., Fettes D. 2007. *Metamorphic Rock: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences*. Eds: Fettes D., Desmons J. Publ. By Cambridge University Press. Str. 58-68

Internetové zdroje:

<http://www.diamo.cz>, 27.4.2014