

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA GEOLOGIE**

**MINERALOGIE A CHEMISMUS STRUSEK PO
TAVBĚ STŘÍBRNÝCH RUD Z VYBRANÝCH
LOKALIT V JIHLAVSKÉM RUDNÍM REVÍRU**

diplomová práce

Jaroslav Kapusta

**Environmentální geologie (N1201)
prezenční studium**

**vedoucí práce: RNDr. Zdeněk Dolníček, Ph.D.
konzultant: RNDr. Karel Malý, Ph.D.**

Květen 2013

Čestně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechna použitá literatura je řádně citována.

V Olomouci dne 7.5.2013

.....
Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu RNDr. Zdeňkovi Dolníčkovi, Ph.D., za cenné rady, odborné vedení, zprostředkování jednotlivých analýz a v neposlední řadě trpělivost, kterou prokazoval po celé dva roky spolupráce. Dík patří i mému konzultantovi, panu RNDr. Karlovi Malému, Ph.D., za poskytnuté materiály a uvedení do problematiky. Dále panu Prof. Ing. Ondřejovi Šráčkovi, Ph.D., M.Sc. za zprostředkování a Prof. RNDr. Martinovi Mihaljevičovi, CSc. za realizaci analýz izotopového složení olova. Práce byla finančně podpořena projektem IGA UP PrF/2012/004 a PrF/2013/010. Nesmírně si cením i role své rodiny, která mi poskytla zázemí a plnou podporu k realizaci této práce.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení: Jaroslav Kapusta

Název práce: Mineralogie a chemismus strusek po tavbě stříbrných rud z vybraných lokalit v jihlavském rudním revíru

Typ práce: diplomová práce

Pracoviště: Katedra geologie Přf UP v Olomouci

Vedoucí práce: RNDr. Zdeněk Dolníček, Ph.D.

Rok obhajoby: 2013

Abstrakt: Studované strusky pochází ze západní části Jihlavy a ze zaniklého hutnického areálu Plandry nedaleko Jihlavy. Identifikovány byly strusky krystalické i sklovité. Sklovité strusky jsou složeny hlavně ze skla a neroztavených korodovaných zrn křemene, akcesorické jsou sulfidy a živce. Krystalické strusky jsou složeny z fayalitu, živce, skla, korodovaných zrn křemene a sulfidů, méně běžný je leucit a spinelid. Alespoň částečně oxidické podmínky v průběhu tavby odráží přítomnost Fe^{3+} ve struktuře spinelidu. Živec obsahuje až 31,29 hmot. % BaO. Mezi sulfidy dominuje pyrhotin, rudashevskyit a sfalerit. Identifikován byl i galenit, shandit, Cu-Pb-S fáze a ryzí stříbro. Hlavním nositelem stříbra mezi sulfidy je Cu-Fe-S nestechiometrická fáze (až 2,59 hmot. % Ag). Přítomnost vysokých obsahů Ba, které jsou v případě sklovitých strusek vždy vyšší než 5 hmot. %, je poměrně unikátní. WDX analýzy skla dosahují až 23,3 hmot. % BaO. S vysokými obsahy Ba je nejspíš spojena i přítomnost Ba analogu apatitu a Cu-Fe-Ba fáze. Viskozita a teploty tání byly stanoveny z celkového chemismu. Vypočtené hodnoty teplot tání jsou nadhodnocené (1600–1700 °C) v porovnání s experimentálními tavbami v elektrické peci, při nichž došlo při teplotě 1100 °C k úplnému roztavení všech vzorků kromě dvou. Izotopické složení olova strusek bylo zjevně ovlivněno přidáním olova z jiných lokalit. Nejlépe jako zdroj olova odpovídají lokality západních Čech (Oloví, Kraslice, Horní Slavkov). Teoreticky byla mísená ruda jihlavská s olovem z lokalit západních Čech v poměru přibližně 1:3. Relativně nízké obsahy olova ve struskách odráží poměrně dobře zvládnutou technologii hutnění. Strusky představují potencionální environmentální riziko pro zvýšené obsahy Zn (až 6,6 hmot. % ZnO ve skle).

Klíčová slova: polymetalické rudy, strusky, jihlavský rudní revír, baryum, těžké kovy, provenience

Počet stran: 88

Počet příloh: 0

Jazyk: český jazyk

Bibliographical identification:

Author's first name and surname: Jaroslav Kapusta

Title: Mineralogy and chemistry of slags produced by silver metallurgy from selected localities in the Jihlava Ore District

Type of thesis: master

Institution: Department of Geology, Faculty of Science Palacký University in Olomouc

Supervisor: RNDr. Zdeněk Dolníček, Ph.D.

The year of presentation: 2013

Abstract: The studied slags originated from western part of town of Jihlava and from the metallurgical site Plandry near Jihlava. Crystallized as well as glassy slags were identified. Glassy slags are predominantly composed of glass and unmelted corroded grains of quartz, accessories are sulfides and feldspars. Crystallized slags are composed of fayalite, feldspars, glass, corroded grains of quartz, and sulfides, less abundant are leucite and spinelide. The presence of Fe^{3+} in newly formed spinelide reflects at least partially oxic conditions during melting. Feldspar contains up to 31.29 wt. % of BaO. Sulfidic inclusions are predominantly composed of pyrrhotite, rudashevskyite, and sphalerite. Identified were also galena, shandite, Cu-Pb-S phase, and pure silver. Main silver carrier is Cu-Fe-S matrix (up to 2.59 wt. % Ag). The presence of high content of Ba, which is in case of glassy slags always higher than 5 wt. % BaO, is unique. The WDX analyses of glass showed up to 23.3 wt. % BaO. With high Ba contents is probably associated presence of Ba analog of apatite and Cu-Fe-Ba phase. Viscosities and melting temperatures were calculated from bulk chemistry. The calculated temperatures are strongly overestimated (1600–1700 °C) in comparison with experimental melting temperatures determined in an electric oven, where temperature of 1100 °C led to a complete melting of all samples except two. Isotopic composition of lead in studied slags is heavily affected by adding of lead from other localities. A possible sources of lead seem to be the ore deposits from the western part of Czech Republic (Oloví, Kraslice, Horní Slavkov). Calculations suggest that the ore from the Jihlava Ore District was mixed with lead from the western part of Czech Republic in ratio ca. 1:3. Relatively low contents of lead in slags reflect an effective technology of smelting. Slags represent a potential environmental hazard due to relatively high contents of Zn (up to 6.6 wt. % ZnO in the glass).

Key words: Jihlava Ore District, polymetallic ores, slags, heavy metals, barium, provenance

Number of pages: 88

Number of appendices: 0

Language: Czech

OBSAH

Úvod	6
1 Geologie	7
1.1 Metamorfity širšího okolí Jihlavy	7
1.2 Variské magmatity v okolí Jihlavy	8
1.3 Sedimentární pokryv	9
2 Historie těžby a zpracování Ag-rud na Jihlavsku	12
2.1 První etapa	12
2.2 Druhá etapa	14
2.3 Třetí etapa	15
3 Těžba a zpracování rudy	16
4 Jihlavský rudní revír	20
4.1 Jednotlivé typy polymetalických mineralizací	21
4.2 Ostatní typy zrudnění	24
5 Strusky po tavbě polymetalických rud	26
5.1 Makroskopický vzhled	27
5.2 Celkový chemismus	27
5.3 Fáze a jejich chemismus	29
6 Metodika	33
7 Terénní etapa	37
7.1 Plandry	37
7.2 Staré Hory	39
8 Fyzikální vlastnosti strusek	41
8.1 Makroskopický popis	41
8.2 Hustota	43
8.3 Magnetická susceptibilita	44
9 Mikroskopický popis a WDX analýzy	45
9.1 Plandry	45
9.2 Jihlava - splav, Červený potok	52
10 Celkový chemismus	59
10.1 Plandry	59
10.2 Červený potok	60
10.3 Jihlava - splav	60
11 Tavby	64
12 Izotopové složení olova	66
13 Diskuze	67
13.1 Fyzikální vlastnosti strusek	67
13.2 Fázové a chemické složení strusek	68
13.2.1 Plandry	68
13.2.2 Jihlava - splav, Červený potok	70
13.2.3 Společné interpretace pro studované lokality	71
13.3 Teplotní podmínky tavby a vlastnosti struskové taveniny	75
13.4 Izotopy olova a provenience	79
13.5 Těžké kovy	80
14 Závěr	83
LITERATURA	84

Úvod

Ve své práci se zabývám studiem mineralogie a chemismu strusek po tavně stříbrných rud z vybraných lokalit v jihlavském rudním revíru. Důvodem pro vybrání tohoto tématu diplomové práce byla pro mě možnost vyzkoušet si v geologii běžně využívané metody a postupy na pomezí aplikované geologie a archeologie a ověřit tak jejich možnou výpovědní hodnotu ve vztahu ke studovanému materiálu. Dané problematiky se v okolí Jihlavy již několik prací dotklo, nicméně šlo spíše o práce zaměřené předně na archeologii, kde bližšímu studiu strusek nebylo věnováno příliš prostoru (např. Šamalová 2007).

Podrobněji byly středověké strusky v České republice studovány na Příbramsku (Ettler et al. 2009a, Ettler et al. 2001). Tyto práce se věnují podrobné charakteristice strusek z pohledu mineralogie, chemismu a také testování těchto materiálů z hlediska dlouhodobé stability a potenciálního dopadu na životní prostředí.

Popsány byly i středověké strusky kutnohorské. Autoři se zde opět věnovali především studiu chemismu a mineralogického složení. Z dosažených informací se pak snažili interpretovat teplotní podmínky vzniku taveniny a její vlastnosti (Manasse – Mellini 2002a).

Ze zahraničních lokalit můžeme jmenovat středověké strusky z lokality Wiesloch v Německu. V rámci studia tohoto materiálu se kolektiv autorů pokusil i o rekonstrukci procesu tavy (Ströbele et al. 2010). Podobně jako na Kutnohorsku a stejnými autory (Manasse – Mellini 2002b) jsou zpracovávány i středověké strusky po tavně měděných rud z Massa Maritima v Itálii. Že nejde o téma výhradně evropské dokazuje práce Piataka et al. (2004) zaměřená na vybrané lokality v okolí Vermontu a práce Ettlera et al. (2009b), která se věnuje popisu středověkých i novodobějších (19. stol.) strusek z Namibie. Na novodobější materiál, konkrétně strusky po tavně zinku z první poloviny 20. stol. v Polsku, je orientována i práce Puziewiczze (2007). V neposlední řadě pak souhrnná práce Bachmanna (1982) zaměřená na strusky po tavně polymetalických, ale i železných rud.

Rešeršní část této práce je zaměřena zejména na mineralogii polymetalických rud jihlavského rudního revíru a obecnou charakteristiku strusek po tavně polymetalických rud. Doplněna je ještě o informaci o geologii studované oblasti a historii a obecným popisem technologie zpracování polymetalických rud. Terénní etapa je zaměřena na odběr vzorků a dokumentaci vybraných lokalit. Těžištěm práce je pak laboratorní část zaměřená na studium fázového a chemického složení prostřednictvím dostupných metod. Získané výsledky by měly přispět k odhalení technologie hutnění.

1 Geologie

Z pohledu regionálně geologického náleží širší okolí Jihlavy moldanubické oblasti krystalinika Českého masivu (Chlupáč – Štorch 1992). Charakteristická pro moldanubikum je přítomnost až katazonálně metamorfovaných souborů hornin (amfibolitová facie), které jsou prostorově provázeny granitoidy variského stáří. Vysoký stupeň metamorfózy a přítomnost specifických horninových typů, jakými jsou granulity, eklogity, granátické serpentinity a cordierické ruly, odlišuje tuto oblast od ostatních (Mísař et al. 1983). Moldanubickou oblast je možné rozdělit na základě regionálně geologického hlediska na: a) moldanubikum Českého lesa, b) moldanubikum Šumavy a jižních Čech, c) strážecké moldanubikum, d) moldanubikum západní Moravy, e) středočeský pluton, f) moldanubický pluton (Chlupáč – Štorch 1992).

Setkat se můžeme i rozdělením souboru metamorfovaných hornin na základě mapovací praxe na následující tři skupiny: jednotvárná (ostrongská), pestrá (drosendorfská) a gföhlská. Pro jednotvárnou skupinu je charakteristická přítomnost biotitických, biotiticko-silimanitických a dvojslídnych pararul s přítomností cordieritu, které často lemují variské granity. Pestrá skupina obsahuje vedle hojných pararul i drobná tělesa ortorul a vložky amfibolitů a dalších metamorfovaných hornin (metakvarcity, kvarcité ruly, krystalické vápence a dolomity, erlany a grafitické ruly). Gföhlská skupina je po stránce horninových typů méně bohatá. Je budována zejména granulity a leukokratními migmatity. Problematická je otázka stáří metamorfózy. Důvodem jsou intenzivní projevy variské orogeneze, které účinky možných starších metamorfních procesů překryly. To vnáší nejistotu i do určení stáří protolitu, které se uvádí od spodního proterozoika do paleozoika (Chlupáč et al. 2002). Z tektonického hlediska je dominantou této oblasti přibyslavská mylonitová zóna, mající směr SSV-JJZ. Tato struktura v důsledku namáhání při výzdvihu Českého masivu získala dnešní podobu příkopové propadliny označované jako jihlavská brázda a dosahující šířky až 7 km. Představuje také tektonickou predispozici pro vznik polymetalické mineralizace. Hluboké založení dílčích zlomů přibyslavské mylonitové zóny umožnilo díky snížení tlaku únik těkavých látek a vznik ojedinělých téměř až monominerálních žilek turmalínu (Veselá 1976). Z regionálně geologického pohledu tak širší okolí Jihlavy budují horniny strážeckého moldanubika, moldanubika západní Moravy a východní části moldanubického plutonu, ke kterému je řazen také jihlavský masiv (Chlupáč – Štorch 1992).

1.1 Metamorfity širšího okolí Jihlavy

Pro oblast východně od Jihlavy je typická přítomnost hornin pestré skupiny. Západní okolí je budováno zejména jednotvárnou skupinou. Nejrozšířenějším horninovým typem jsou cordierit-

silimanit-biotitické pararuly s různě intenzivními projevy migmatitizace. Jde o horniny tvořené křemenem, plagioklasem, K-živcem, muskovitem, biotitem, silimanitem a nerovnoměrně rozptýleným cordieritem. Akcesorický je zirkon, apatit, granát, kyanit, spinelidy, magnetit, pyrit a ilmenit. Na sever od Jihlavy u Pávova a Smrčné se objevuje velmi specifický migmatit, který je pro své texturně strukturní znaky nerozeznatelný od cordieritických granitů (Veselá 1976).

V pestré skupině moldanubika se objevují vložky amfibolitů o mocnosti nepřesahující desítku metrů. Ty jsou často provázeny erlany a běžně přecházejí v amfibolem proměnlivě bohaté ruly. Vznik těchto hornin je spojen s regionální metamorfózou tholeitových bazaltů nebo bazaltů oceánských hřbetů, jak ukazují zvýšené obsahy TiO_2 a MgO. Amfibolity jsou dominantně tvořeny amfibolem a plagioklasem, v menším množství je přítomný pyroxen a granát, případně K-živec a křemen. Akcesorie jsou zastoupeny apatitem, titanitem, zirkonem, opakními minerály a sekundární minerály představuje chlorit, vznikající přeměnou amfibolů a pyroxenů (René 2004). Setkat se můžeme i s tělesy skarnů uspořádanými do pruhu. Vzácnější jsou již kvarcity, případně jejich přechody do rul. Vyskytují se i drobná tělesa serpentinizovaných peridotitů, konkrétně východně od obce Bílý Kámen (Veselá 1976).

1.2 Variské magmatity v okolí Jihlavy

Třebíčský a jihlavský masiv jsou produktem durbachitického magmatismu, který měl trvání přibližně 10 milionů let. Jak naznačují obsahy LILE a některých dalších prvků (Mg, Ni, Cr), zdroj těchto hornin je možné hledat v tavení starého pláště nebo kůry, spojené se subdukční zónou (Kotková et al. 2003). Typově je možné tyto K-Mg-bohaté horniny označit jako durbachity neboli melanokratní granity či syenity. Často jsou hrubozrnné, stejnoměrně zrnité nebo porfyrické s vyrostlicemi K-živce. Obsahují velké množství biotitu, někdy je dokonce jedinou významnou složkou. Z dalších minerálů přítomných ve větším než akcesorickém množství je to plagioklas, křemen a amfibol. Méně běžné jsou relikty pyroxenů zatlačované amfibolem (Kotková et al. 2003).

Jihlavský masiv představuje nevelké těleso; na povrchu zaujímá plochu okolo 46 km². Má protažený, lehce esovitě zakřivený tvar a orientován je přibližně S-J směrem. Je budován několika horninovými typy, s plošně největším zastoupením melanosyenitů. Uzavírá také drobná tělesa migmatitů, a to zejména při svém severním okraji. Je postižen zlomy směru Z-V a SSZ-JJV. Je obklopen převážně cordieritickými rulami jednotvárné skupiny moldanubika. Zajímavá je zonálnost masivu, projevující se klesajícím indexem tmavosti od jihu k severu. Na východním kontaktu se objevují tělesa pegmatitů (Verner et al. 2006). Mineralogické složení melanosyenitu dobře odpovídá výše uvedenému. V akcesorickém množství je přítomen rutil a zirkony, které umožnily dataci tohoto masivu metodou U-Pb. Stáří odpovídá 335,2 ± 0,54 Ma a zdroj taveniny lze hledat v

přetavené mafické spodní kůře (Kotková et al. 2003). Zajímavá je i přítomnost hornin složením odpovídajícím gabrům, které tvoří 2 km dlouhá tělesa úzce vázaná k jihlavskému masivu. Podobné jako u melanosyenitů jihlavského masivu jsou i obsahy LILE prvků, stejně jako fakt, že jde o horniny ultradraselné. Z hlediska mineralogického složení jsou gabra tvořena zonálním plagioklasem, klinopyroxeny, reliktami ortopyroxenů, K-živci a v akcesorickém množství rutilem, apatitem a ilmenitem. V některých případech se můžeme setkat (jako u melanosyenitů) se zatlačováním pyroxenu amfibolem. Al nutný k uralitizaci pyroxenů se uvolňoval zřejmě albitizací primárně anortitovou komponentou bohatých plagioklasů (Leichmann 2003).

Moldanubický pluton představuje těleso s povrchovou rozlohou okolo 10000 km² a odhadovaném objemu 80000 km³. Jeho objem narůstá především od V na JZ. Na našem území se nachází jeho severní část označovaná souhrnně jako granity typu Eisgarn. Směrem na jih přechází při hranici s Rakouskem do granitu typu Weinsberg (Klomínský et al. 2010).

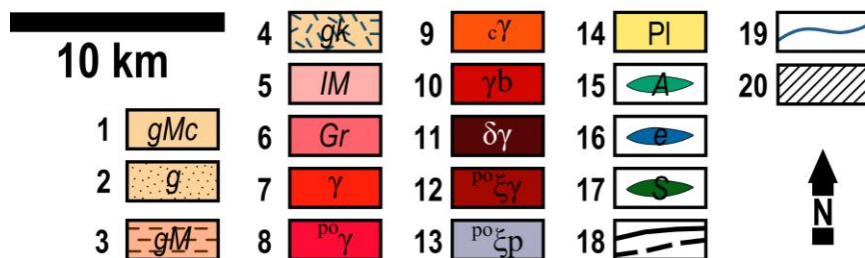
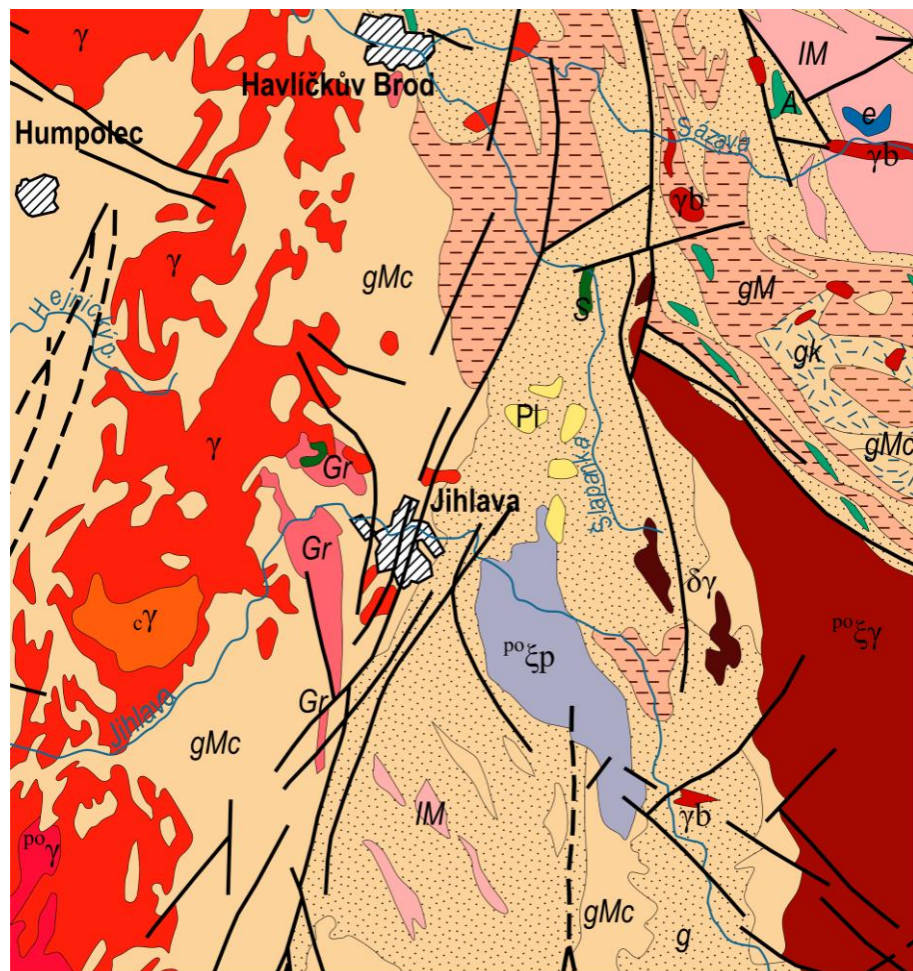
Granitům typu Eisgarn velice dobře odpovídají drobné masivy, které se objevují na SZ od Jihlavy. Stavba těchto hornin (velikost zrn, všesměrná textura) odráží období relativního tektonického klidu během tuhnutí. Jsou doprovázeny menšími tělesy greisenů, křemennými žilami a Sn-W mineralizací. Hojně granity obsahují i xenolity hornin, do kterých pronikaly (Veselá 1976). Zachyceny jsou až desetimetrové, či jen několik centimetrů velké xenolity migmatitů, odrážející dvě fáze metamorfózy (regionální a kontaktní). Mineralogické složení kontaktního lemu odráží tlakové podmínky odpovídající 2,5 kbar a teplotu 500 °C. Granity typu Eisgarn jsou stejnoměrně zrnité i porfyrické, jemnozrné až hrubě zrnité, dvojslídne. Dominantně jsou tvořeny křemenem, K-živcem, plagioklasem, muskovitem a biotitem. Akcesorický je apatit, zirkon, monazit a andalusit. Přítomnost magmatického andalusitu odráží hloubku vzniku menší než 9 km. Vznik granitů typu Eisgarn je spojován s rychlým výzdvihem metapelitických hornin z hloubek okolo 21 km do hloubek okolo 9 km v průběhu 2 milionů let (329–327 Ma). Takto rychlý výzdvih společně s malými tepelnými ztrátami (ze 710 °C na 500 °C) vedl ke vzniku velkých objemů S-typového magmatu v důsledku poklesu tlaku. Svou roli zde zřejmě sehrála příbyslavská mylonitová zóna (Žák et al. 2011).

1.3 Sedimentární pokryv

Pliocenní sedimenty se vyskytují v podobě izolovaných ker o celkové mocnosti až 25 m. Jsou tvořeny především monomiktním křemenným štěrkem až štěrkopískem rezavě hnědé barvy. Jde zřejmě o zbytky lakustrinních sedimentů. Velice rozdílné jsou nadmořské výšky uložení sedimentů na jednotlivých lokalitách (s převýšením až 70 m), což odráží tektonickou aktivitu po skončení sedimentace (Veselá 1976).

Z kvartérních sedimentů jsou přítomny sprašové hlíny, deluvia představovaná hlinitopísčítými až hlinitokamenitými sedimenty a deluviofluviální písčitohlinité, místy kamenité sedimenty (Veselá 1991).

Někteří autoři předpokládají i přítomnost permského pokryvu tzv. jihlavské brázdy, který je blízký permské sedimentární výplni boskovické či blanické brázdy (stejná orientace - směr SSV-JJZ). Faktem, který svědčí pro jeho existenci, je přítomnost permu ve vrtech v podloží křídové pánve v okolí Hradce Králové a relikty permu na spojnici mezi Hradcem Králové a Jihlavou, nacházející se u Kraskova v Železných horách (Chlupáč et al. 2002).



Obr. 1 Geologie širšího okolí Jihlavy (převzato a upraveno podle Chába et al. 2007). Legenda: 1 – cordieritické ruly a migmatity; 2 – biotitické a sillimanit-biotitické ruly; 3 – migmatizované ruly; 4 – dvojslídne ruly a ruly s kyanitem, dílem migmatizované; 5 – leukokrát ní migmatity a ruly; 6 – leukokrát ní granulity (slabě až silně retrográdně metamorfované); 7 – dvojslídne granulity; 8 – porfyrické dvojslídne granulity; 9 – hrubě zrnité dvojslídne granulity; 10 – biotitické granulity; 11 – bioti-amfibolické a amfibol-biotitické granulity; 12 – porfyrické amfibol-biotitické syenogranulity (durbachity), melanokrát ní; 13 – porfyrické pyroxen-biotitické syenity (durbachity), melanokrát ní; 14 – pliocenní písky, štěrky a jíly; 15 – amfibolity; 16 – erlany; 17 – serpentinity; 18 – zlom známý (nahore) a předpokládáný (dole); 19 – vodní tok; 20 – zástavba.

2 Historie těžby a zpracování Ag-rud na Jihlavsku

Těžba polymetalických rud je s Jihlavskem úzce spjata a byla samotným podnětem vzniku kolonizačního města Jihlavy, ležícího na levém břehu stejnojmenné řeky. Velký zájem o těžbu a zpracování stříbra pramenil z potřeby překonat starý směnný systém a zavést měnu. Proto bylo téměř veškeré stříbro použito na výrobu mincí (Jaroš 1999). Jak dokládají archeologické nálezy, do jisté míry bylo okolí Jihlavy osídleno již v neolitu. V 2. polovině 12. století prochází širším okolím dnes známé Jihlavy jen několik stezek (zejména haberská, humpolecká a lovětinská). Součástí těchto stezek byly i zájezdní hospody (Zatloukal – Zimola 1999).

Ruda zde byla intenzivněji dobývána ve třech etapách téměř po sedm století. Jako důkaz intenzivní těžby je dnes zachovaných přibližně 120 v minulosti dobývaných, či alespoň ověřovaných mineralizovaných struktur (Pluskal – Vosáhlo 1998). K největším nálezům zrudnění na Jihlavsku došlo v průběhu roku 1238. To také předznamenalo věhlas zdejší oblasti, stejně jako dalších nalezišť Českomoravské vysočiny na několik dalších desetiletí v rámci celé Evropy. Význam měla i strategická pozice Jihlavy na česko-moravské hranici. Z hlediska těžby ustupuje význam Jihlavska do pozadí již koncem 13. stol. spolupůsobením několika příčin. První z nich bylo vyčerpání perspektivních cementačních zón. Dalším důvodem bylo narůstání ekonomické náročnosti těžby v důsledku čerpání podzemních vod, navíc jsou tou dobou nalézána bohatá ložiska na Kutnohorsku. Nicméně své postavení si Jihlava ponechává ještě další dvě století především díky provozování báňskosoudní praxe pramenící z horního práva, jehož vznik je přisuzován roku 1249 (Jaroš 1995). Této výsady je město zbaveno roku 1467, kdy odmítá uznat jako českého krále Jiřího Poděbradského (Jaroš 1999).

2.1 První etapa

Vzhledem k tomu, že šlo o poměrně nehostinnou krajinu, je možné hovořit o mnohých úsecích tohoto regionu před kolonizací jako panenských (Hrubý 2004). Kolonisté přicházeli především z Tyrolska a Saska. Zemědělství bylo v této oblasti téměř vyloučeno (nadmořská výška 450–700 m.n.m. a průměrná roční teplota 6,5 °C). Nevyhovující byl i půdní typ (zejména podzoly), navíc celá oblast byla zalesněna. To bylo na druhou stranu vhodné z hlediska potřeby paliva a stavebního materiálu pro těžbu a zpracování rud. Ve 14. stol. byla tato oblast přibližně ze dvou třetin odlesněna (Zatloukal – Zimola 1999).

Počátek těžby je vázán dominantně na starohorskou dislokační zónu (též Starohorský couk), která z dnešního pohledu prochází západní částí Jihlavy a je možné ji od severu k jihu rozdělit do 7 úseků: starohorský, špitálský, hornokosovský, koželužský, pístovský, rančířovsko-čížovský a

vílanecký. Jedním z prvních těžených úseků se tak stal starohorský úsek (dnešní katastr Staré Hory), ale lze najít i zmínky, že u začátku těžby stál i důlní podnik „Cech“ neboli doly v Cechgrundu, čili hornokosovském úseku. Paradoxně však první historické zmínky o činnosti na starohorské dislokační zóně pocházejí až z druhého desetiletí 14. stol., a tak období nejintenzivnější těžební aktivity není v písemných zmínkách zachyceno (Vosáhlo 2004). Z hlediska datace je možné klást počátek dolování do konce 30. let 13. stol., avšak nelze vyloučit i ranější období těžby zaměřené výhradně na cementační zónu (Jaroš 1995). Původní osada Jihlava byla darována roku 1234 moravským markrabětem Přemyslem (od roku 1253 králem Přemyslem Otakarem II.) cisterciáckému řádu. V roce 1238 Václav I. majetek cisterciáckému řádu potvrdil. Problém s datací počátků těžby je v absenci písemných zmínek, nicméně fakt, že roku 1240 vyvíjí Václav I. snahu získat Jihlavu zpět napovídá o velkých nálezech zrudnění (Zatloukal – Zimola 1999). Není úplně jasné, zda za nálezem zrudnění stojí náhoda, nebo se jednalo o důsledek systematické kolonizace území, nicméně po objevu zrudnění byla na nadějnějších místech, která nebyla těžbou dosud postižena, zakládána nová průzkumná díla (Vosáhlo 1995).

Nejzásadnější z pohledu vyhledávání ložisek byl fakt, že ložisko vystupuje až na povrch, nebo je zakryto. Z hlediska metodiky vyhledávání ložisek neexistují z tohoto období žádné písemné zmínky, nicméně dá se předpokládat, že se jednalo o metody více či méně systematické a univerzální a zájemce o prospektorskou činnost tak musel projít dlouholetou praxí. Schopnosti prospektorů byly umocněny možností volné migrace v rámci středoevropského regionu a zkušenostmi na ložiscích různých typů. O kvalitách tehdejších prospektorů svědčí mimo jiné i fakt, že v průběhu jednoho století dokázali nalézt téměř všechna známá ložiska. Pochopitelně se vedle profesionálů objevovala i řada dobrodruhů vedených vidinou rychlého zisku. Stanovena byla i minimální kovnatost rudy, která se rovnala 60 gramů stříbra nad náklady nutné na její zhutnění (Vosáhlo 1995). Jednou z metod vyhledávání bylo zřejmě i sledování typických doprovodných projevů zrudnění, kterými jsou zejména odlišné zbarvení od okolních hornin spojené s grafitizací a limonitizací, přítomnost jarositu a oxy-hydroxidů manganu (Malý 2004).

Samotné město vzniká postupnou úpravou hornických osad a prvotní obydlí se tak mění v domy. Jak ukazují nálezy slítků mědi, zlomků tyglíků a strusky, byla metalurgická činnost provozována v tomto období i uvnitř hradeb (Hrubý 2004). Teprve od roku 1270 se dá mluvit o systematické výstavbě, kdy jsou starší domy bourány a situování nových je podřízeno nově vznikajícím ulicím (Zatloukal – Zimola 1999). Zajímavý je vznik hutnického areálu Plandry poblíž dnešní obce stejného jména (3 km ZSZ od Starých Hor), jehož působnost je připisována přelomu 13. a 14. stol. Poblíž tohoto areálu se totiž nenachází žádné zmáhané důlní dílo, proto musel být veškerý materiál importován z jiné lokality (Šamalová 2007). Na přelomu 13. a v průběhu 14. stol.

se postupně začínají objevovat na strategických místech poblíž těžebních a úpravárenských areálů opevněné polohy nejednotné velikosti a morfologie, kterým je možné přisoudit funkci spojenou s hornictvím. Není naprosto jasné, jaký byl jejich přesný účel, zda šlo o místo pro deponování rudniny či získaného kovu, testování a zpracování rudy, nebo byla jeho funkce čistě obranná (Rous et al. 2004). Jedním z těchto opevnění je například tvrziště typu „motte“, kruhového půdorysu o průměru 26 m, situované v těsné blízkosti úpravárenského areálu Plandry. Patrně bylo původně tvrziště obeháno valem a strategická pozice byla posílena vyhloubením příkopu. V samotném středu pak byla dřevěná věž (Šamalová 2007). Dalšími jsou tvrziště nacházející se u Kostelce u Jihlavy. První je zvané Vestenhof a jeho působnost je kladena mezi roky 1364–1464. Druhé je anonymní tvrziště s nálezem zbytků pece, ovšem bez většího množství strusek. Z dalších pak ještě zaniklá lokalita Jihlava v dolech poblíž Kosova a známější Jihlava - Zámeček. V případě, že není přesně zaznamenán rok zániku, dá se jen stěží předpokládat existence tvrziště přes pozdní středověk či pokračující do raného novověku (Rous et al. 2004).

Příchod husitských válek se vedle dalších odvětví lidské činnosti silně projevuje i zde, a proto ve dvacátých letech 15. stol. dochází k naprostému úpadku těžby (Pluskal – Vosáhlo 1998).

2.2 Druhá etapa

Počátek druhé etapy je možné zasadit do roku 1436. Milníkem dělícím tyto dvě etapy je přesunutí intenzivnější těžby i mimo starohorskou dislokační zónu (Vosáhlo 2004) a konec husitských válek. První písemné zmínky o metodice vyhledávání ložisek a určení jejich vhodnosti k těžbě pochází z 16. stol.; toto století znamená také výrazný skok v technologii zpracování rud a rozvoje prubířských postupů spojených s propracováním nové vědy - alchymie. V otázce určení vhodnosti lokality z hlediska těžby se můžeme setkat s uvedením hlavních charakteristik, zahrnujících především vhodnost reliéfu, jeho polohu z pohledu dostatku dřevní hmoty, přítomnost vodního zdroje pro pohon technologických zařízení, přístupové cesty, pozemkových práv, a zohledněny jsou dokonce vztahy s okolními prospektory. Prospekce byla v této době zaměřena především na prozkoumávání vývrátů stromů či erodovaných svahů údolí. Někteří prospektoři dokázali usoudit na přítomnost vyhledávané složky ochutnáváním vody pramenů. Využívána byla již i šlichová prospekce spojená s důrazem na morfologii a velikost zrn pro posouzení délky transportu. Další odvětví by se dalo označit jako geobotanická prospekce, kdy předmětem zájmu byly degenerativní projevy v růstu rostlin v důsledku přítomnosti toxických prvků (Vosáhlo 1995). Z pohledu těžby bylo snahou prozkoumat stará díla a zde pokračovat, nebo nalézt dosud nedotčené pokračování mineralizovaných struktur. Nová díla byla otvírána jen nárazově, a to především díky značné podpoře Albrechta II. Habsburského a Ladislava Pohrobka (Pluskal – Vosáhlo 1998). Nové

doly byly zmáhány především v Rančířově, Pančavě, Heleníně, Malém Beranově a Hruškových Dvorech (Zajíček 1983). Konec této epochy byl předznamenán zahlcením trhu stříbrem importovaným z jihoamerických nalezišť. Počátek 17. stol. znamenal dočasné obnovení těžby, které opět ustalo s příchodem třicetileté války (Pluskal – Vosáhlo 1998).

2.3 Třetí etapa

Třetí etapa hornictví je zasazena do 60. let 17. stol. až 80. let 18. stol. V tomto období probíhá těžba na Starých Horách jen velmi omezeně. V 18. století přebírá iniciativu rakouský stát. Hlavním záměrem je systematická rekognoskace starých důlních děl a jejich podrobná dokumentace, jen ojediněle probíhá i technický průzkum spojený s hloubením průzkumných štol. Zajímavé jsou uváděné kovnatosti některých z haldového materiálu odebraných vzorků v roce 1774, které dosahují až 15755 g Ag/t. Konkrétně takto vysoká kovnatost je přisouzena okolí rozhraní hornokosovského a koželužského úseku Starohorského pásma (Vosáhlo 2004). S posledním pokusem o dolování stříbra se pak setkáváme roku 1783 (Svěrák 1995).

Novodobější pokusy obnovy hornictví byly zaměřeny předně na surovinu nerudní, a sice grafit. Zastiženo bylo několik grafitových poloh o celkové mocnosti přibližně 90 cm. Jen omezeně pokračoval i průzkum na těžbu olova a stříbra, s kterým se můžeme setkat například v koželužském úseku (Vosáhlo 2004). Jedním ze slavných jmen spojeným s touto epochou byl i lékárník Josef Čech, který vedle zájmů na Boskovicku a Znojemsku začal působit v roce 1882 také v této oblasti. Předmětem jeho těžby byl především baryt, živce a grafit. Jeho pozornost se obracela i k těžbě galenitu, ale zde nedosahoval uspokojivých výsledků. Umírá roku 1917, po jeho smrti se ještě krátce prospektorské činnosti věnují jeho dvě děti (Svěrák 1995).

3 Těžba a zpracování rudy

Po vytyčení místa, kde by se zrudněná poloha mohla nacházet, následovaly před samotným započítím těžby ještě průzkumné práce. Jednalo se zejména o kopání mělkých sond a kutacích příkopů, ty byly hloubeny na takovou vzdálenost, dokud nebylo ložisko spolehlivě lokalizováno (Vosáhlo 1995). Tvarově odpovídaly mělké sondy kruhovým jámám s kolmými stěnami a hloubkou obvykle nepřesahující 10 m. Jejich hlavní účel byl průzkum hloubky a směru žil, stejně jako určení jejich vydatnosti, proto neobsahovaly další prvky jako boční štoly a rozrážky (Hrubý 2004). Mělké sondy byly zakládány jen v několikametrových vzdálenostech od sebe a snahou prospektorů bylo po nalezení zrudnění (pro zajištění prvenství) oznámit nález hornímu soudci či propůjčovateli dolu. Výsledkem bylo získání důlní míry, která zaručovala, že jiný prospektor nemůže 49 m na obě strany (v průběhu žíly) od nálezů zakládat kutací díla. Pravděpodobnost nálezů perspektivního zrudnění přitom byla 1:10, případně nižší. Běžně se tato průzkumná díla následně stávala samotnými těžními šachtami (Vosáhlo 1995).

Zpočátku byly těženy jen povrchové partie ložiska, ale s postupem času byla vyvíjena iniciativa k přechodu na dobývání rud z větších hloubek. V první etapě byly štoly raženy co nejúspornějším způsobem pouze v průchozích rozměrech. Odhaduje se, že za jednu směnu se v profilu 2x1 m postoupilo o 2,5 cm (Majer 1999). Jak dokazují nálezy železek společně s kahany, šlo o čistě manuální rozdruzžování materiálu (Zatloukal – Zimola 1999). Jedinou metodou usnadňující dobývání rudy v houževnatých horninách bylo tzv. sázení ohně, kdy se do vyrubané prostory nanosilo dřevo, které se zapálilo. Teplotní gradient vedl k rozpukání horniny. Tato metoda však umožnila „změkčení“ horniny jen do hloubky několika cm. Natěžená ruda byla v dřevěných nádobách vynášena až na povrch, později byly používány i jednoduché rumpály. Od 14. stol. se do tohoto odvětví dostává i vodní energie, ale teprve až v 16. stol. prochází těžební a úpravárenská technika revolucí, která umožňuje urychlit a zefektivnit těžbu. Od 2. poloviny 17. stol. se zavádí využívání černého střelného prachu (Majer 1999).

Velice schematicky se dá rozdělit proces zpracovávání rudy do následujících čtyř kroků (Vaněk – Velebil 2007):

- a) třídění a úprava rudy na vstupní rudní koncentrát
- b) oxidace sulfidů pražením
- c) redukce na kovové stříbro
- d) rafinace stříbra

Pro co nejekonomičtější průběh následných operací se často v archeologickém záznamu setkáváme s uspořádáním jednotlivých technických budov, které kopíruje průběh rudních struktur.

Natěžená ruda byla následně vytříděna. O pečlivosti tohoto procesu svědčí mimo jiné například nálezová situace na Starých Horách, kde na jednotlivých haldách stejně jako v jednorázovém zásypu tvořeném barytem nebyl nalezen téměř žádný galenit. Ruda byla následně mleta, k čemuž sloužil rudní mlýn, jehož základní částí byl kulatý běhoun. Hybnou silou tohoto zařízení byl vodní náhon, jak dokládá často velmi úzký vztah těchto budov k vodnímu toku (Hrubý 2004). Dalším krokem bylo proprání rudy, jak konkrétně na Starých Horách dokládají zachovalá koryta, vyplněná sedimentem s extrémními obsahy barevných kovů (Zn, Pb, Cu, Ag a Sb) (Malý 2004). Čím nižší byly v rudním koncentrátu obsahy nečistot, tím menší množství strusek vznikalo v průběhu redukční tavby (Bachmann 1982).

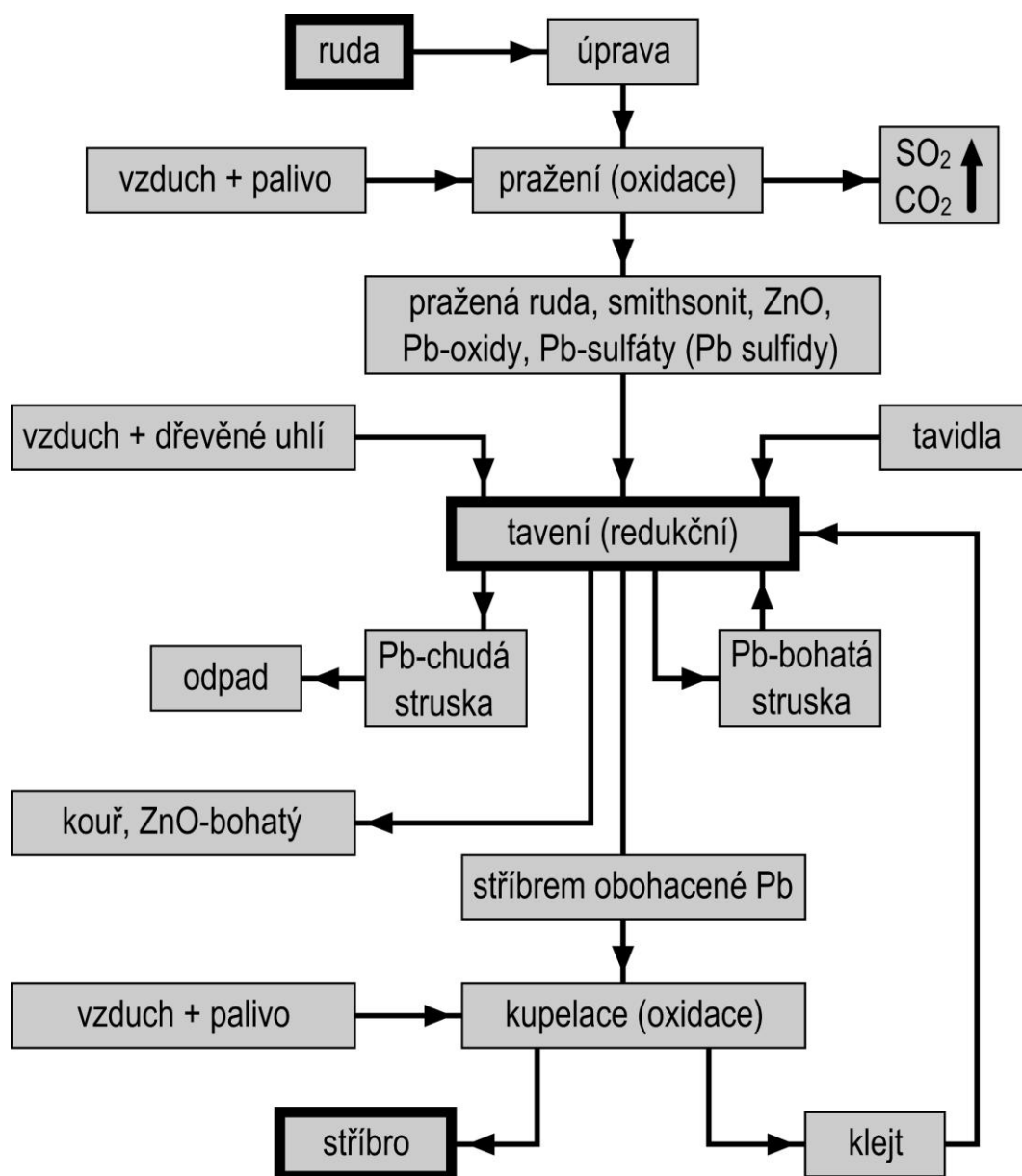
V případě velmi chudých rud byl zařazován ještě mezikrok, který vedl ke vzniku tzv. kamínku, což byla komplexnější směs sulfidů. Nejčastěji se jednalo o kamínek měděný. Při hutnění kamínku se do vsázky vedle paliva přidával křemen a u rud chudých pyritem i pyrit. Výsledkem byl vznik taveniny bohaté na CuO a Fe-silikátové strusky (Vaněk – Velebil 2007).

Z rudního koncentrátu nebo kamínku, kde byla užitková složka ve formě sulfidů, nebyli schopni tehdejší hutníci měď, olovo či stříbro přímo získávat, proto bylo dalším krokem převedení sulfidů do oxidické formy, protože oxidace na elementární kovy by vyžadovala laboratorní podmínky a ne přírodní materiály plné interferencí (Bachmann 1982). Za tímto účelem byla nadrcená ruda pražena na otevřeném prostranství za přístupu vzduchu, a to buď na důmyslných rošttech nebo jednoduše na hromadě. Při tomto procesu docházelo k postupné oxidaci jednotlivých sulfidických minerálů a síra tak společně s většinou As a Sb odcházela oxidovaná ve formě kouře. Nakolik bylo třeba tento krok opakovat, určovali tehdejší hutníci sensoricky – dokud byl cítit sirný zápach, v pražení pokračovali (Vaněk – Velebil 2007).

Samotná redukční tavba probíhala v šachtové peci s otevřenou nebo uzavřenou výpustí. Vsázkou byla pražená ruda, dřevěné uhlí jako palivo, klejt (PbO), křemen jako struskotvorná přísada a tavidla na bázi CaO (Vaněk – Velebil 2007). Zásadní byla otázka dostupnosti jednotlivých druhů tavidel, jen stěží mohly být tyto suroviny importovány ze vzdálených oblastí. Teploty, kterých bylo dosahováno v tehdejších pecích, nepřesahovaly 1300 °C, ojedinele 1400 °C (Bachmann 1982). Jak uvádí Malý (2004) na základě nálezové situace na Starých Horách, mohla být součástí vsázky i struska z předchozích taveb. Během tavby odcházely ve formě kouře zbytky As, Sb a malé množství Pb (Vaněk – Velebil 2007). V kouři odcházela i většina Zn, protože jeho teplota varu je okolo 900 °C, část Zn se ihned vysrážela na vyzdívce a omezené množství se rozpustilo v silikátové tavenině (Ströbele et al. 2010). Na základě hustoty došlo uvnitř pece ke stratifikaci taveniny, kdy nejlehčí silikátová struska plavala na povrchu, zatímco vyredukované barevné kovy se nacházely na dně. Výsledkem pak bylo podle zpracovávané rudy buď hutní olovo

obohacené Ag, černá měď obohacená Ag nebo měděný kamínek s různými obsahy Ag. V případě černé mědi následoval další krok (ságrování), při kterém bylo z mědi vytavováno olovo a výsledkem bylo hutní olovo obohacené Ag (Vaněk – Velebil 2007). Přitom olovo hrálo v tomto procesu zásadní roli, protože do sebe vázalo Ag, což bylo žádoucí především u stříbrem chudých rud (tzv. proces zolovňování). U stříbrem bohatých rud mohlo být olovo pouhý vedlejší produkt (Hrubý 2004). Separace stříbra z hutního olova se prováděla při procesu kupelace, kdy bylo hutní olovo opět převedeno do taveniny a na povrch byl vháněn měchy vzduch, tím došlo k oxidaci olova na klejt (PbO), který plaval na povrchu roztaveného kovu a byl z něho také upouštěn nebo sháněn. Stříbro se za těchto podmínek neoxiduje, proto zůstalo jako těžší tavenina u dna. Výsledkem tohoto procesu bylo tzv. hertovní stříbro, tedy slitina s obsahem Ag 60–90% (zbytek připadal zejména na měď). Pro dosažení vyšší čistoty se kupelace v menším měřítku opakovala při tzv. přepalování stříbra, což byla ještě mnohem energetičtější oxidace, při které se oxidovala i měď. Výsledný klejt, kterého vznikalo obrovské množství, byl potom opět vrácen do redukční tavby a tím recyklován. Veškeré olovo tak směřovalo do procesu kupelace (viz obr. 2) (Vaněk – Velebil 2007).

Upravené stříbro pak bylo vstupní surovinou pro mincovny. Působnost jihlavské mincovny je řazena do konce 50. let 13. století. V tu dobu představovala jednu ze šesti moravských mincoven (Znojmo, Brno, Uherské Hradiště, Olomouc, Opava). Její působnost byla spojena hlavně se snahou Přemysla Otakara II. zabránit vstupu cizí nekvalitní měny na naše území. Ražen byl oboustranný moravský denár a malý moravský brakteát. Na přelomu 13.–14. století byla přenesena mincovna na Kutnohorsko. Pro absenci mincovny bylo stříbro převáženo do Brna. Teprve až ve 30. letech 15. století byla ražba obnovena a ražen byl peníz a halěř. Vlivem úpadku pražského groše v průběhu husitských válek byla tato mince kontramarkována a dorážen byl ježek jako heraldický znak Jihlavy. To vedlo k posílení měny v rámci Jihlavy (Jaroš 1999).



Obr. 2 Blokové schéma procesu získávání stříbra z rudy (převzato a upraveno podle Ströbele et al. 2010).

4 Jihlavský rudní revír

Vymezení jihlavského rudního revíru různými autory se v drobnostech liší, nicméně v širším slova smyslu jde o území o celkové rozloze přibližně 280 km², které je možné v krajních bodech vytyčit výčtem obcí a kót následně: Kamenná, Malý Beranov, Kolárovice, Třešť, kóta Čeřínek (761 m), Ježná a Smrčná (Pluskal – Vosáhlo 1998). Někdy je striktně chápán jen jako území mezi Zbornou, Výskytnou, Kostelcem, Rančířovem, Kosovem, Malým Beranovem a Bedřichovem s Jihlavou v přibližném středu a o celkové rozloze 63 km² (Malý 1999). Mineralizované struktury je možné rozdělit do tří skupin: 1) dislokační zóny až několik kilometrů dlouhé a mocné desítky až první stovky metrů, 2) dislokace mající délku do jednoho km a mocnost několik metrů a 3) otevřené pukliny a puklinové systémy s hydrotermálními žilami a žilníky o mocnosti do jednoho metru, délky nepřesahující 100 m a nejčastěji se vtroušeným či závalkovitým, méně i masivním zrudněním. Z hlediska mineralizace hrají hlavní roli právě dislokační zóny, kde se utvářelo zrudnění v několika oddělených etapách, tektonická aktivita vedla také k porušení a remobilizaci starších mineralizací. Jednotlivá rudní tělesa dislokačních zón se často kulisovitě překrývají a mají podobu rudních sloupů o mocnostech až 10 m. Menší mineralizované struktury jsou tvořeny obvykle jen 1–2 m mocnými a jen několik metrů dlouhými čočkami. Zrudnění je v tomto případě spíše vtroušené a jen výjimečně se objevují masivnější polohy (Pluskal – Vosáhlo 1998).

Dominantním směrem žilných těles je S-J a jemu blízké směry SSV-JJZ, doprovodné jsou drobnější příčné struktury směru SZ-JV a Z-V. Tyto struktury jsou provázeny projevy alterace bočních hornin v mocnosti 0,5–20 m (Zajíček 1983). Alterace se geochemicky projevuje vyššími obsahy zejména Ag, Zn, Cu, Co a Ni. Zvýšené obsahy zinku korelují s přítomností sfaleritu. Zajímavé jsou naopak nižší obsahy Pb i přesto, že hojným rudním minerálem je galenit (Pluskal – Zajíček 1985). Žíly směru S-J jsou obvykle svislé nebo příkře ukloněné k východu. Celková souhrnná délka žil je 15690 m, přičemž intenzivně těženy byly v délce 9045 m. Nejdelší žilou je žíla Starohorského couku o délce přibližně 5 km, ale předpokládá se pokračování tohoto tělesa na jih po Okrouhlík, což by znamenalo souhrnnou délku až 9 km. Ostatní žíly obvykle nepřesahují délku 700 m (Zajíček 1983). Struktury směru Z-V se nacházejí především v severní části jihlavského rudního revíru a je na ně vázána podobná, případně shodná mineralizace jako na dislokace směrné. Významnou strukturou je pfaffenhofská dislokační zóna orientovaná Z-V, nacházející se při severním okraji Jihlavy (Pluskal – Zajíček 1985). Mocnost rudních těles se pohybuje mezi 1,13–1,41 m. Průměrná kovatost cementačních zón je odhadována na 1883 g/t Ag. Pod oxidační zónou (hloubka větší než 50 m) se předpokládá desetina této hodnoty. Souhrnně za celé období těžby zde bylo v celém revíru vytěženo 488 tun stříbra. Ještě v šedesátých letech 20.

století byly některé úseky z pohledu obsahů polymetalických rud označeny jako bilanční (Zajíček 1983).

Na základě mineralogického složení a izotopů C, S a O je možné mineralizaci jihlavského rudního revíru rozdělit do dvou skupin, na vysokoteplotní a mesotermální. Vysokoteplotní mineralizaci je na základě studia izotopického složení S přisuzována teplota vzniku 370–410 °C a jako zdroj síry pro vznik sulfidů jsou uvažovány granitické a metamorfované horniny. Zdrojem uhlíku karbonátů byla organická hmota. Rudními minerály jsou sfalerit, galenit, pyrit, arsenopyrit, méně chalkopyrit, pyrhotin a tetraedrit-freibergit. Žilovinou jsou křemen a karbonáty. Mesotermální mineralizace vznikala za teplot 230–340 °C. Hodnoty izotopického složení S ukazují, že zdrojem mohly být rovněž okolní horniny. Z rudních minerálů je přítomen sfalerit a galenit. Menší až akcesorické jsou obsahy chalkopyritu, tetraedritu, argentitu a pyrargyritu. Žilovinou jsou křemen, baryt a karbonáty (Malý et al. 2008).

Na základě práce Pluskala a Vosáhla (1998) je možné rozdělit jednotlivé typy mineralizací podle mineralogického složení a teplotních podmínek vzniku do šesti skupin.* Zohledněno je i zbarvení sfaleritů. Barva sfaleritů postupně světlá s klesající teplotou vzniku a tím i množstvím Fe ve struktuře. Obsahy Fe se pohybují od 0,X % (světlý-pestrý) až po X0 % (černý). Sfalerit je také citlivým indikátorem obsahu india v rudních tělesech a indium, pokud je přítomné, se předně koncentruje právě v něm. Roli hraje teplota, ale i pro odlišné teplotní podmínky je jeho přítomnost charakteristická v rámci celého jihlavského rudního revíru, což svědčí o jisté příbuznosti s havlíčkobrodskou oblastí, kde jsou obsahy india anomální (Hak – Novák 1962).

4.1 Jednotlivé typy polymetalických mineralizací

Mineralizace typu černý sfalerit+kyzy±karbonáty (typ 1) je naprosto nejrozšířenější. Prostorově je úzce spjata s granity moldanubického plutonu a jeho apofýzami (Pluskal – Vosáhlo 1998). Této mineralizaci je přisuzováno spodnopermské stáří a odpovídá tzv. typu k-pol (kyzová polymetalická) nebo „kies-blendige Bleierez“ a „edle Braunspat“ (zkráceně kb+eb), či zkráceně Fe-Zn-Pb-Ag-(Cu). Mezi další významné lokality tohoto zrudnění patří Freiberg a Kutná Hora. Na dalších lokalitách včetně Jihlavy jsou mineralizace parageneticky chudší (Bernard 1991). Z jednotlivých rudních minerálů jsou přítomny především pyrit, sfalerit a galenit. Žilovinou je křemen, méně karbonáty (Pluskal – Vosáhlo 1998). Z karbonátů je nejběžnější siderit a karbonáty dolomitové skupiny se zvýšenými obsahy Mn. Zvýšené obsahy Mn jsou typické i pro siderity, které mohou obsahovat až 26 hmot. % MnO. To představuje až 42 % MnCO₃ koncového členu, proto je možné označit je jako Mn-bohaté siderity (Malý 2009). Nejvíce je dané zrudnění zastoupeno

* Rozdělení Malého et al. (2008) je v podstatě generalizované rozdělení Pluskala a Vosáhla (1998)

v oblasti západně od přibyslavské mylonitové zóny, zejména v okolí Kamenné, na území mezi Hybrálcem a Bedřichovem. Nejtypičtější podobu má na Jezdovické žíle. Po stránce mineralogické je nejbohatší pfaffenhofská dislokační zóna (Puskal – Vosáhlo 1998). Teplota vzniku této mineralizace se pohybuje v rozsahu 350–450°C (Malý – Dolníček 2005).

Na pfaffenhovské dislokační zóně se setkáváme s poměrně velkými úlomky rudy masivního zrudnění s brekciovitou, skvrnitou a závalkovitou texturou, zachovanými v haldovém materiálu. S alterací hornin je spojen i vznik vtroušených sulfidických rud. Hlavními rudními minerály jsou pyrit, sfalerit, galenit, méně chalkopyrit a arzenopyrit. V akcesorickém množství je přítomen pyrhotin, tetradrit a pyrargyrit. Žilovinou jsou zde karbonáty s menším množstvím křemene. Z karbonátů je nejběžnější siderit, manganem bohatý siderit a ankerit. Méně běžný je kalcit a dolomit. Podrobněji je možné rozdělit rudy na základě parageneze na následující tři typy: žilníkové, masivní a vtroušené. Nejvíce je zastoupeno masivní a žilníkové zrudnění. Pro žilníkové zrudnění je typické následující kvantitativní zastoupení sulfidů (řazeno sestupně): sfalerit, pyrit, chalkopyrit, arzenopyrit, galenit, tetradrit. Masivní zrudnění je vyvinuto v karbonátech (zejména siderit) a rudním minerálem je dominantně galenit provázený v menším množství pyritem a sfaleritem. Vtroušené zrudnění je charakteristické přítomností pyritu, sfaleritu a chalkopyritu. Ojedinele je přítomen galenit a arzenopyrit (Pluskal – Zajíček 1985). Tetradrit má zvýšené obsahy Zn, Cd a Ag a právě pro svůj vysoký obsah Ag je možné označit jej jako freibergit. Tvoří jen několik mm velké černošedé inkluze v asociaci s galenitem, chalkopyritem a barytem. Běžně se objevuje substituce arsenu za antimon. Zvýšené obsahy Cd (až 0,46 hmot. %) společně se Zn (až 5,47 hmot. %) nejsou běžné kvůli podobným vlastnostem obou prvků, proto když se jeden z nich objeví, obvykle výrazně převáží (Čech – Hak 1979).

Mineralizace typu světle až tmavě hnědý sfalerit±baryt±karbonáty (typ 2) vznikala podle sírového izotopického termometru za teplot v rozsahu 250–350°C (Malý – Dolníček 2005). Nachází se především v oblasti křížení přibyslavské mylonitové zóny s komárovickou tektonickou zónou a to zejména v okolí Hruškových Dvorů, Malého Beranova a Kosova. Nejpestřeji se projevuje severně od Rančířova. Hlavní složkou této mineralizace je kavernózní křemen, ke kterému v proměnlivém množství přistupují karbonáty (kalcit, ankerit, siderit) a baryt. Z rudních minerálů převažuje galenit se sfaleritem, spíše akcesorický je chalkopyrit a tetradrit (Pluskal – Vosáhlo 1998). Galenit tvoří až centimetrové závalky. Sfalerit společně s pyritem formují několikamilimetrové agregáty. S rozkladem sulfidů je pak spojen vznik limonitu. U této mineralizace se můžeme setkat i s ryzím stříbrem v drátcích až 5 mm dlouhých a 0,5 mm širokých, uspořádaných do složitějších agregátů. Stříbro obsahuje jen nepatrnou příměs síry a arsenu. Stříbro je patrně cementačního původu. Někdy je porůstáno jehlicovitými individui akantitu, která formují

kopinaté agregáty o velikosti až 0,2 mm. Zajímavá je přítomnost až 6,2 hmot. % Cu v akantitu. Možné je, že jde o minerál odpovídající mckinstyitu (Malý – Vávra 1998).

Mineralizace typu tmavě hnědý sfalerit+baryt+fluorit (typ 3). Mineralizace uvedeného typu se v tomto rudním revíru nachází jen na jediné žíle situované při kótě 629 m n. m. (u sv. Antonína) jihovýchodně od Ježené. Geneticky je nejspíš spjata s granity typu Eisgarn. Minerály žiloviny jsou zastoupeny jemnozrnným křemenem, hrubě lupenitým barytem a žlutým, případně nafialovělým fluoritem. Z rudních minerálů obsahuje sfalerit, galenit a chalkopyrit (Pluskal – Vosáhlo 1998) Pomocí izotopického termometru byla stanovena teplota vzniku okolo 250 °C (Malý – Dolníček 2005).

Mineralizace typu světlý sfalerit±baryt±karbonáty (typ 4). Tento typ mineralizace byl v historických epochách těžby v této oblasti ekonomicky nejvýznamnější (Pluskal – Vosáhlo 1998). Tato mineralizace je Fe chudá a bývá označována jako pol (polymetalická) nebo zkráceně Pb-Cu-Zn-Ag. Další lokality mimo jihlavský rudní revír jsou Ratibořské Hory, Příbramsko, Nová Ves u Rýmařova či Rudolfovo. Je naprosto typická pro česko-moravskou metalogenickou zónu (Bernard 1991).

Nachází se jen na některých úsecích starohorské a rančířovské dislokační zóny. Minerály žiloviny představuje několik generací křemene spolu s různě velkými tabulkami barytu, místy i s chalcedonem, či karbonáty (Pluskal – Vosáhlo 1998). Nejběžnějším karbonátem této mineralizace je kalcit. Spíše akcesorické jsou karbonáty dolomitové skupiny. Kalcity jsou poměrně čisté, jedinou významnou příměsí je Mn (i více než 2 % MnO). To vedlo k mylnému určení těchto karbonátů jako rodochrozity pro jejich růžové zbarvení (Malý 2009). Z rudních minerálů je přítomen pestře zbarvený sfalerit s galenitem. V menším množství je přítomen tetradrit a chalkopyrit. Zajímavá je zonálnost této mineralizace. Ta se projevuje postupným ustupováním barytu a sulfidů směrem ke granitovým tělesům (Pluskal – Vosáhlo 1998). Teplotní podmínky vzniku jsou na základě izotopického termometru stanoveny okolo 250 °C (Malý – Dolníček 2005). Podle Holuba a Juráka (1978) je tato mineralizace mladší než první uvedená (černý sfalerit+kyzy±karbonáty) a její vznik dávají do souvislosti s horizontálními pohyby západních bloků jižním směrem. Naproti tomu mineralizace černý sfalerit+kyzy±karbonáty spojují s uvolněním vertikálního napětí v klenbě plutonu.

Součástí tohoto typu mineralizace je i ryzí stříbro. To má podobu „mechovitých“ agregátů rozptýlených v křemeni, ojediněle tvořící až 3 mm drátky. Vzorky se stříbrem jsou provázeny šedočerným křemenem, galenitem a pyritem (Malý – Vávra 1998).

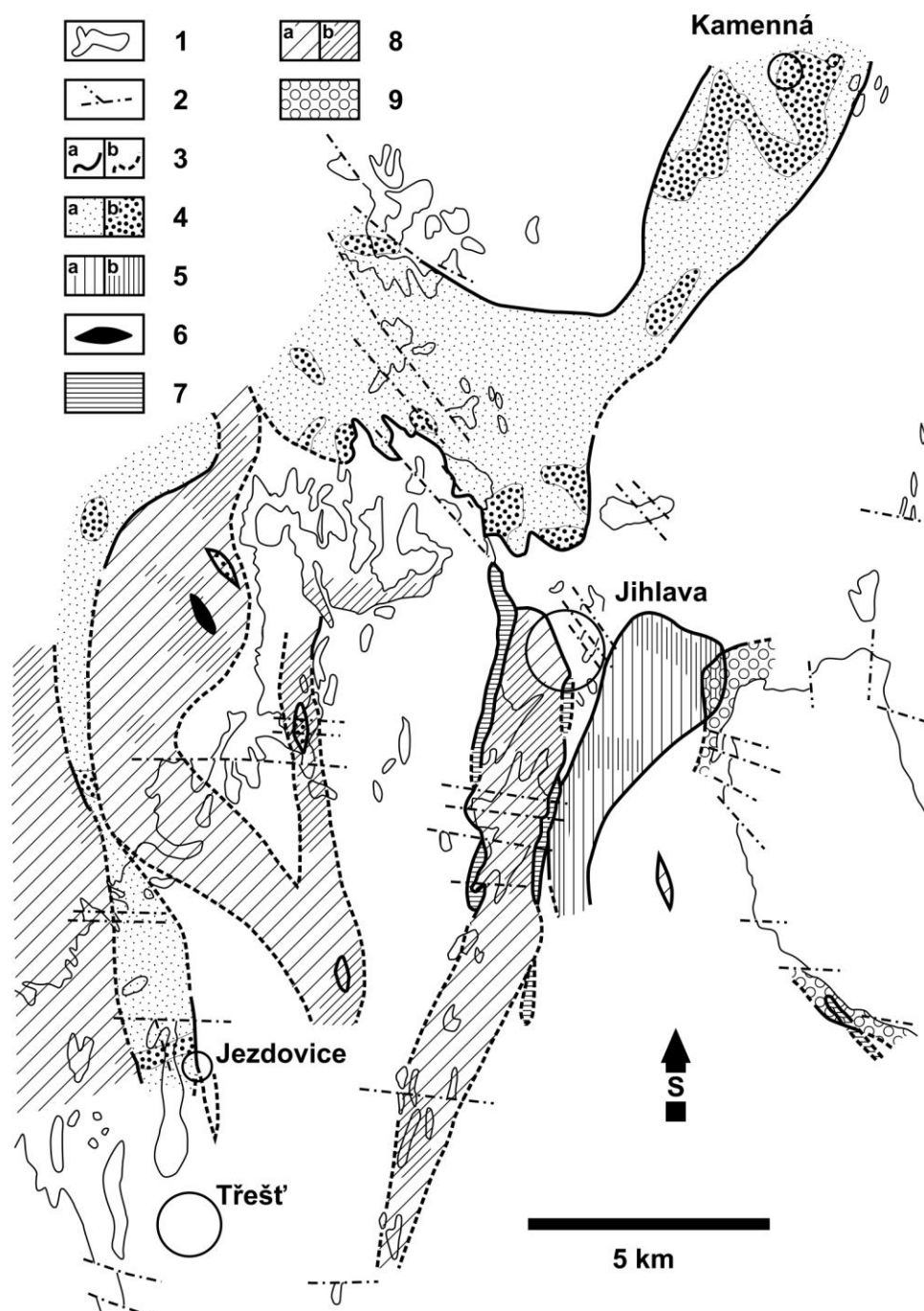
Vzorky odebrané z haldového materiálu na Starých Horách ukázaly přítomnost pyritu, sfaleritu, galenitu a nepatrné množství freibergitu. Obsahy Ag v galenitu jsou nízké a nepřesahují první

stovky ppm. Dříve těžený galenit byl zřejmě na Ag bohatší, ale i tak zřejmě nepřekračoval 0,1 % Ag (Malý 2004).

4.2 Ostatní typy zrudnění

Mineralizace typu křemen±pyrit (typ 5) je často tvořena několika generacemi křemene a na jejich vzniku se podílely vysokoteplotní roztoky v blízkosti intruzivních těles. Křemen má naprosto dominantní zastoupení. Starší generace jsou obvykle hruběji zrnité a vyplňují převážnou část puklin, mladší křemen jím proniká ve formě žilek. Tyto žilky obsahují jen nepatrné množství pyritu. Nachází se zejména na lokalitách u Ježené, Hlávková, Jezdovic a Vílance (Pluskal – Vosáhlo 1998).

Mineralizace typu psilomelan±chalcedon (typ 6) je úzce spjata s hydrotermální mineralizací, nicméně geneticky s ní přímo nesouvisí. Objevuje se na severozápadním a jihozápadním kontaktu jihlavského masivu s metamorfovanými horninami. Jde o mineralizaci nízkoteplotní spojenou s hypergeními procesy. Je tvořena žilkami křemene s chalcedonem a psilomelanem (Pluskal – Vosáhlo 1998).



Obr. 3 Schéma plošného rozmístění jednotlivých typů mineralizace v jihlavském rudním obvodu (převzato a upraveno podle Pluskal – Vosáhlo 1998).

Legenda: 1 – kontury těles granitoidů; 2 – významnější zlomové struktury, porušující okraje těles granitoidů; 3 – hranice minerogenetické subzóny: a) známá, b) předpokládaná; 4 – mineralizace **typu 1**: a) základní plocha minerogenetické subzóny, b) oblasti se zvýšenou koncentrací mineralizace; 5 – mineralizace **typu 2**: a) základní plocha minerogenetické subzóny, b) oblasti se zvýšenou koncentrací mineralizace; 6 – mineralizace **typu 3**; 7 – mineralizace **typu 4**; 8 – mineralizace **typu 5**: a) základní plocha minerogenetické subzóny, b) oblasti se zvýšenou koncentrací mineralizace; 9 – mineralizace **typu 6**.

5 Strusky po tavně polymetalických rud

Na metalurgické strusky je možné pohlížet jako na potencionálně nebezpečný odpad nabohacený těžkými kovy nebo také jako na surovinu vhodnou k dalšímu využití, zejména jako podklad vozovek či plnivo do betonů (Ettler et al. 2001). I když jsou strusky odlišné v morfologii, zbarvení i hustotě, jsou tvořeny hlavně Fe-silikáty a to i bez ohledu na to, jestli jde o strusky po tavně železa nebo polymetalických rud (Bachmann 1982). Z pohledu funkce strusky jde v podstatě o vedlejší produkt, se složením navrženým a optimalizovaným pro ekonomicky a technicky co nejnazší extrakci cílového kovu (Manasse – Mellini 2002b). Důležitými faktory bylo především dosažení co nejnižší teploty tavení a nízké viskozity, zároveň bylo funkcí strusky odstranění nečistot ze vsázky a zabránění reoxidace kovu. Struska s nízkou teplotou likvidu umožňovala úsporu na palivu. Nízká teplota také snižovala množství unikajících kovů ve formě dýmů, také byla snížena míra natavení vyzdívky. Nízká viskozita umožňovala rychlé odstranění silikátové taveniny z pece bez možného zatuhnutí a malé ztráty teploty. Navíc podporovala rychlý průchod vyredukovaných kapek kovu taveninou, a tak zvýšila efektivitu celého procesu (Ströbele et al. 2010). Po mineralogické stránce nejde o materiál příliš variabilní a i napříč celým světem s ohledem na různý typ zpracovávaných rud, tak i na požadavek cílové suroviny je složení obvykle velice podobné, lišící se spíše v chemismu jednotlivých fázích, než v jejich přítomnosti. Obvykle v tomto materiálu dominují vysokoteplotní Ca-Fe silikáty. Vzhledem k tomu, že jde o poměrně jednoduchý geochemický systém, je výsledné chemické a mineralogické složení odrazem typu zpracovávané rudy a příměsí společně s dosaženou teplotou a rychlostí chlazení (Ettler et al. 2001). Složení strusky se dá poměrně dobře aproximovat prostřednictvím šestice horninotvorných oxidů s převahou SiO_2 , FeO a CaO , v menším množství obsahují Al_2O_3 , MgO a K_2O (např. Manasse – Mellini 2002b). Výjimkou nejsou ani strusky, kde se na chemismu výrazně podílí i jiné než uvedené horninotvorné oxidy, jako například PbO v případě strusek příbramských (Ettler et al. 2009a). Podobný chemismus i fázové složení mají strusky z rud zpracovávaných ve středověku stejně jako strusky z první poloviny 19. stol. či z počátků 20. století. Mnohdy se s většími rozdíly setkáme v rámci jedné lokality než srovnáním materiálu napříč celou Evropou (srov. Ettler et al. 2009a, Puziewicz 2007, Ettler et al. 2001, Manasse – Mellini 2002).

Zdrojem SiO_2 společně s CaO a FeO je nejčastěji zpracovávaná ruda, tam kde mineralizace neobsahuje karbonáty je CaO do vsázky uměle přidáváno, stejně tak FeO může být přidáváno v podobě oxy-hydroxidů železa. Přítomnost Al_2O_3 je spojována, jak dokládají pokusy o rekonstrukci procesu tavně, s natavením vyzdívky pece (Ströbele et al. 2010), K_2O je vnášen do systému použitým palivem (Manasse – Mellini 2002b). Jak ukazují inkluze dřevěného uhlí, byly pro potřeby

taveb využívány různé druhy dřeva, otázkou byla dostupnost. Například pro strusky z okolí Heidelbergu v Německu se jako nejběžnější jeví dub, ale používaným byl například i kaštan. Pro každý druh stromu, využitý na výrobu dřevěného uhlí, jsou charakteristické jiné obsahy K_2O (Ströbele et al. 2010). U modernějších strusek, kdy byl jako palivo využit koks, jsou hodnoty K_2O velice nízké (Ettler et al. 2009b).

5.1 Makroskopický vzhled

Barva je vzhledem k přítomnosti velkého množství Fe-silikátů obvykle černá až šedá. Pokud jsou strusky dlouho exponovány povětrnostním vlivům, mohou být vyvinuty i oxy-hydroxidy železa a dávat tak povrchu rezavé zbarvení. Povrch může být zbarven i jinými sekundárními minerály. Proměnlivý je i vryp, běžný je tmavě hnědý. Časté je na povrchu zachycení stop po tečení. U strusek s vyšším obsahem síry může být cítit i sirný zápach. Hustota se pohybuje mezi 3 a 5 g/cm^3 . V rámci jedné lokality se běžně nachází několik typologicky odlišných variet strusek (Bachmann 1982).

5.2 Celkový chemismus

Jak bylo uvedeno výše, dá se chemické složení v hlavních rysech vyjádřit prostřednictvím několika oxidů, ale i tak může docházet k výrazné variabilitě v chemismu v rámci širšího okruhu lokalit, nebo jedné jediné (Piatak et al. 2004). Jak ukazují například strusky z lokality Tsumeb v Namibii složené z SiO_2 (9,82–35,50 hmot. %), Fe_2O_3 (8,42–64,22 hmot. %), CaO (3,58–17,44 hmot. %), Al_2O_3 (2,82–18,50 hmot. %), Pb (0,97–18,38 hmot. %), Cu (0,49–12,18 hmot. %), Zn (2,8–12,09 hmot. %), As (0,09–7,59 hmot. %), mohou být rozdíly v chemismu markantní (Ettler et al. 2009b). Z našeho území jsou neobvyklé příbramské strusky s vysokým obsahem olova (až 34,38 hmot. % PbO). Zajímavá je i jednoduchost tohoto systému. Ten je možné téměř celý (není běžné) vyjádřit prostřednictvím tří komponent: SiO_2 (27,02–54,6 hmot. %), FeO (2,65–33,97 hmot. %) a PbO (3,00–34,38 hmot. %). Obsahy SiO_2 vyšší než v případě jiných lokalit jsou zapříčiněny buď špatnou separací rudních minerálů od žiloviny, nebo cíleným přidavkem většího množství SiO_2 hmot do vsázky. Vysoké obsahy Pb jsou přednostně vázány na sklo, to je nejspíš způsobeno nabohacením taveniny na kovové prvky, a naopak nedostatkem síry. Typické jsou nízké obsahy Ag . Důvodem je buď dobrá technologie hutnění, nebo nízké obsahy tohoto kovu ve vsázce (Ettler et al. 2009a). Celkový chemismus je také podkladem pro výpočet teplotních podmínek vzniku a viskozity taveniny (Bachmann 1982).

K projekci teplotních podmínek se dají použít ternární diagramy, jejich úskalím je obvykle skutečnost, že třemi komponentami se dá jen stěží zohlednit celkové složení, a není proto možné

zahrnout například působení alkálií na změnu teploty likvidu. Navíc tyto diagramy zahrnují obsahy SiO_2 a ten může být ovlivněn v rámci celkových chemických analýz neroztavenými relikty křemene ze vsázky. Výsledkem je potom široký interval nadhodnocených hodnot (Ettler et al. 2009a).

Jak ukazují experimentální práce, teplota čeho se při použití tavidel na bázi CaO a bez vyšších obsahů alkálií pohybuje přibližně okolo $1100\text{ }^\circ\text{C}$, v tomto případě hodnoty přibližně korelují i s údajem $1200\text{ }^\circ\text{C}$ získaným z ternárního diagramu $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ (Ströbele et al. 2010). Výše zmíněná experimentální teplota leží lehce mimo interval $1150\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$ zjištěný Manassem a Mellinim (2002b) pro strusky v okolí Massa Marittima v Itálii. Ty jsou poměrně bohaté na CaO (v průměru 15 hmot. %), což odráží použití tavidel právě na bázi CaO (obsahy alkálií jsou nízké). Použití systému $\text{SiO}_2\text{-CaO-FeO}$ na strusky příbramské vede k hodnotám teplot tání $1300\text{--}1700\text{ }^\circ\text{C}$, což jsou jednoznačně nadhodnocené hodnoty. Po zohlednění obsahů Pb dosáhli autoři hodnot $800\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ (Ettler et al. 2009a).

Viskozita je vedle chemismu závislá také na teplotě. Je možné stanovit ji z celkového chemismu. Ovlivňuje ji přítomnost síťotvořičů a modifikátorů. Pro srovnání se dá stanovit tzv. index viskozity, který je dán poměrem součtu jednomocných a dvojmocných kationů $\text{CaO+FeO+MgO+MnO+K}_2\text{O+Na}_2\text{O}$ ku součtu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+SiO}_2$. U tavenin s vyššími obsahy Al a menšími obsahy Ca, Na a K se část Al chová jako modifikátor taveniny (Bachmann 1982). Můžeme se setkat i s upraveným vzorcem pro výpočet viskozity, které zohledňují velmi obvyklé zvýšené obsahy Pb a Zn. Upravení spočívá v prostém přičtení PbO a ZnO k jednomocným a dvojmocným kationům uvedeným výše (Ettler et al. 2009a).

Se struskami je často spojená i přítomnost materiálu označovaného v anglické literatuře jako „matte“. I když se struskami přímo souvisí, složením je naprosto odlišný. Představuje těžší sulfidickou taveninu oddělenou od silikátové a odhaluje tak nedokonalost procesu pražení (Manasse – Mellini 2002a). Může mít podobu jen drobných kapek zachycených v silikátové strusce, nebo až masivní hmoty. Typický je kovový lesk, vysoká hustota a komplexní složení. Přítomny jsou sulfidy, ryzí kovy a arsenidy. Ze sulfidů je typický pyrrhotin, galenit, wurtzit. Zastoupení jednotlivých fází kolísá podle typu zpracovávané rudy. Z Cu-fází je přítomen bornit. Ryzí kovy jsou zastoupeny olovem, mědí a antimonem, arsenidy löllingitem, koutekitem a různými nestechiometrickými fázemi. Mohou se objevit i minerály Ni jako breithauptit (Ettler – Johan 2003). S narůstajícím obsahem Cu vzniká komplexní směs tvořená sulfidickými fázemi a kovovými slitinami As, Sb a Fe označovaná jako „spiess“ (Bachmann 1982).

5.3 Fáze a jejich chemismus

Hlavním faktorem ovlivňujícím fázové složení strusek je v rámci jedné lokality především rychlost chlazení; jinými slovy dostatek času pro krystalizaci fází, které vznikají z více diferenciované taveniny. Naprosto nejběžnější krystalickou fází strusek je olivín a amorfní fází sklo (Ettler et al. 2001). Ovšem můžeme se setkat i se složením zcela raritním, kdy hlavní složku představuje živec (Ettler et al. 2009b). Jako nejobecněji platné krystalizační schéma je možné vidět olivín>sklo, případně spinel>olivín>pyroxen>sklo (Ettler et al. 2009a). Pro strusky bohatší CaO a za předpokladu dostatečně dlouhé doby krystalizace je typická i přítomnost melilitu a posloupnosti spinel>melilit>klinopyroxen>olivín>sklo. Pro krystalické fáze strusek je spíše pravidlem, nežli výjimkou komplikovaný chemismus (Ettler et al. 2001).

Olivín má různou morfologii, která odráží rychlost chlazení. Morfologie olivínu se pohybuje od izometrických zrn typických pro rychlost tuhnutí nepřesahující 10 °C/h, přes lištovité olivíny o délce až několik mm, ale šířce nepřesahující několik setin mm (do 80 °C/h) až po peříčkovitě uspořádané agregáty (rychlost tuhnutí přes 1000 °C/h) (Ettler et al. 2009a). V olivínu obvykle dominuje fayalit, ale zastoupena může být i forsteritová a larnitová komponenta. Často je pak vyvinutá zonálnost, která se projevuje v lehkém obohacení jádra forsteritovou a lemu larnitovou komponentou (Ströbele et al. 2010). I přes to, že zastupování Ca za Fe²⁺ je u přírodních olivínů omezené, můžeme se setkat až s 27,48 hmot. % CaO ve formě kirschsteinitového koncového členu; v tomto případě se projevuje postupné obohacení Ca od středu k okraji. Olivín je také jednou z fází fixujících Zn (až 6,28 hmot. % ZnO). Běžně se vyskytuje i zvýšená tefroitová komponenta (až 4,42 hmot. % MnO; Ettler et al. 2001). Někdy mohou být jedinými významnými koncovými členy fayalitová a tefroitová komponenta (Ettler et al. 2009a). U strusek Zn bohatých může vznikat willemit (Puziewicz 2007). Bachmann (1982) uvádí pro vznik willemitu nutnost obsahu Zn v olivínu větší než 9 hmot. %. Z příměsí obsahuje willemit až 20 hmot. % FeO.

Nejběžnějším oxidem je **spinelid**. Typický je pro něj vysoký stupeň automorfie a velikost nepřesahující několik desítek μm. Jeho chemické složení obvykle odpovídá řadám hercynit-gahnit a franklinit-magnetit. Postupem krystalizace dochází ke vzniku zonálnosti, projevující se jádrem bohatším na Cr, Mg, Al a Zn (až 19,91 hmot. %), které ostře, nebo pozvolna přechází v lem bohatý Fe (Ettler et al. 2001). Někdy je chemismus jednodušší a odpovídá řadě magnetit-hercynit, nicméně naznačená zonálnost ve vztahu k Fe platí i zde. Poměrně běžnou příměsí je i Ti (až 4,25 hmot. % TiO₂). Díky svým vlastnostem patří spinelidy mezi nejstabilnější fáze strusek (Piatak et al. 2004). Pokud jsou přítomny, představují první krystalickou fázi vznikající z taveniny a poskytují krystalizační základ pro wüstit či iscorit. Wüstit má jen vzácně podobu izometrických zrn, mnohem

častěji tvoří dendrity nebo eutektické srůsty s fayalitem (Ströbele et al. 2010). Jako velice neobvyklé je možné vidět obrůstání spinelidů Pb silikátem $Pb_4Al_2(SiO_3)_7$ (Puziewicz 2007). Pokud byly podmínky během tavby silně oxidické, mohou se v magnetitu objevit odmišeny hematitu (Bachmann 1982).

Pyroxeny mohou představovat až 40 % objemu strusky, ale není to příliš běžné. Svým složením nejčastěji odpovídají hedenbergitu (Piatak et al. 2004). Hedenbergit se nachází často společně s dalším Ca bohatším pyroxenem, kterým je bustamit, či ferrobustamit. Běžné je kolísání chemismu a u některých pyroxenů kutnohorských strusek je pozorovatelná i negativní korelace mezi Fe a Ca. Teplotní stabilita těchto pyroxenů se pohybuje mezi 800–1000 °C, nad touto teplotou je stabilní jen ferrobustamit. V případě nižších obsahů Ca vznikají na úkor pyroxenů olivíny. U pyroxenů uvedeného složení dokonce autoři předpokládají vznik před krystalizací olivínů (Manasse – Mellini 2002a). Běžně jsou zastoupeny jen v malém množství, a to v podobě malých zrn. Mohou být dokonce i součástí rychle chlazených strusek, kde nemají mnoho času ke krystalizaci. Tomu pak odpovídá i jejich morfologie (hvězdčovitě krystaly). Dominují pyroxeny Fe bohaté s tendencí akumulovat Ca. Může docházet i k substituci Zn za Fe (až 4,4 hmot. % ZnO; Ettler et al. 2009a). Z pohledu Zn jsou pyroxeny v případě Zn bohatých tavenin zonální. Dochází k nárůstu obsahu Zn od středu směrem k okraji (Puziewicz 2007). U tavenin Zn chudších se zonálnost neprojevuje. Při krystalizaci pyroxenu dochází k obohacování taveniny o Zn (Ettler et al. 2000). Od přírodních pyroxenů se zásadně liší právě vstupováním Zn do struktury. Neobvyklá je i přítomnost vyšších obsahů K (Manasse – Mellini 2002b). Nepřítomnost alkalických pyroxenů je způsobeno nízkými obsahy Al_2O_3 . Pyroxenoidy jako wollastonit mohou být přítomny, ale podléhají přeměně na pyroxeny (Bachmann 1982).

Melilit je vysokoteplotním vápenatým silikátem. Důvod jeho absence může být nedostatek vápníku spojený s absencí tavidel na bázi CaO, nebo vysoké obsahy SiO_2 . Může být důležitým koncentrátorem zinku (až 12,2 hmot. % ZnO). Z příměsí má význam K (až 2,16 hmot. % K_2O) (Manasse – Mellini 2002a). U strusek modernějších, s vysokým obsahem zinku obsahuje až 23 hmot. % ZnO, zvýšené mohou být i obsahy Pb (Puziewicz 2007). Pro schopnost fixovat vysoké obsahy Zn vede krystalizace melilitu k ochuzení taveniny o Zn (Ettler et al. 2000). Jednotlivá zrna mají nejčastěji podobu lišt, dendritů nebo izometrických automorfních zrn bez mikroskopicky pozorovatelné zonálnosti. Koncové členy podílející se na jeho složení jsou u středověkých strusek příbramských (řazeno sestupně) hardystonit, ferroakermanit, akermanit, Na-melilit a v menším množství gehlenit (Ettler et al. 2001). Podobné složení je typické i na jiných světových lokalitách (akermanit, hardystonit, Na-melilit, gehlenit, ferroakermanit) (Tsumeb Namibie; Ettler et al. 2009b). Dokonalá mísivost existuje mezi všemi členy až na draselný (Bachmann 1982).

Podle některých autorů (Ettler et al. 2009a) **živce** z taveniny vznikat nemohou a jsou tak jen neroztaveným zbytkem. Můžeme se však setkat i s netypickým složením strusky, kde dominuje právě živec, a to hned ve dvou generacích. Obě generace jsou rozdílné především ve svém chemismu. První generace odpovídá složením anortitu a vytváří velká automorfně omezená izometrická zrna. Druhá generace je morfologicky podobná, a i když tvoří zrna menší velikosti, má velice zajímavý chemismus. Nachází se společně v asociaci se spinelidy a mají vysoké obsahy Pb (až 34 hmot. %). To poukazuje na vznik z taveniny obohacené tímto prvkem (Ettler et al. 2009b). Živce vzniklé přímo z taveniny mají chemismus obvykle blízký anortitu pro nízké obsahy alkálií v tavenině. Běžné jsou zvýšené obsahy Ba (Bachmann 1982).

Leucit tvoří nejčastěji nepravidelná zrna. Obvykle je posledním minerálem, který krystalizuje z taveniny. Jako jedna z mála fází do sebe nekonzcentruje Zn. Může obsahovat až 6,3 hmot. % BaO (Ströbele et al. 2010), případně až 1,06 hmot. % PbO (Puziewicz 2007).

Iscorit je poměrně neobvyklou fází, naprosto neznámou z přírodních systémů, o empirickém vzorci $\text{Fe}_2^{3+}\text{Fe}_5^{2+}\text{SiO}_{10}$, který je nejčastěji jehlicovitý, nebo lištovitý. Je také jedním z koncentrátorů Zn (až 8,9 hmot. % ZnO), ten substituuje dvojmocné železo. Z dalších příměsí je to zejména Al (Ströbele et al. 2010).

Sulfidy z hlediska celkového objemu strusek představují jen nepatrný zlomek, nicméně proměnlivost v jejich chemismu a fázovém složení je značná. Navíc obsahují široké spektrum těžkých kovů a zároveň jsou v povrchových podmínkách nejméně stabilní komponentou strusek (Piatak et al. 2004). Morfologicky jsou nejproměnlivější, obvyklé jsou i několika sulfidy tvořené kapky s přítomností kovových inkluzí. Vývin v podobě skeletálních zrn či symplektitů může signalizovat rychlé chlazení taveniny. Z nejběžnějších sulfidů je přítomen pyrhotin, sfalerit s různými obsahy Fe, galenit, Cu-Fe sulfidy (chalkopyrit, chalkozín a Cu-Fe-S nestechiometrické fáze) (Ettler et al. 2009a). Objevit se mohou i velmi drobné kapky kovů jako olovo s ryzostí 99,2 hmot. % Pb, či antimon (Ströbele et al. 2010). Přítomny bývají i arsenidy (koutekit) a sloučeniny antimonu (breithauptit, dyskrazit) (Ettler et al. 2009a). Přítomnost metalických inkluzí Pb a Cu může odrážet typ zpracovávané rudy, přinejmenším však poukazuje, že byly zpracovávány rudy neželezné, i když v případě extrémně redukčních podmínek a nevyvážené vsázce i z těchto rud může vznikat elementární železo (Bachmann 1982).

Sklo může být přítomno buď jako hlavní (někdy i jediná) složka, nebo jen jako výplň mezi krystalickými fázemi. Přítomnost skla bez dalších (krystalických) fází je typická pro rychlé chlazení strusky. V tomto případě odpovídá celkový chemismus strusky přibližně bodovým analýzám (i když nové fáze nevznikají, mohou být přítomny reliktly). Stejně jako v případě silikátů je sklo obvykle bohaté Fe, Si a Ca (Ettler et al. 2009a, Manasse – Mellini 2002a). Sklo představuje hlavní

koncentrátor Zn, Pb, Cu a As. Některé silikáty mohou sice fixovat vyšší obsahy jednotlivých prvků, ovšem z pohledu objemu skla ve strusce je jasné jeho privilegium (Piatak et al. 2004). Sklo obsahuje také relativně vysoké obsahy K, který je pro krystalické fáze převážně inkompatibilní prvek (Manasse – Mellini 2002b). Pokud jsou korelativně zvýšené obsahy Zn a S, případně Pb a S, může jít v případě bodových analýz o zachycení drobných inkluzí sulfidů v analyzovaném bodě. Vysoké obsahy S rovněž odráží nedostatečné pražení rudy. Stejně tak vysoké obsahy Zn jsou ukazatelem, že snahou nebylo odstranit minerály zinku (téměř výhradně sfalerit) ze vsázky (Manasse – Mellini 2002a).

Relikty jsou výsledkem nedostatečné teploty pro roztavení těchto fází. Jedná se především o křemen a živce. Křemen má často podobu izometrických rozpraskaných zrn, živec spíše zrn nepravidelných. Čistý křemen potřebuje pro tavení teplotu přibližně 1700 °C a nedá se předpokládat, že by v pecích tehdejší konstrukce bylo možné takových teplot trvale dosahovat (Ettler et al. 2009a).

Sekundární minerály se nejčastěji objevují v podobě povlaků, případně výplní trhlin, či dutin a jsou odrazem reaktivity materiálu. Některé jsou krystalické, jiné, jako například oxy-hydroxidy hliníku a železa amorfni (Piatak et al. 2004). Makroskopicky tvoří povlaky zelené, modré, červené a bílé barvy. Různé odstíny zelené jsou spojeny s přítomností arsenátů Cu a Cu-Pb jako lammerit a bayldonit, případně Cu bohaté zóny pokrývající olivenit. Složení modrých krust odpovídá rovněž arsenátům Cu, ale s příspěvkem Ca a Na lavendulanu, který se nachází v asociaci se sádrovcem. Pro strusky bohaté Pb je charakteristická přítomnost bílého hydrocerusitu, méně běžné jsou lemy anglesitu (Ettler et al. 2009b). U strusek chlazených v moři se mohou objevit i chloridy (Bachmann 1982). Z dalších jsou to především chalkantit, siderolit, jarosit, brochantit, jejichž přítomnost je dokladem mobility Fe, Cu, S, Ca a alkálií. Mocnost a vůbec přítomnost vyvinutého lemu je pochopitelně řízena klimatickými podmínkami společně s dobou expozice (Piatak et al. 2004).

6 Metodika

Vlastní práci je možné rozdělit na dvě části, terénní a laboratorní. Terénní etapa, která se uskutečnila v listopadu 2011, byla zaměřena na odběr vzorků strusek a dokumentaci lokalit. Po konzultaci s RNDr. Karlem Malým Ph.D. byly vybrány celkem tři lokality. Dvě se nacházejí na katastru dnešních Starých Hor a jedna poblíž obce Plandry (označení PL). Na Starých Horách se jedná o lokality: Jihlava - splav (JS) a Jihlava - Červený potok (ČP). Z odebraného materiálu byly vybrány reprezentativní vzorky pro laboratorní zpracování.

Po makroskopickém popisu byla pořízena fotografická dokumentace vzorků. Hustota strusek byla stanovena pyknometricky. Byly použity úlomky o velikosti do 8 mm (omezení dáno průměrem hrdla pyknometru). Přednostně byly vybírány vzorky s co nejmenším množstvím pórů a inkluzí křemene. Navážka se pohybovala okolo 5 g. Z každého vzorku byla provedena dvě měření, z kterých byl vypočítán průměr.

Magnetická susceptibilita byla stanovena pomocí laboratorního kapamůstku KLY-4 na Katedře geologie Univerzity Palackého v Olomouci. Hmotnost jednotlivých vzorků použitých pro měření se pohybovala okolo 50 g.

Tavby byly provedeny v elektrické peci LM 312.11/2 s plynulou regulací teploty v intervalu 20–1200 °C. Vybrány byly vzorky, u kterých byl stanoven i celkový chemismus. Nařezané na cca 1,5 cm dlouhé trámečky byly rozloženy na dinasovou cihlu a prostor mezi nimi byl proložen dřevěným uhlím, následně byly překryty krabičkou z nerezového plechu. Sestava byla vložena do pece a zbylý volný prostor byl rovněž vyplněn dřevěným uhlím. Dřevěné uhlí bylo využito pro zachování redukční atmosféry během tavby, protože jak se ukázalo, oxidační atmosféra byla spojena s napěněním zahříváných strusek. Průběh tavby byl následující: náběh pece na požadovanou teplotu (pro 1100 °C trvalo přibližně 3 hodiny), setrvání po dobu jedné hodiny na dané teplotě, vypnutí a odstavení pece. Po vychladnutí pece byly vzorky vyjmuty a byla pořízena fotodokumentace. Během zahřívání bylo zjištěno kolísáním teploty ± 10 °C od nastavené hodnoty.

Pro potřeby mikroskopického studia byly autorem práce na Katedře geologie Univerzity Palackého v Olomouci zhotoveny leštěné výbrusy a pro bodové analýzy skla u sklem bohatých strusek zalévané leštěné preparáty. Mikroskopické preparáty byly studovány v procházejícím a odraženém světle prostřednictvím polarizačního mikroskopu Olympus BX-50p na pracovišti Katedry geologie Univerzity Palackého v Olomouci. S popisem jednotlivých fází bylo spojeno i pořízení mikrofotografií k mikroskopu instalovaným fotoaparátém Olympus Camedia-7070WZ.

Vybrané fáze byly po potažení leštěného povrchu grafitem analyzovány metodou WDX na elektronové mikrosondě CAMECA SX100 instalované na Společném pracovišti Přírodovědecké

fakulty Masarykovy univerzity a České geologické služby v Brně (operátoři P. Gadas, R. Škoda). Pro sklo, olivín, živec, leucit a pyroxen byly podmínky analýz následující: urychlovací napětí 15 keV, proud svazku 10 nA (20 nA pro některé analýzy skla) a průměr svazku 2–4 μm pro leucit, olivín a živec a pro sklo 3–6 μm. Spinelidy byly analyzovány za následujících podmínek: urychlovací napětí 15 keV, proud svazku 20 nA a průměr svazku <1 μm. Sulfidy byly analyzovány při urychlovacím napětím 25 keV, proudu svazku 20 nA a průměru svazku <1 μm. Jednotlivé prvky byly pro dané fáze stanoveny s využitím následujících standardů:

sklo: sanidin (K, Si, Al), fluorapatit (Ca, P), SrSO₄ (S), albit A (Na), diopas (Cu), olivín, pyrop a MgAl₂O₄ (Mg), almandin a andradit (Fe), gahnite (Zn), rhodonit, spessartin a Mn₂SiO₄ (Mn), andradit a wollastonit (Ca), PbS (Pb), vanadinit (Cl, Pb), Ag (Ag), titanit (Ti, Si), topaz (F), ScVO₄ (V), baryt (Ba), chromit (Cr), anatas hardangervida (Ti), Ni₂SiO₄ (Ni);

spinelid: hematit (Fe), Ni (Ni), V (V), rhodonit (Mn), TiO (Ti), MgAl₂O₄ (Al, Mg), gahnit (Zn), sanidin (Si), chromit (Cr), andradit (Ca);

olivín: albit A (Na), sanidin (Si, Al, K), MgAl₂O₄ (Mg), grossular a wollastonit (Ca), chromit (Cr), benitoit a baryt (Ba), titanit (Si, Ti), almandin a andradit (Fe), Mn₂SiO₄ a spessartin (Mn), vanadinit a ScVO₄ (V), Ni modified (Ni), NaCl a vanadinit (Cl), topaz (F), gahnit (Zn), SrSO₄ (Sr);

živec a leucit: albit A (Na), sanidin (Si, Al, K), MgAl₂O₄ (Mg), grossular a wollastonit (Ca), chromit (Cr), benitoit a baryt (Ba), titanit (Si, Ti), almandin a andradit (Fe), Mn₂SiO₄ a spessartin (Mn), vanadinit a ScVO₄ (V), Ni modified (Ni), NaCl a vanadinit (Cl), topaz (F), gahnit (Zn), SrSO₄ (Sr), fluorapatit (P), Rb leucit (Rb), polucit (Cs);

sulfidy, stříbro a oxid Pb: Ag (Ag), FeS₂ (S, Fe), Sulf1_HgTe (Hg), PbS modified (Pb), Bi (Bi), Sn (Sn), PbCl₂ (Cl), Sulf1_CdTe (Cd), Cu modified a chalkopyrit modified (Cu), ZnS (Zn), Pararammelsbergit (Ni, As), Co (Co), Mn (Mn), PbSe (Se), Sb (Sb), InAs modified (In)

Pro stanovení celkového chemismu byly vybrány vzorky strusek rozemlety na analytickou jemnost v planetovém mlýnku. Z práškových vzorků bylo stanoveno celkové složení metodami ICP-OES, Leco a ICP-MS v laboratořích ACME v Kanadě. Metodou ICP-OES byly stanoveny hlavní oxidy, Ba, Sc a těžké kovy. Metodou Leco byla stanovena ztráta žíháním, C a S. Ostatní stopové prvky byly stanoveny metodou ICP-MS. Nadlimitní obsahy Pb (>1 hmot. %), Zn (>1 hmot. %) a Ag (>100 ppm) byly dodatečně analyzovány metodou ICP-OES na Katedře analytické chemie PřF Masarykovy univerzity v Brně.

Prvky vzácných zemin byly normalizovány na Cl-chondrit podle McDonough – Sun (1995). Hodnoty Eu anomálie (Eu/Eu*) byly vypočteny podle Monecka et al. (2002) a Ce anomálie (Ce/Ce*) podle McLennana (1989) (N značí normalizovanou hodnotu):

$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \cdot Gd_N}}$$

$$\frac{Ce}{Ce^*} = \frac{Ce_N}{\sqrt{La_N \cdot Pr_N}}$$

Analýz celkového chemismu bylo využito pro výpočet indexu viskozity podle Bachmanna (1982):

$$v.i. = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + FeO + MgO + MnO}{Al_2O_3 + SiO_2}$$

Pro přihlídnutí k atypickému složení studovaných strusek byl využit upravený vzorec se zohledněním vyšších obsahů Pb a Zn podle Ettlera et al. (2009a):

$$v.i._{mod} = \frac{K_2O + Na_2O + CaO + FeO + MgO + MnO + PbO + ZnO}{Al_2O_3 + SiO_2}$$

Dynamická viskozita byla vypočtena z celkového chemismu strusek podle vzorce uvedeného Giordanem et al. (2006):

$$\log \eta = b_1 + \frac{b_2 \cdot b_3}{b_3 + SM} + b_4$$

kde:

$$b_1 = \frac{-33,5556 + 0,0351623 \cdot T}{1 - 0,0022362 \cdot T - 0,00000166697 \cdot T^2}$$

$$b_2 = \frac{-93,6494 + 0,2317411 \cdot T}{1 - 0,0054597 \cdot T + 0,00001361072 \cdot T^2}$$

$$b_3 = \frac{45,575455 - 0,0780935 \cdot T}{1 - 0,0036108 \cdot T - 0,00000002170 \cdot T^2}$$

$$b_4 = -0,00001292391 \cdot \left(\frac{AE}{SM}\right) \cdot T^2 + 0,03577545 \cdot \left(\frac{AE}{SM}\right) \cdot T - 24,3366274 \cdot \left(\frac{AE}{SM}\right)$$

$$AE = Na_2O + K_2O - Al_2O_3$$

$$SM = Na_2O + K_2O + CaO + MgO + MnO + FeO / 2$$

Hodnoty SM a AE jsou vypočteny z mol. %. Opět je možné zohlednit zvýšené obsahy Pb a Zn přičtením obsahů jejich oxidů do sumy modifikátorů SM (Ettler et al. 2009a):

$$SM_{mod} = Na_2O + K_2O + CaO + MgO + MnO + PbO + ZnO + FeO / 2$$

Izotopické složení olova bylo stanoveno v laboratoři geologických ústavů Přf Univerzity Karlovy v Praze. Práškované vzorky (0,2 g) byly rozloženy v kyselinách (HF-HClO₄-HNO₃). Rozložené vzorky byly následně ředěny na koncentraci Pb odpovídající ~10 µg/L. Po ředění byly

vzorky analyzovány metodou ICP MS (přístroj Thermo Scientific X Series 2). Pro korekci naměřených dat bylo použito NIST SRM 981. Standardní chyba při měření poměrů $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ a $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ je menší než 0,5% RSD.

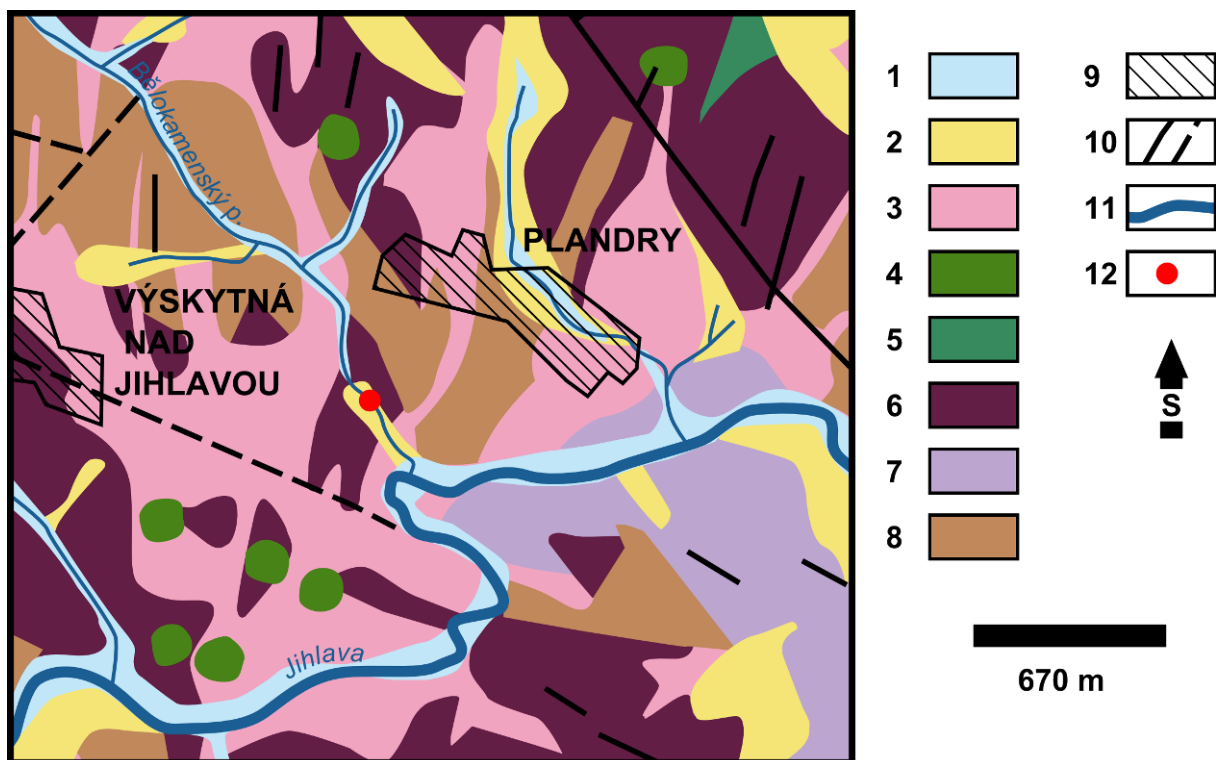
7 Terénní etapa

7.1 Plandry

Lokalita Plandry (viz obr. 4) se nachází v údolí Bělokamenského potoka nedaleko soutoku s řekou Jihlavou a spadá do katastru obcí Vyskytná nad Jihlavou a Plandry. Nadmořská výška je 492 m n. m. a GPS souřadnice jsou N49°25'6,060" E15°31'42,841". Lokalita představuje zaniklý hutnický a úpravárenský areál vzdálený přibližně 3 km severozápadním směrem od Starých Hor, ležící na levém břehu Bělokamenského potoka.

Několik metrů západně od hutniště se nachází pozůstatky po tvrzišti typu „motte“. Ve svahu levého břehu potoka se nachází také pozůstatky rantířovského náhonu. Jde o otevřený kanál ražený od Rantířova až po Staré Hory. Z tohoto 8 km dlouhého díla je dnes zachováno přibližně 70%. Jeho vznik je přisuzován 14. století. V pravém břehu se pak nachází náhon mlýnský, budovaný v 18. století, jenž souvisel s funkcí Brendlova mlýna, který je situován při soutoku Bělokamenského potoka s Jihlavou. Na této lokalitě byl archeologický průzkum již prováděn. Ten odhalil přítomnost keramiky, řadící funkci tohoto areálu přibližně do přelomu 13.–14. století. Nalezen byl i olovený slítek (Šamalová 2007).

Na lokalitě se nachází velké množství strusek. Ty tvoří v podstatě jedinou složku sedimentů potoka první desítku metrů proti a přibližně 20 m po proudu od hlavního meandru. Drobnější fragmenty jsou rozneseny až na vzdálenost první stovky metrů. Nalezena zde byla i mikrosondáž o rozměrech 1x1,8 m a hloubce 0,8 m. Jak je patrné z obr. 5, hlavní část profilu sondy představuje horizont přibližně 45 cm mocný, tvořený téměř výhradně různě velkými fragmenty i celotvary strusky. Ve svrchní části se pak nacházela přibližně 25 cm mocná vrstva šedohnědé hlíny a přibližně desetimetrová lesní humusová vrstva. U struskového horizontu nebylo pozorováno žádné přednostní uspořádání jednotlivých kusů ve vztahu k jejich velikosti, barvě či krystalicitě. Odebírány byly vzorky napříč celým profilem, ale i ze 7 metrového úseku koryta Bělokamenského potoka, jeho hlavního meandru. Nalézány byly několik desítek gramů velké fragmenty až několik stovek gramů těžké celotvary strusek. Celkem bylo odebráno přibližně 6 kg materiálu. Velikost jednotlivých kusů se pohybovala od 3 cm až po 20 cm.



Obr. 4 Schématická geologická mapa širšího okolí lokality Plandry (převzato a upraveno podle Veselé 1991).

Legenda: 1 – kvartérní deluviofluviální, převážně písčitohlinité sedimenty, místy kamenité; 2 – deluviální, hlinitopísčité až hlinitokamenité sedimenty (holocén); 3 – drobnozrnná biotit-muskovitická žula typ Bílý Kámen; 4 – hadec, serpentinizovaný peridotit, pyroxenit; 5 – eklogitický amfibolit; 6 – granulit s polohami granulitové ruly (hosovský masiv); 7 – cordierit-biotitický migmatit; 8 – biotitická a sillimanit-biotitická pararula, místy migmatitizovaná; 9 – zástavba; 10 – zlom, ověřený, předpokládaný; 11 – vodní tok; 12 – lokalita Plandry (PL).



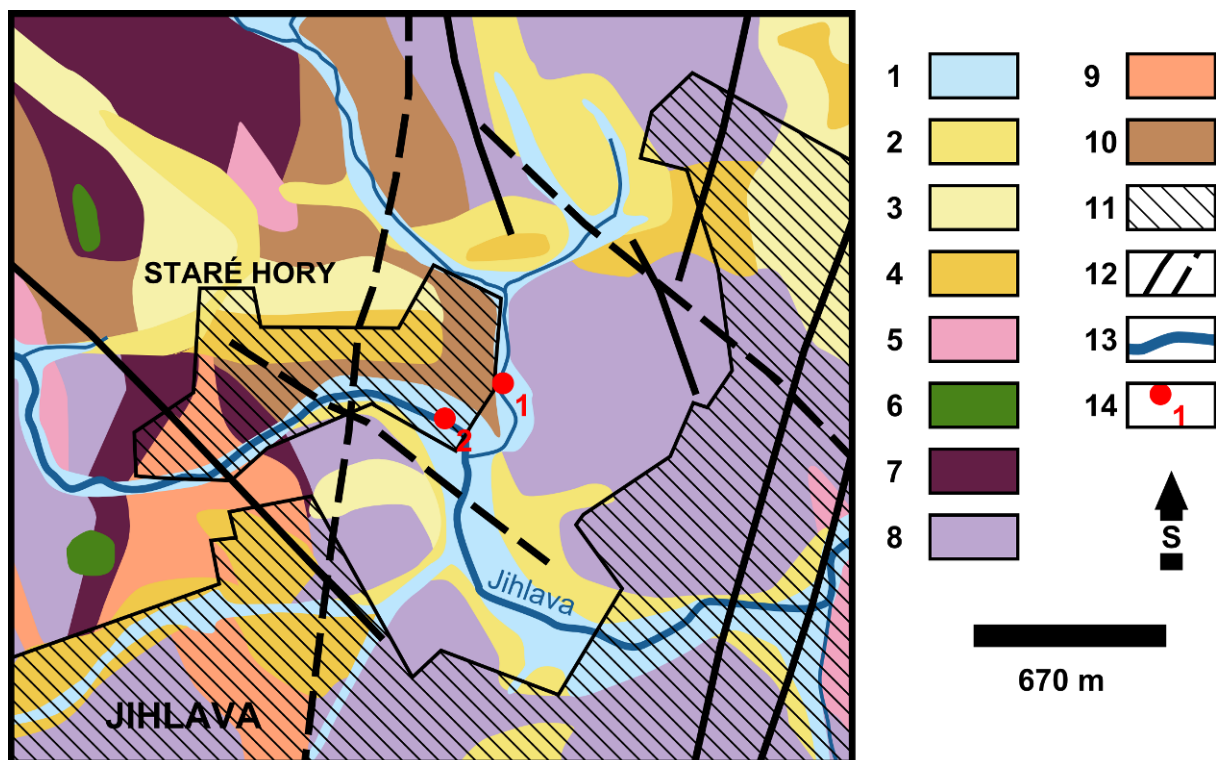
Obr. 5 Lokalita Plandry. Strusky v korytě Bělokamenského potoka (vlevo) a profil mikrosondáže (vpravo) s dobře patrným struskovým horizontem.

7.2 *Staré Hory*

Na Starých Horách byly vybrány celkem dvě lokality (obr. 6). První byla označena jako Jihlava - Červený potok, která se nachází v pravém břehu Červeného potoka nedaleko soutoku s Jihlavou. Nadmořská výška je 480 m n. m. a GPS souřadnice jsou N49°24'49,381" E15°34'39,118". Druhá, označená jako Jihlava - splav, se nachází v nadmořské výšce 475 m. n. m. v levém břehu řeky Jihlavy. GPS souřadnice lokality jsou N49°24'46,199" E15°34'27,239".

Odběrové lokality se nachází poblíž zaniklého těžebního a úpravárenského areálu Staré Hory. Působnost lokality jako úpravny vytěžených rud je doložena nálezem 8 mlécích kamenů. Zajímavé je, že tyto kameny se nenachází v těsné blízkosti potoka nebo řeky. S úpravou rudy jsou spojené i vysoké obsahy těžkých kovů v půdě. Nejvyšší obsahy se nachází v kruhových jámách, které sloužily pro propírání rudy. Zvýšené obsahy jsou i v liniových útvarech, odpovídajících žlabům. Ty byly využívány pro přeplavení rudy po proprání. Z lokality je popisován i nález 6 olověných slitků a tepelně modifikované technické keramiky (Hrubý et al. 2007). Nalezeny byly i předměty spojené s drobnou řemeslnou výrobou z barevných kovů, kterými jsou jednoduché přezky ze slitin Cu, Zn, Sn. Běžné jsou i předměty železné, mezi něž patří hřeby, skoby, nože a podkovy. Z hornických nástrojů byla nalezena pouze želízka (Macháňová 2007). V současné době nejsou z archeologických výzkumů dostatečné informace o funkci areálu jako hutniště. Nebyly zde zatím dokumentovány struskové haldy, případně mocné struskové horizonty, jak tomu je například u lokality Plandry (Hrubý et al. 2007).

Na obou lokalitách bylo nalezeno jen malé množství vzorků strusek. Hmotnost odebraných kusů se pohybovala od několik desítek g do 100g. Celková hmotnost odebraného materiálu se pohybovala okolo 2,5 kg (ČP) a 2 kg (JS). Jednalo se o drobné fragmenty (okolo 2 cm), ale i o celotvary (do 8 cm).



Obr. 6 Schématická geologická mapa severozápadní části Jihlavy (převzato a upraveno podle Veselé 1991).

Legenda: 1 – kvartérní deluviofluviální, převážně písčitohlinité sedimenty, místy kamenité; 2 – deluviální, hlinitopísčité až hlinitokamenité sedimenty; 3 – deluvioeolické, převážně písčitojílovité sedimenty; 4 – písky a jíly (neogén); 5 – drobnozrnná biotit-muskovitická žula typ Bílý Kámen; 6 – hadec, serpentizovaný peridotit, pyroxenit; 7 – granulit s polohami granulitové ruly (hosovský masiv); 8 – cordierit-biotitický migmatit; 9 – silimanit-biotitická migmatitizovaná pararula, místy s cordieritem; 10 – biotitická a silimanit-biotitická pararula, místy migmatitizovaná; 11 – zástavba; 12 – zlom, ověřený, předpokládaný; 13 – vodní tok; 14 – poloha lokalit: 1) Jihlava - Červený potok, 2) Jihlava - splav.



Obr. 7 Odběrové místo Jihlava - Červený potok (vlevo) a Jihlava - splav (vpravo).

8 Fyzikální vlastnosti strusek

8.1 Makroskopický popis

Strusky z lokality PL mají podobu nepravidelných, někdy i zploštělých celotvarů. Běžnější jsou však fragmenty s různě opracovanými hranami. Zastoupeny jsou strusky sklovité i krystalické. Povrch je matný, nebo skelně lesklý, někdy je pokryt okrově zbarveným limonitem. Jde o poměrně houževnatý materiál s lasturnatým lomem. Lomné plochy mají matný, nebo mastný lesk. Často jsou patrné starší trhlinky, vyplněné limonitem. Barva je proměnlivá. Obvyklá je černošedá, setkáváme se však i se struskami šedými či tmavě modře zbarvenými s přechody do černošedé. Sklovité variety jsou téměř výhradně černé. Prášek rozemletý na analytickou jemnost je zbarvený tmavě šedě. Na povrchu, ovšem nejvíce v řezu, jsou viditelné póry a relikty žiloviny. Póry většinou nepřesahují velikost 1 cm, zpravidla jsou okrouhlé, někdy izometrické, eventuálně bizarnějších tvarů. Nejčastěji jsou nepravidelně rozmístěny v celém objemu. U některých vzorků je zřetelné nabohacení póry v okrajových zónách. V extrémních případech může být střed strusky takřka bez porů a okraj silně porézní. Běžné jsou inkluze izometrických, rozpraskaných zrn křemene dosahující velikosti až 1 cm. V řezu jsou často viditelné sulfidické inkluze proměnlivých rozměrů (zpravidla nepřesahují 1 cm). Jejich tvar je obvykle izometrický, méně oválný, či zcela nepravidelný. Pro větší uzavřeniny je charakteristická vysoká porozita. Velmi vzácně jsou v pórech zachyceny až 5 mm velké kusy dřevěného uhlí. Na povrchu několika vzorků byly zachovány stopy po tečení, připomínající povrch provazcových láv pāhoehoe.

Na lokalitě JS byly nalezeny pouze sklovité strusky. Jednotlivé vzorky jsou přibližně izometrické, ostrohranné nebo se slabě opracovanými hranami. Jde téměř výhradně o fragmenty. Povrch je matný, skelně lesklý, nebo mastný. Lom je lasturnatý. Jednotlivé fragmenty jsou kompaktní, jen několik vzorků bylo silně rozpraskáno. Barva je proměnlivá. Typické jsou černošedě až černě zbarvené variety, nalezeny byly i šedomodře zbarvené vzorky. Po rozemletí na analytickou jemnost je barva prášku tmavě šedá s nádechem do zelené. Na jednotlivých řezech jsou pozorovatelné inkluze rozpraskaných, izometrických zrn křemene o velikosti až 5 mm. Malé množství vzorků bylo tvořeno téměř výhradně zrny křemene a samotná hmota strusky plnila spíše funkci tmelu. Distribuce jednotlivých zrn křemene uvnitř vzorku je obvykle stejně jako u porů zcela nahodilá. Póry jsou nejčastěji izometrické nebo oválné a jejich velikosti zpravidla nepřesahují 5 mm. Nebyly pozorovány zóny přednostního nabohacení. Sulfidické uzavřeniny jsou makroskopicky téměř neidentifikovatelné. Viditelné byly jen na naleštěných plochách řezu.

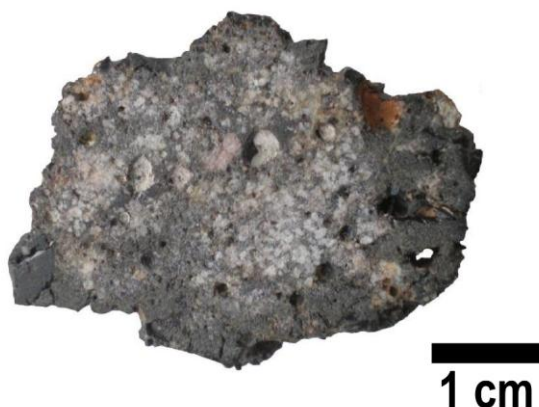
Strusky z lokality ČP jsou izometrické, nebo zploštělé a výhradně sklovité. Mezi odebranými vzorky jsou zachyceny pouze fragmenty, které jsou ostrohanné, případně s částečně zaoblenými hranami. Povrch je matný, méně pak skelně lesklý. Vzorky jsou kompaktní a poměrně houževnaté. Lom je lasturnatý. Lomné plochy jsou skelně či mastně lesklé. Barva je ze všech tří lokalit nejproměnlivější. Běžné jsou strusky černé a černošedé, výjimkou nejsou ani olivově zeleně zbarvené a tmavě modré vzorky. V rámci jednoho vzorku jsou pozorovatelné rozplývavé i ostré přechody mezi jednotlivými barvami (zelená–modrá, modrá–šedá). Prášek rozemletý na analytickou jemnost je zbarven vždy v odstínu tmavě zelené. Typické jsou, stejně jako na ostatních lokalitách, inkluze izometrických a silně rozpraskaných zrn křemene. Jejich přítomnost a distribuce je silně proměnlivá. Póry jsou hojné, oválné nebo izometrické a nepřesahují velikost 1 cm. Inkluze sulfidů jsou kapkovité, velké několik setin milimetru, raritně větší.



Obr. 8 Krystalická struska z lokality PL vlevo, barevná sklovitá struska z lokality ČP vpravo.



Obr. 9 Výrazná sulfidická inkluze vlevo, struska připomínající svým povrchem provazcovou lávu vpravo, oba vzorky z lokality PL.



Obr. 10 Inkluzemi křemene bohatý vzorek strusky z lokality ČP.

8.2 Hustota

Strusky z lokality PL dosahují nejvyšších hodnot (průměr $3,29 \text{ g/cm}^3$) a v porovnání s ostatními lokalitami jsou méně rozkolísané (tab. 1). Pohybují se v intervalu $3,05\text{--}3,56 \text{ g/cm}^3$. Malá variabilita hodnot je dána zejména absencí většího množství pórů a křemene. Na lokalitě JS se setkáme s většími odchylkami jednotlivých měření od průměru ($3,25 \text{ g/cm}^3$). Nejmenší naměřená hodnota byla $2,77 \text{ g/cm}^3$, nejvyšší $3,65 \text{ g/cm}^3$. Strusky z lokality ČP vykazují nejextrémnější hodnoty z celého souboru dat. Minimum je $1,83 \text{ g/cm}^3$, maximum $4,05 \text{ g/cm}^3$ a průměr $2,98 \text{ g/cm}^3$. Vzorek s nejmenší hustotou měl v celém svém objemu vysoký obsah pórů a podíl křemenných zrn byl tak vysoký, že v zásadě hmota strusky plnila jen funkci tmelu jednotlivých těsně uspořádaných zrn křemene. Jak je patrné, rozdíl v průměrech mezi jednotlivými lokalitami není nikterak vysoký.

Lokalita a číslo vzorku	Hustota [g/cm^3]	Lokalita a číslo vzorku	Hustota [g/cm^3]
PL1	3,53	JS6	3,46
PL2	3,36	JS7	3,44
PL3	3,05	JS8	3,26
PL4	3,21	JS9	2,99
PL5	3,47	JS10	3,56
PL6	3,43	ČP1	3,02
PL7	3,15	ČP2	3,22
PL8	3,38	ČP3	3,30
PL9	3,25	ČP4	2,86
PL10	3,06	ČP5	2,79
JS1	3,42	ČP6	3,42
JS2	2,77	ČP7	3,04
JS3	2,77	ČP8	4,05
JS4	3,65	ČP9	2,25
JS5	3,17	ČP10	1,83

Tab. 1 Pyknometricky naměřené hodnoty hustoty (každá hodnota je průměr ze dvou měření).

8.3 Magnetická susceptibilita

Magnetická susceptibilita byla měřena na stejném souboru vzorků jako hustota. Na lokalitě JS byl pozorován nejmenší rozptyl (tab. 2) mezi naměřenými hodnotami, a tudíž minimální odchylka od průměru ($0,36 \cdot 10^{-3}$ SI). Jednotlivé hodnoty se pohybovaly v rozsahu $0,17 \cdot 10^{-3}$ – $0,86 \cdot 10^{-3}$ SI. Průměrná hodnota magnetické susceptibility na lokalitě ČP je $0,68 \cdot 10^{-3}$ SI, minimum $0,13 \cdot 10^{-3}$ SI, maximum $3,31 \cdot 10^{-3}$ SI. U strusek z PL byly zjištěny nejvyšší hodnoty ze všech měření s maximem $9,53 \cdot 10^{-3}$ SI. Průměr je $2,52 \cdot 10^{-3}$ SI, minimum $0,38 \cdot 10^{-3}$ SI.

Lokalita a číslo vzorku	Susceptibilita [10^{-3} SI]	Lokalita a číslo vzorku	Susceptibilita [10^{-3} SI]
PL1	9,53	JS6	0,25
PL2	1,99	JS7	0,17
PL3	1,78	JS8	0,50
PL4	0,86	JS9	0,31
PL5	0,38	JS10	0,22
PL6	2,55	ČP1	0,74
PL7	2,60	ČP2	0,42
PL8	2,27	ČP3	0,53
PL9	1,39	ČP4	0,28
PL10	1,83	ČP5	0,40
JS1	0,27	ČP6	0,13
JS2	0,42	ČP7	3,31
JS3	0,86	ČP8	0,18
JS4	0,24	ČP9	0,62
JS5	0,37	ČP10	0,16

Tab. 2 Jednotlivá měření magnetické susceptibility.

9 Mikroskopický popis a WDX analýzy

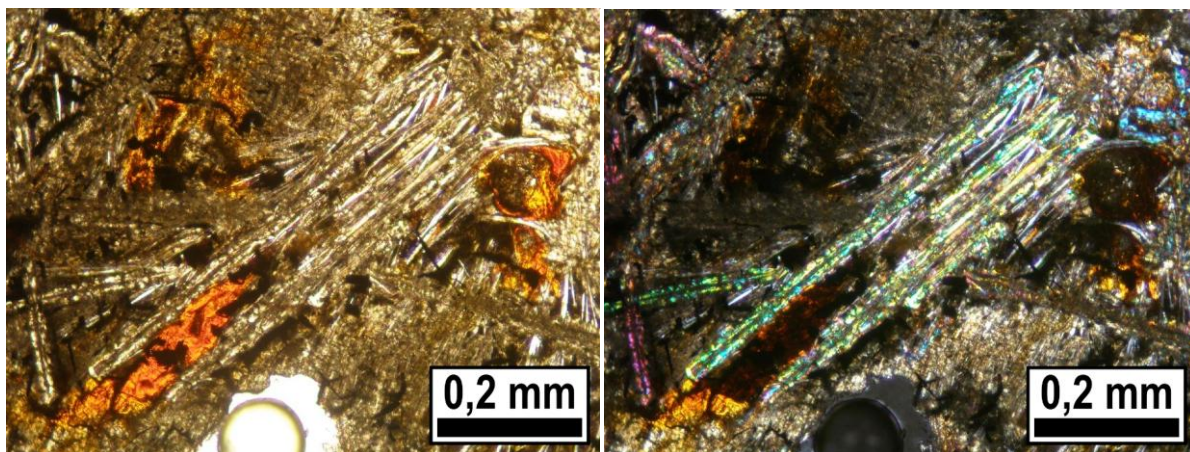
Na základě mikroskopického studia, podpořeného analýzami na mikrosondě, bylo vyčleněno několik fázových asociací:

- PL: spinelid, olivín, živec, leucit, sklo, sulfidy, křemen
olivín, živec, leucit, sklo, sulfidy, křemen
živec, sklo, sulfidy, křemen
ČP: živec, sklo, sulfidy, křemen
JS: živec, sklo, sulfidy, křemen

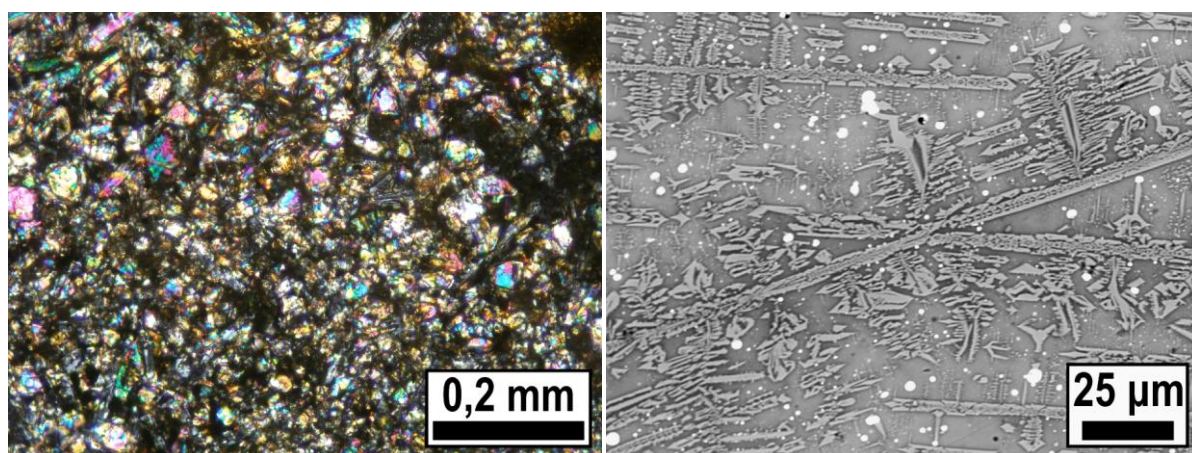
Jak je patrné, nejrozmanitější jsou vzorky z lokalit PL, kde dominují strusky bohaté novotvořenými krystalickými fázemi, mezi nimiž převažuje olivín. Strusky z lokalit JS a ČP jsou typické naprostou převahou skla s jemně rozptýlenými drobnými kapkami sulfidů. Pro velkou podobnost jsou shrnuty obě lokality do jedné kapitoly.

9.1 Plandry

Zdaleka nejpočetnější krystalickou fází ve výbrusech je olivín. I v rámci jednoho vzorku se můžeme setkat se zásadními morfologickými odlišnostmi, kdy jsou poměrně ostré přechody mezi olivíny v podobě spinifexové textury, lištami (obr. 11) a následně až izometrickými zrny (obr. 12). V PPL jsou olivíny bezbarvé, nebo zakalené. U spinifexové textury je pro malou velikost krystalů interferenční barva jen stěží identifikovatelná. V chemismu olivínů (tab. 3) dominuje typicky fayalitová složka (49,78–53,50 hmot. % FeO odpovídající 66,2–72,6 mol. % Fa). Významně je zastoupen i forsteritový koncový člen (12,9–21,7 mol. % Fo). Zajímavá je i přítomnost až 5,00 hmot. % MnO (6,5 mol. % tefroitu). Nízké jsou obsahy CaO (0,45–1,09 hmot. %). Charakteristické jsou zvýšené obsahy ZnO, které dosahují až 6,00 hmot. %. Olivíny fixují jen nepatrné množství Ba (maximum 0,23 hmot. % BaO).



Obr. 11 Lištovité olivíny ve skle, vlevo PPL, vpravo XPL. Vzorek PL1.

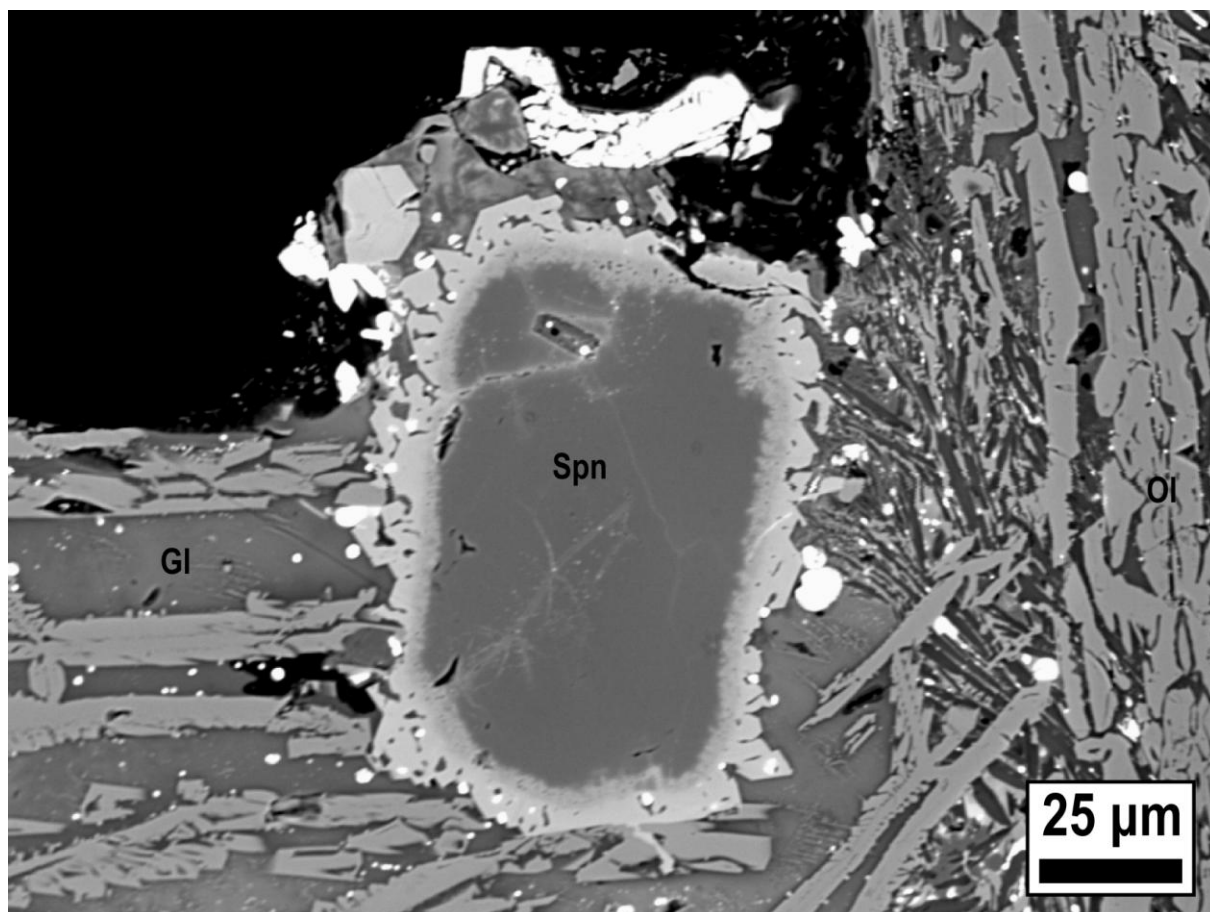


Obr. 12 Izometrické olivíny v XPL vlevo (vzorek PL1), vpravo kostrovité lišty olivínů uložené ve skle, obraz v BSE (vzorek PL2).

Vzorek	PL1	PL1	PL2	PL2		PL1	PL1	PL2	PL2
P₂O₅	0,00	0,07			P	0,000	0,002		
SiO₂	31,64	31,56	33,05	31,92	Si	1,001	1,023	1,027	0,983
TiO₂	0,03	0,06	0,11	0,05	Ti	0,001	0,001	0,003	0,001
Al₂O₃	0,04	0,33	1,04	0,21	Al	0,001	0,013	0,038	0,008
Cr₂O₃			0,02	0,02	Ba			0,003	0,002
V₂O₃			0,03	0,02	Ca	0,015	0,023	0,036	0,016
BaO			0,23	0,15	Fe	1,317	1,393	1,329	1,379
CaO	0,45	0,68	1,09	0,48	Mg	0,432	0,257	0,241	0,365
FeO	49,78	51,40	51,16	53,50	Mn	0,093	0,094	0,122	0,130
MgO	9,15	5,32	5,20	7,95	Zn	0,134	0,152	0,133	0,116
MnO	3,45	3,43	4,62	5,00	K	0,002	0,012	0,020	0,006
ZnO	5,72	6,37	5,80	5,09	Na	0,010	0,013	0,017	0,015
K₂O	0,04	0,24	0,49	0,16	Cl	0,001	0,000	0,001	0,001
Na₂O	0,16	0,21	0,29	0,26					
Cl	0,01	0,01	0,03	0,02					
Suma	100,47	99,68	103,14	104,81	suma	3,00	2,99	2,97	3,02

Tab. 3 WDX analýzy olivínů (hmot. %) z lokality PL, empirické vzorce jsou přepočteny na bázi 4 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku.

Pomocí mikrosondy byl identifikován i spinelid (obr. 13). U něj se projevovala výrazná zonálnost. Jeho tvar je přibližně izometrický, jádro je lemováno po celém obvodu nepravidelným nárůstem. Z pohledu chemismu (tab. 4) je střed spinelidu tvořen převážně chróm-spinelem (49 mol. % spinel, 42 mol. % chromit). Z dalších koncových členů je zastoupen: 3 mol. % hercynit, 3 mol. % magnetit, 1 mol. % ulvöspinel a 1 mol. % galaxit. V lemu je dominantní složkou magnetit (63 mol. %). Z dalších členů je zastoupen: 14 mol. % ulvöspinel, 15 mol. % franklinit, 5 mol. % gahnit, 3 mol. % galaxit a 2 mol. % spinel.

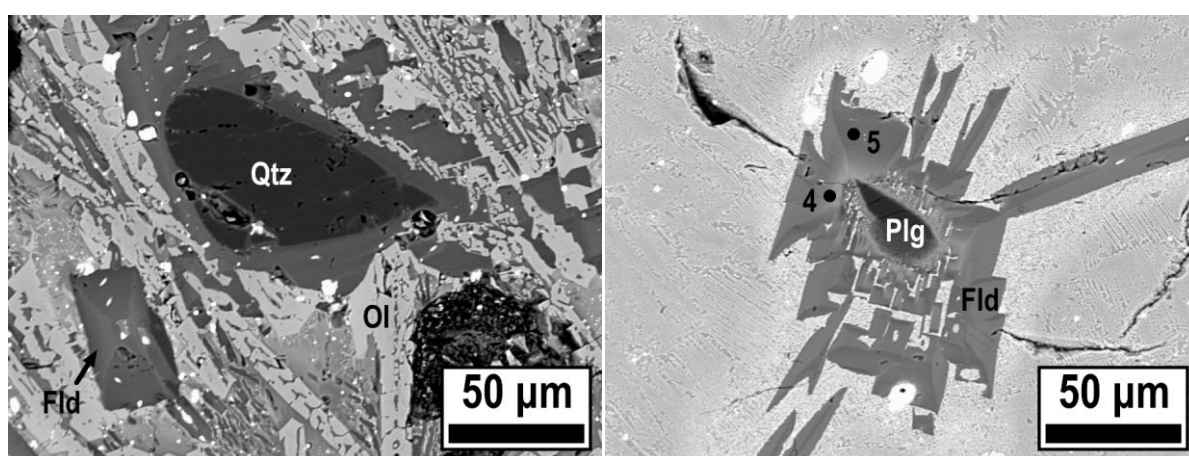


Obr. 13 BSE snímek spinelidu (vzorek PL1). Spn – spinelid, Ol – olivín, Gl – sklo, bílé jsou sulfidické inkluze.

Vzorek	PL1			PL1	
	střed	okraj		střed	okraj
SiO ₂	0,02	0,49	Si	0,000	0,020
TiO ₂	0,35	4,48	Ti	0,008	0,136
Al ₂ O ₃	29,93	4,26	Al	1,069	0,203
Cr ₂ O ₃	34,98	0,31	Cr	0,838	0,010
V ₂ O ₃	0,61	0,21	V	0,015	0,007
CaO	0,02	0,10	Fe ³⁺	0,062	1,467
FeO	22,46	75,04	Ca	0,001	0,004
MgO	10,88	0,31	Fe ²⁺	0,500	0,910
MnO	0,26	0,79	Mg	0,491	0,019
NiO	0,20	0,02	Mn	0,007	0,027
ZnO	0,21	6,55	Ni	0,005	0,000
			Zn	0,005	0,196
Suma	99,91	92,55	suma	3,000	3,000

Tab. 4 WDX analýzy spinelidů (hmot. %) z lokality PL, empirický vzorec přepočten na bázi 4 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku. Dvojmocné a trojmocné Fe bylo rozpočítáno na sumu 3 kationtů.

Morfologie živců je ve výbruse proměnlivá. Zastiženy byly živce ve formě okrouhlých zrn, ale i dlouhých lišt. V některém případě mají podobu tlustých tabulek. Identifikovány byly i poměrně komplikované srostlice. V PPL jsou bezbarvé. Typická je zonálnost, která je nejlépe zachycena na fotografiích z BSE. Živec zachycený na obr. 14 má tmavé jádro tvořené plagioklasem, který nebyl podrobněji analyzován. Rozdíl mezi světlejšími a tmavšími zónami živce (tab. 5) je především v obohacení světlých partií na BaO (8,40 hmot. %), FeO (1,04 hmot. %), CaO (1,75 hmot. %), SrO (0,25 hmot. %) a ZnO (0,47 hmot. %). Obsahy BaO jsou u všech vzorků zvýšené (5,64–9,18 hmot. %) a odpovídají 11,9–16,3 mol. % celsianové složky. Z dalších koncových členů je podstatně zastoupení 62,5–76,6 mol. % ortoklasu, 0,4–9,3 mol. % anortitu a 6,8–11,3 mol. % albitu. Zajímavé jsou obsahy Fe (až 5,02 hmot. %).



Obr. 14 Živec s přesýpátkovou strukturou vlevo (vzorek PL1) a složitá srostlice živce narůstající na plagioklas vpravo (vzorek PL2). Fld – živec, Plg – plagioklas, Ol – olivín, Qtz – křemen, bílé jsou sulfidické inkluze. Uvedená čísla odpovídají bodům v tab. 5.

Vzorek Bod	PL1 1	PL1 2	PL2 3	PL2 4	PL2 5
P ₂ O ₅			0,11	0,02	0,01
SiO ₂	58,38	55,02	56,12	56,44	59,59
TiO ₂	0,10	0,14			
Al ₂ O ₃	19,67	21,13	18,07	20,66	19,51
Cr ₂ O ₃	0,02	0,01			
V ₂ O ₃	0,00	0,02			
BaO	7,80	8,40	7,55	9,18	7,29
CaO	0,21	1,75	0,42	0,76	0,09
FeO	0,86	1,04	5,02	0,66	0,64
MgO	0,02	0,00			
MnO	0,00	0,05			
SrO	0,13	0,25	0,00	0,05	0,00
ZnO	0,37	0,47			
K ₂ O	11,45	9,89	11,04	11,03	12,44
Na ₂ O	1,00	1,17	0,79	0,82	0,73
Cl	0,01	0,00			

F	0,01	0,00			
Suma	100,03	99,35	99,11	99,62	100,30
P			0,005	0,001	0,001
Si	2,841	2,722	2,809	2,782	2,875
Ti	0,004	0,005			
Al	1,128	1,233	1,066	1,201	1,109
Ba	0,149	0,163	0,148	0,177	0,138
Ca	0,011	0,093	0,022	0,040	0,004
Fe	0,035	0,043	0,210	0,027	0,026
Mg	0,002	0,000			
Mn	0,000	0,002			
Sr	0,004	0,007	0,000	0,001	0,000
Zn	0,013	0,017			
K	0,711	0,625	0,705	0,694	0,766
Na	0,095	0,113	0,077	0,079	0,068
Suma	4,992	5,023	5,042	5,002	4,987

Tab. 5 Jednotlivé WDX analýzy (hmot. %) živců z lokality PL přepočteny na bázi 8 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku.

Leucit byl nalezen až při studiu na mikrosondě (tab. 6). Má podobu přibližně izometrických automorfně omezených zrn. Obsahuje jen nepatrné množství příměsí zastoupených Ba (0,80 hmot. % BaO), Fe (0,76 hmot. % FeO), Zn (0,08 hmot. % ZnO) a Mn (0,04 hmot. % MnO).

Vzorek	PL1		PL1
SiO₂	57,07	Si	2,047
TiO₂	0,01	Al	0,936
Al₂O₃	22,15	V	0,001
V₂O₃	0,02	Ba	0,011
BaO	0,80	Fe	0,023
FeO	0,76	Mg	0,001
MgO	0,01	Mn	0,001
MnO	0,04	Zn	0,002
ZnO	0,08	K	0,881
K₂O	19,26	Na	0,025
Na₂O	0,36		
Cl	0,01		
F	0,09		
Suma	100,65	Suma	3,938

Tab. 6 WDX analýza leucitu (hmot. %) z lokality PL. Přepočet proveden na sumu 6 aniontů (O+Cl+F).

Barva skla je ve výbruse v PPL žlutozelená, hnědá až červenohnědá, někdy je skoro až opakní. Běžná je proměnlivost barvy i v rámci jednoho vzorku. Sklo může tvořit méně než 10%, ale i více jak 90 % objemu strusek. V XPL se někdy projevuje devitrifikace, projevující se částečnou

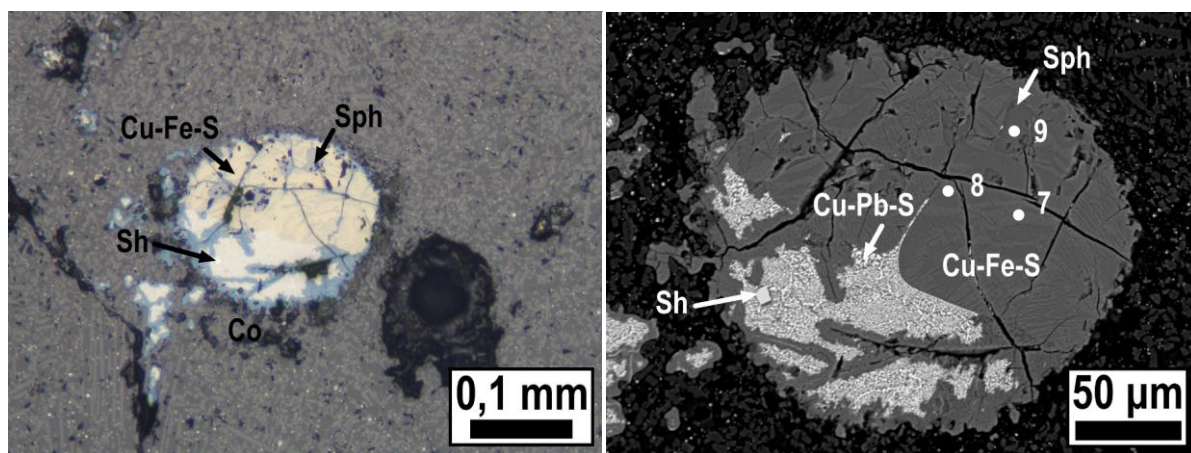
anizotropií. U sklovitých strusek je viditelná fluidální mikrotextura. Po stránce chemismu je typická heterogenita, která je dobře patrná zejména ze snímků z BSE (obr. 12). Výrazněji se projevuje v bezprostředním okolí krystalických fází (možné ochuzení skla o Fe díky krystalizaci olivínů). Více jak 90 % hmoty skla reprezentuje suma SiO_2 (45,84–48,67 hmot. %), FeO (14,11–27,43 hmot. %), Al_2O_3 (7,35–11,97 hmot. %), CaO (4,20–8,88 hmot. %), ZnO (2,09–6,55 hmot. %), PbO (1,92–9,72 hmot. %) a K_2O (2,71–4,01 hmot. %). Nejrozkolísanější jsou především obsahy FeO, CaO a PbO (tab. 7). Naopak relativně stálé jsou obsahy Al_2O_3 , K_2O a SiO_2 . Obsahy síry kolísají mezi 0,44–3,17 hmot. % SO_2). Nízké obsahy vykazuje BaO (0,45–3,73 hmot. %), MnO (0,71–2,47 hmot. %) a MgO (0,26–1,19 hmot. %). Typické je zastoupení těžkých kovů (1,92–9,27 hmot. % Pb a 2,09–6,55 hmot. % Zn). Nízká suma u analýz ze vzorku PL1 je nejspíše ovlivněna tím, že nebylo analyzováno Ba.

Vzorek	PL1	PL1	PL1	PL2	PL2	PL3	PL3
P_2O_5	0,78	0,74	0,72	0,78	0,99	0,57	0,96
SiO_2	47,49	47,88	44,37	45,84	46,09	43,09	48,67
TiO_2	0,57	0,81	0,58	0,57	0,87	0,26	0,61
SO_2	0,68	0,44	0,67	0,66	0,92	3,17	0,50
Al_2O_3	11,94	11,97	11,96	9,88	10,14	7,35	9,47
V_2O_3				0,01	0,01	0,01	0,02
BaO				2,82	3,73	0,26	0,45
CaO	7,68	6,97	8,88	4,20	8,28	2,96	6,55
CuO	0,03	0,00	0,00				
FeO	14,20	14,11	14,76	22,34	15,72	27,43	20,64
MgO	0,26	0,22	0,14	1,19	0,28	1,20	0,38
MnO	0,71	0,83	0,98	2,02	1,40	2,47	1,93
PbO	2,62	1,92	3,29	3,14	4,62	9,72	5,69
ZnO	5,41	5,07	6,55	4,73	6,02	2,09	2,67
Ag_2O	0,01	0,00	0,00				
K_2O	4,01	3,99	2,81	3,60	2,71	3,29	3,28
Na_2O	0,87	0,90	1,08	1,06	0,94	0,94	0,92
Cl	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
F				0,00	0,03	0,05	0,09
Suma	97,27	95,84	96,80	102,86	102,74	104,88	102,82

Tab. 7 WDX analýzy skla (hmot. %) z lokality PL.

Sulfidy tvoří přednostně kapky s komplexním fázovým složením (obr. 15). Neobvyklé nejsou ani zcela nepravidelné útvary. Mezi jednotlivými fázemi dominuje pyrhotin a sfalerit. Pyrhotin tvoří okrouhlá zrna, zbarvená v odraženém světle světle žlutě s nádechem do hnědé. Obsahuje jen nepatrné množství příměsí (tab. 8), a to zejména Cu (0,46–1,62 hmot. %), Pb (0,05–0,09 hmot. %) a Zn (až 0,17 hmot. %). Sfalerit je svou morfologií podobný pyrhotinu. Izomorfní zastupování Zn a Fe (tab. 9) vede k přechodu sfaleritu (53,06 hmot. % Zn, 11,12 hmot. % Fe) do rudashevskyitu (až 36,23 hmot. % Fe a až 25,53 hmot. % Zn). Barva je v odraženém světle u obou jmenovaných fází

šedá. Z dalších prvků obsahuje sfalerit, stejně jako rudashevskyt, především Cu (1,55 hmot. % sfalerit, a 0,97–1,88 hmot. % rudashevskyt). Pyrrhotin je společně se sfaleritem a dalšími fázemi uložen v Cu-Fe-S fázi proměnlivé stechiometrie. V odraženém světle má pleťovou barvu. Cu-Fe-S fáze tvoří i drobné lišty, v odraženém světle pleťové barvy s nádechem do šedé. Odlišnost mezi lištami a matrix je v zastoupení Cu, Fe, Zn a Pb. Lišty jsou obohaceny Cu (60,91 hmot. %) a ochuzeny Fe (11,15 hmot. %). Cu-Fe-S fáze je mezi sulfidy jediným nositelem Ag (až 0,30 hmot. %). Identifikované bylo i izometrické zrno stechiometricky odpovídající shanditu s následujícím chemismem: 62,73 hmot. % Pb, 25,69 hmot. % Ni, 9,99 hmot. % S a 1,86 hmot. % Cu. V odraženém světle je bílý s nádechem do žluté. Pro malé rozměry nebylo možné analyzovat drobné červíkovité agregáty Cu-Pb-S fáze uložené v matrixi Cu-Fe-S fáze. Okraj sulfidických inkluzí je běžně tvořen tenkým lemem. Ten je v odraženém světle tmavě modře zbarvený, složením nejspíš odpovídajícím chalkozínu. Některé sulfidické kapky obsahují i inkluze oxidu olova (94,35 hmot. % Pb) s jen nepatrnou příměsí Cu, Fe, As a Sb.



Obr. 15 Sulfidická inkluze (vzorek PL1), vlevo v odraženém světle, vpravo v BSE. Sh – shandit, Sph – sfalerit, Co – covellin. Uvedená čísla náleží analýzám v tab. 8. Označení Sh odpovídá bodu 6.

Fáze	shandit	Cu-Fe-S		sfalerit
		matrix	lišta	
Bod	6	7	8	9
Ag	0,00	0,29	0,30	
Pb	62,73	0,16	0,05	
Sn	0,06	0,00	0,00	
Cd	0,00	0,01	0,00	0,01
Cu	1,86	55,27	60,91	1,55
Fe	0,48	14,15	11,15	11,12
Zn	0,05	0,32	0,13	53,06
Ni	25,69	0,00	0,00	0,01
Co	0,02	0,01	0,00	0,02
Mn	0,00	0,01	0,00	0,20
Se	0,00	0,04	0,00	

S	9,99	30,30	28,35	34,25
Cl	0,00	0,01	0,00	
Sb	0,00	0,03	0,03	
As				0,08
Suma	100,89	100,61	100,92	100,30
Pb	1,943			
Cu	0,188			0,023
Fe	0,055			0,186
Zn	0,005			0,760
Ni	2,808			
Suma	4,998			0,969

Tab. 8 WDX analýzy sulfidů (hmot. %) vzorku PL1. Shandit je přepočten na bázi 2 a sfalerit 1 atom síry na vzorcovou jednotku.

Vzorek Fáze	PL2 Pb oxid	PL2 rud	PL2 Cu-Fe-S	PL2 pyrhotin	PL3 Cu-Fe-S	PL3 rud	PL3 pyrhotin
Ag		0,00	0,00	0,01	0,07	0,00	0,03
Pb	94,35	0,00	0,05	0,09	1,32	0,00	0,06
Cu	0,17	1,88	59,58	1,62	46,43	0,97	0,86
Fe	0,10	35,38	13,50	60,49	14,72	36,23	60,66
Zn	0,01	25,53	0,10	0,17	0,04	25,51	0,01
S		35,09	26,74	32,34	37,61	35,06	36,60
Se	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00
Sb	0,05	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
As	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
Suma	94,81	98,03	103,51	94,92	102,98	97,84	98,25
Pb		0,000		0,000		0,000	0,000
Cu		0,027		0,025		0,014	0,012
Fe		0,579		1,074		0,593	0,951
Zn		0,357		0,003		0,357	0,000
Suma		0,963		1,102		0,964	0,964

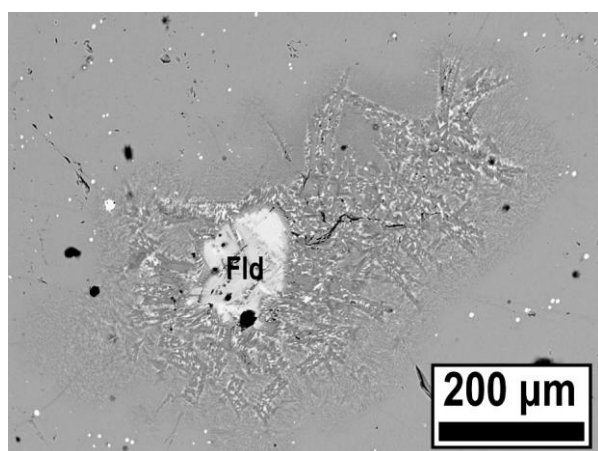
Tab. 9 WDX analýzy sulfidů a oxidu Pb (hmot. %) z lokality PL. Pyrhotin a rudashevskyt je přepočten na bázi 1 atomu síry na vzorcovou jednotku. Rud – rudashevskyt.

Křemen je ve výbruse přítomen hojně. Má podobu izometrických silně rozpraskaných zrn, obvykle s korodovaným okrajem.

9.2 Jihlava - splav, Červený potok

Vedle skla představují živce jediné novotvořené silikátové fáze. Ve výbruse mají poměrně jednoduchou morfologii a tvoří izometrická zrna. V PPL jsou bezbarvé. Okolo zrn je často viditelná intenzivní devitifikace. Stejně jako u lokality PL i zde se projevuje typická zonálnost, patrná na snímcích z BSE (obr. 16). Vysoké obsahy Ba (23,01–31,29 hmot. %) odpovídají 48,4–70,1 mol. %

celsiánové komponenty (tab. 10). Dalšími koncovými členy jsou 21,1–31,6 mol. % ortoklas, 3,1–7,1 mol. % albit a 1,8–7,7 mol. % anortit. Mezi příměsemi dominuje FeO (0,26–0,84 hmot. %) a SrO (0,20–0,24 hmot. %).

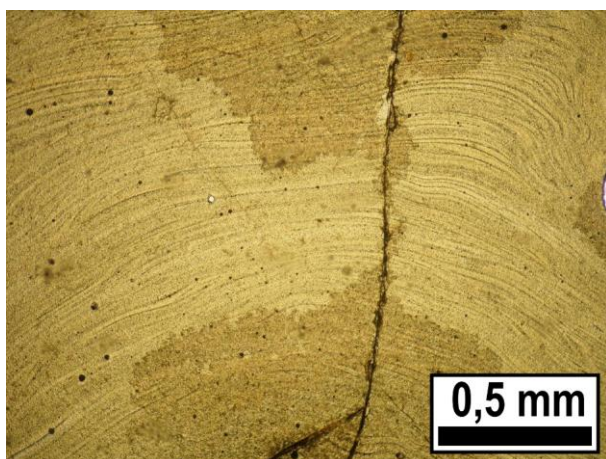


Obr. 16 Okrouhlé, zonální zrna živce s patrnou devitrifikací skla v jeho okolí (vzorek JS2). Snímek v BSE.

Vzorek	JS2	ČP3		JS2	ČP3
P ₂ O ₅	0,03	0,05	P	0,001	0,002
SiO ₂	45,12	39,65	Si	2,420	2,266
Al ₂ O ₃	24,85	25,75	Al	1,571	1,735
BaO	23,01	31,29	Ba	0,484	0,701
CaO	1,35	0,29	Ca	0,077	0,018
FeO	0,84	0,26	Fe	0,038	0,012
SrO	0,24	0,20	Sr	0,007	0,007
K ₂ O	4,61	2,90	K	0,316	0,211
Na ₂ O	0,69	0,28	Na	0,071	0,031
Suma	100,73	100,66	suma	4,986	4,983

Tab. 10 WDX analýzy živců (hmot. %) přepočteny na bázi 8 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku.

Sklo je v PPL zbarveno do různých odstínů žlutozelené. Sklo, které formuje tenké lemy okolo křemenných inkluzí, je bezbarvé. Často je pozorovatelná fluidální mikrot textura. V XPL se nízkým dvojlomem (částečná anizotropie) projevuje probíhající devitrifikace. Zajímavé jsou ostře ohraničené a intenzivněji devitrifikované domény (tmavší zóny na obr. 17). Z objemového zastoupení představuje sklo dominantní fázi. Více jak 90% hmoty skla (tab. 11) tvoří šestice oxidů SiO₂, BaO, FeO, Al₂O₃, CaO a K₂O. Nejproměnlivější jsou obsahy BaO (6,69–23,32 hmot. %), FeO (7,72–24,19 hmot. %) a CaO (4,94–10,82 hmot. %). Naopak nejstabilnější jsou obsahy Al₂O₃ (5,74–7,05 hmot. %) a K₂O (1,78–2,39 hmot. %). Relativně málo variabilní je i SiO₂ (43,72–50,24 hmot. %). Jen nepatrně je zvýšen obsah MgO (1,09–1,78 hmot. %) a těžkých kovů zastoupených ZnO (maximum 2,49 hmot. %) a PbO (až 0,70 hmot. %).



Obr. 17 Fluidální mikrotextura skla, snímek v PPL (vzorek JS5). Opakní jsou sulfidické kapky.

Vzorek	JS1	JS2	JS3	JS4	ČP1	ČP2	ČP3	ČP4
SiO ₂	43,72	50,24	46,23	43,98	48,77	48,75	48,31	44,24
TiO ₂	0,73	0,41	0,69	0,78	0,34	0,44	0,53	0,66
Al ₂ O ₃	5,74	6,26	6,07	6,16	6,06	6,77	7,05	6,08
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
V ₂ O ₃	0,06	0,01	0,05	0,00	0,07	0,07	0,01	0,04
BaO	23,32	6,69	17,05	18,47	8,97	7,66	10,41	18,75
CaO	10,82	4,94	8,18	10,22	7,00	5,44	6,75	9,94
FeO	7,72	24,19	13,46	11,11	21,73	21,25	17,89	10,70
MgO	1,46	1,78	1,27	1,24	1,09	1,20	1,33	1,26
MnO	0,24	0,35	0,34	0,33	0,89	1,29	0,41	0,29
NiO	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01
PbO	0,13	0,31	0,07	0,20	0,21	0,70	0,12	0,20
ZnO	1,01	1,14	1,96	1,83	1,26	2,49	2,43	1,86
K ₂ O	1,78	1,84	1,64	1,95	2,16	2,39	2,38	1,91
Na ₂ O	0,54	0,60	0,46	0,62	0,50	0,68	0,63	0,60
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Suma	97,29	98,74	97,48	96,93	99,88	99,13	98,28	96,56

Tab. 11 WDX analýzy skla (hmot. %) z lokality JS a ČP.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jsou velké sulfidické inkluze ve struskách z těchto lokalit velice vzácné. Běžné jsou jen několik μm velké. Drobné sulfidické kapky se často vyskytují na kontaktu mezi sklem a krystalickými fázemi, což je pro tyto lokality dominantně křemen (dobře viditelné na okrajích snímků 17 a, b). Předmětem WDX analýz (tab. 12, 13) byly inkluze větší než 0,5 mm. Stejně jako u lokality PL se zde opět setkáváme s komplexním fázovým složením. Tvořeny jsou dominantně okrouhlými zrny pyrhotinu. Ta jsou izolovaná, nebo formují složitější srostlice. V odraženém světle (obr. 18) má pyrhotin světle žlutou barvu, s nádechem do hnědé. Běžnou příměsí je Cu (0,84–1,62 hmot. %). Pyrhotin je v proměnlivém množství provázen sfaleritem a rudashevskyitem. Pro obě jmenované fáze je společný tvar ve formě okrouhlých,

případně méně pravidelných zrn. Jejich barva je v odraženém světle v odstínech šedi ovlivněných příměsemi a substitucí Zn na úkor Fe. Pro rudashevskyit je oproti sfaleritu charakteristický lehký nádech do hnědé. Sfalerit obsahuje 5,09 hmot. % Fe a 0,58 hmot. % Cd. V rudashevskyitu byla zjištěna příměs Cu (0,53–1,58 hmot. %). Na obr. 19 b je zachyceno přibližně 0,5 mm velké zonální zrno, kdy střed chemismem odpovídá sfaleritu (bod 13) a lem na přechodu k pyrhotinu a oxidům olova rudashevskyitu (bod 14). Zajímavé je, že i přes zásadní změnu v poměru Fe:Zn, je tato zonálnost na snímcích z BSE i v odraženém světle relativně nenápadná. Identifikováno bylo i ryzí stříbro s příměsí 5,19 hmot. % Pb a 2,46 hmot. % Cu a jen pod 0,6 hmot. % Fe, Sb a As.

V odraženém světle má bílé zbarvení a vysokou odraznost (obr. 18), někdy s lehkým nádechem do žluté. Tvoří izometrická zrna s nepravidelným okrajem. Na snímcích z BSE jsou dobře patrné i oxidy Pb (v odraženém světle černé). Ty tvoří okrouhlá zrna, případně velmi nepravidelné útvary, téměř až drobné žilky. Analyzováno bylo i drobné izometrické zrno galenitu (v odraženém světle bílé). Vedle naprosto dominantního Pb (86,27 hmot. %) se na jeho chemismu podílí i S (13,86 hmot. %), Fe (3,50 hmot. %) a Cu (0,25 hmot. %). V proměnlivém množství je zastoupena Cu-Fe-S fáze o různé stechiometrii, která opět plní funkci matrice. Má navýšené obsahy Ag (1,65–2,59 hmot. %) a Pb (až 2,42 hmot. %). Někdy prostor mezi jednotlivými homogenními většími zrny pyrhotinu, sfaleritu a rudashevskyitu vyplňují jen jejich myrmekytické srůsty.

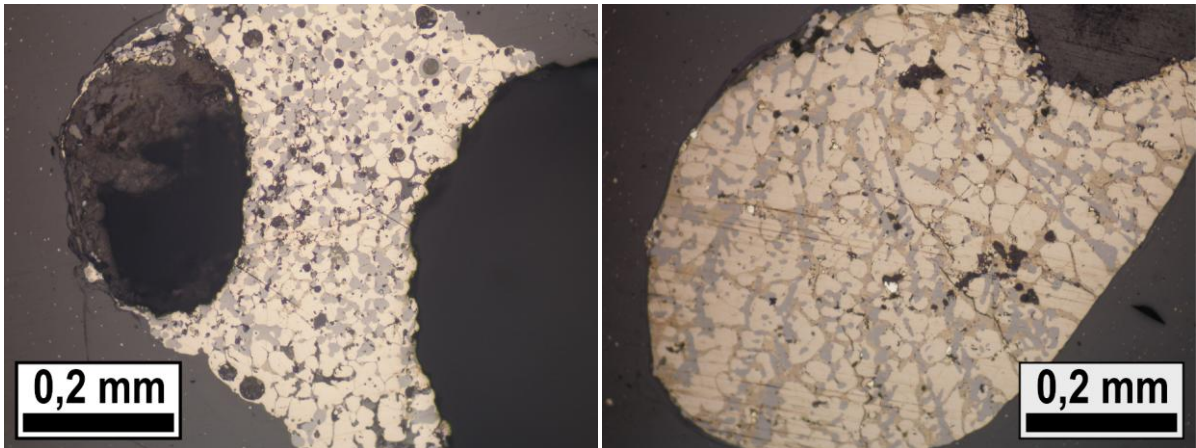
Vzorek	ČP1	ČP1	ČP11	ČP11	ČP11	ČP11
Fáze	rud	po	sph	rud	po	gn
Bod	10	11	12	13	14	15
Zn	25,14	0,07	61,28	29,77	0,06	0,05
Fe	37,54	60,39	5,09	31,64	59,40	3,50
Co	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
Cu	0,53	0,94	0,03	1,58	1,62	0,25
Ni	0,00	0,04	0,01	0,01	0,08	0,00
Mn	0,53	0,13	0,09	0,53	0,13	0,01
Ge	0,00	0,04	0,05	0,01	0,02	
Cd	0,04	0,03	0,58	0,69	0,03	
In	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
Ag	0,00	0,00	0,03	0,10	0,04	
Pb						86,27
Bi						0,10
As	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,08
S	35,03	36,72	33,56	34,89	36,60	13,86
Sb						0,05
Se	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	
Suma	98,81	98,43	100,72	99,28	98,02	104,19
Pb						0,963
Zn	0,352	0,001	0,895	0,418	0,001	0,002
Fe	0,615	0,944	0,087	0,521	0,932	0,145
Cu	0,008	0,013	0,000	0,023	0,022	0,009
Ni	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	

Mn	0,009	0,002	0,002	0,009	0,002	0,001
Cd	0,000	0,000	0,005	0,006	0,000	
Ag	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	
Bi						0,001
Suma	0,984	0,961	0,990	0,977	0,959	1,121

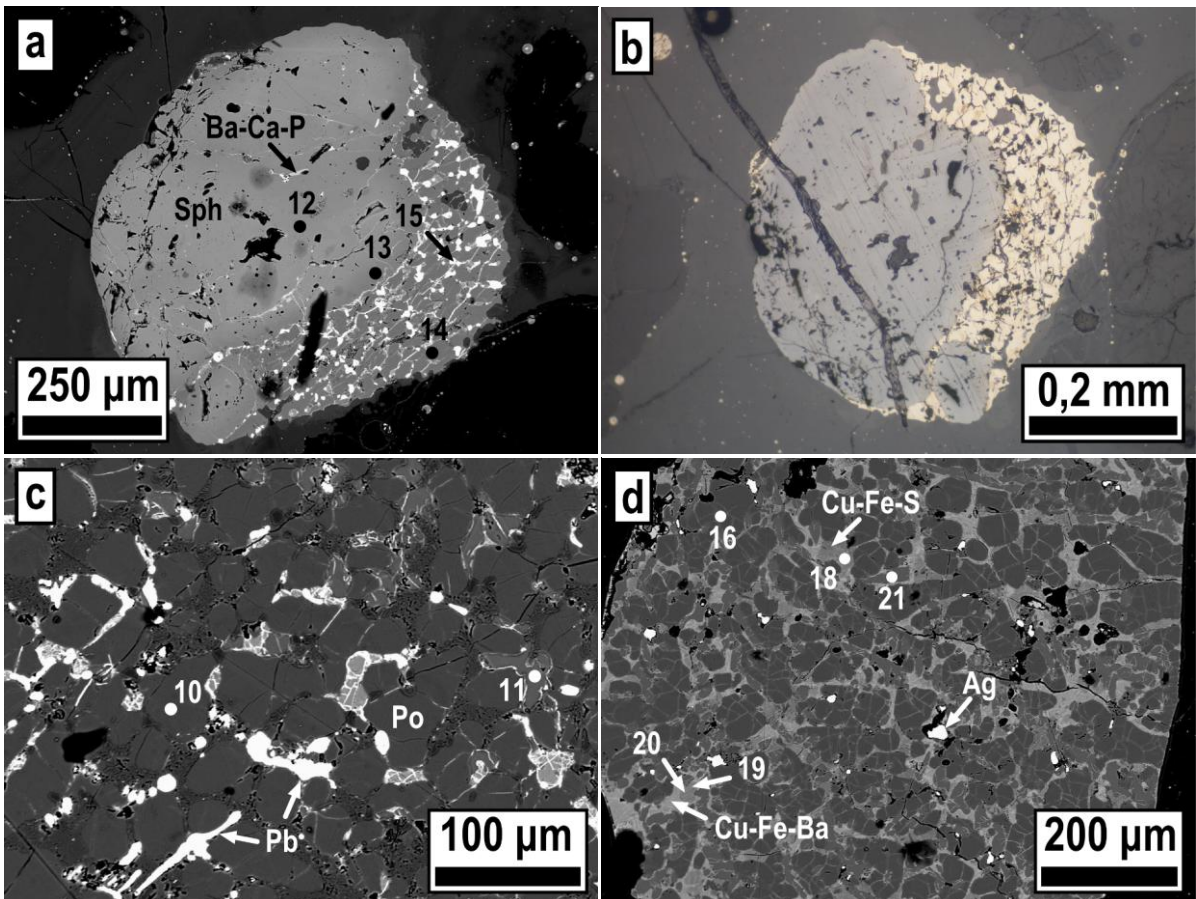
Tab. 12 WDX analýzy sulfidů (hmot. %) z lokality ČP. Rudashevskyit, sfalerit, galenit a pyrhotin přepočteny na bázi 1 atomu síry na vzorcovou jednotku. Rud – rudashevskyit, Po – pyrhotin, Sph – sfalerit, Gn – galenit.

Vzorek	JS1	JS1	JS1	JS1	JS1	JS1	JS1
Fáze	po	po	Cu-Fe-S	Cu-Fe-S	Cu-Fe-S	rud	Ag
Bod	16	17	18	19	20	21	22
Zn	0,02	0,12	0,28	0,22	0,18	28,29	0,07
Fe	60,31	59,77	16,92	11,16	15,97	33,96	0,47
Co	0,02	0,04		0,00	0,00	0,03	
Cu	0,84	0,78	46,25	60,24	53,25	0,63	2,46
Ni	0,16	0,14	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Mn	0,17	0,14	0,02	0,02	0,00	0,86	0,00
Ge	0,00					0,02	
Ag	0,04		2,57	2,59	1,65	0,04	91,82
Pb		0,03	2,42		0,04		5,19
Bi			0,00	0,10			0,01
As	0,07	0,03	0,00			0,00	0,35
S	37,02	36,92	27,29	26,36	29,25	35,04	0,04
Sb			0,04	0,02	0,07		0,51
Se	0,01			0,01	0,02	0,00	
Suma	98,66	97,97	95,80	100,74	100,43	98,87	100,92
Pb							0,028
Zn	0,000	0,002				0,396	0,001
Fe	0,935	0,929				0,556	0,009
Cu	0,011	0,011				0,009	0,041
Ni	0,002	0,002				0,000	
Mn	0,003	0,002				0,014	
Ag	0,000					0,000	0,911
As							0,005
Sb							0,005
Suma	0,951	0,946				0,975	1,000

Tab. 13 WDX analýzy sulfidů a stříbra (hmot. %) z lokality JS. Rudashevskyit a pyrhotin přepočteny na bázi 1 atomu síry na vzorcovou jednotku. Stříbro přepočteno na sumu rovnou jedné. Stříbro přepočteno na sumu rovnou jedné. Rud – rudashevskyit, Po – pyrhotin, Ag – stříbro.



Obr. 18 Sulfidické kapky v odraženém světle. Vlevo okrouhlá, světle žlutá zrna pyrotinu a šedá zrna sfaleritu, případně rudashevskyitu (vzorek JS11). Vpravo podobná situace (vzorek JS1), navíc silně odrazná bílá drobná zrna stříbra a mezerní hmota tvořená Cu-Fe-S fází pleťové barvy (vyfotografovaný objekt odpovídá obr. 19 d).



Obr. 19 Sulfidické kapky z lokality ČP a JS, vyfotografované v BSE (a – ČP11, c – ČP1, d – JS1) a odraženém světle (b – ČP11). Po – pyrotin, Ag – stříbro, Sph – sfalerit, Pb – oxid olova. Body odpovídají analýzám v tab. 12 a 13. Označení Ag odpovídá bodu 22. Označení Ba-Ca-P odpovídá analýze v tab. 14.

Uvnitř sfaleritu (obr. 19 a, b) byl identifikován Ba analog apatitu (57,02 hmot. % BaO). Ten má lištovitý tvar s automorfním omezením. Barva v odraženém světle je černošedá. Obsahuje jen nepatrné množství příměsí (tab. 14) FeO (1,01 hmot. %), Na₂O (0,15 hmot. %) a SO₂ (0,12 hmot. %).

Vzorek	JS1		JS1
P ₂ O ₅	26,20	P	3,030
SO ₂	0,12	S	0,014
SiO ₂	0,08	Si	0,010
BaO	57,02	Ba	3,052
CaO	11,56	Ca	1,691
FeO	1,01	Fe	0,116
Na ₂ O	0,15	Na	0,038
suma	96,12	suma	7,951

Tab. 14 WDX analýza Ba analogu apatitu (hmot. %) (vzorek JS1). Přepoččet proveden na bázi 12,5 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku.

Křemen tvoří opět přibližně izometrická, silně rozpraskaná zrna s korodovaným okrajem.

10 Celkový chemismus

Výsledky chemických analýz vybraných vzorků strusek jsou v tab. 15. U většiny vzorků lze označit jako dominantní složky SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , K_2O a MgO . Z pohledu všech analyzovaných strusek jsou nejrozkolísanější obsahy Fe_2O_3 (8,81–34,56 hmot. %) a SiO_2 (38,33–59,38 hmot. %). Naopak jako nejstabilnější se jeví Al_2O_3 (5,53–7,48 hmot. %), K_2O (1,80–2,87 hmot. %) a Na_2O (0,38–0,63 hmot. %). Obsahy MgO (0,79–1,81 hmot. %) jsou také poměrně stálé. Suma je ovlivněna především nezapočítáním obsahu Ba, jehož obsahy byly nad horním limitem stanovitelnosti.

Vzorek	PL1	PL2	PL3	PL5	ČP1	ČP4	ČP5	ČP10	JS1	JS5	JS8	JS9
P_2O_5	0,37	0,58	0,58	0,67	0,39	0,39	0,35	0,34	0,37	0,36	0,43	0,32
SiO_2	38,33	42,70	49,19	41,55	56,97	49,63	56,85	57,94	44,05	43,48	49,33	59,38
TiO_2	0,45	0,44	0,40	1,00	0,24	0,65	0,31	0,55	0,48	0,67	0,35	0,39
Al_2O_3	7,35	7,46	7,48	5,91	5,53	6,25	5,91	6,06	5,61	6,18	6,25	6,06
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{tot}}$	34,56	28,54	29,90	9,78	18,53	12,51	21,65	10,00	8,81	11,17	22,20	12,13
Cr_2O_3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
CaO	3,73	3,92	2,60	7,68	4,77	7,16	4,57	9,55	10,17	9,84	9,73	5,71
MgO	1,81	1,62	0,84	1,49	0,79	1,24	0,98	1,30	1,40	1,68	1,03	0,97
MnO	1,77	2,48	1,97	0,34	0,63	0,32	0,57	0,31	0,28	0,33	0,24	0,27
PbO^*	2,81	4,15	5,78	1,08	0,23	0,72	0,15	0,10	0,25	0,35	0,06	0,20
ZnO^*	6,64	5,76	0,64	1,24	0,72	0,95	0,26	0,23	0,93	1,67	0,28	1,17
Na_2O	0,49	0,63	0,51	0,52	0,38	0,59	0,44	0,48	0,42	0,50	0,46	0,44
K_2O	2,60	2,78	2,87	2,26	2,22	2,08	2,33	2,03	1,80	1,97	2,11	1,97
TOT/C	0,03	0,04	0,05	<0,02	0,55	0,03	0,09	0,17	0,02	0,02	<0,02	0,03
TOT/S	0,66	0,94	0,68	0,31	0,80	0,45	0,61	0,34	0,53	0,52	0,55	0,65
LOI	-2,80	-3,10	-3,30	-1,20	-0,30	-1,30	-1,60	-0,70	-1,10	-1,70	-2,30	-0,90
Suma	98,81	98,95	100,20	72,64	92,46	81,67	93,48	88,71	74,03	77,05	90,72	88,79

Tab. 15 Celkový chemismus strusek z lokalit JS, ČP a PL. TOT/C – celkový uhlík, TOT/S – celková síra, LOI – ztráta žíháním, TOT/C a TOT/S zahrnutý v sumě prostřednictvím LOI. Obsahy PbO^* a ZnO^* přepočteny na oxidy z obsahů Pb a Zn uvedených v tab. 16.

10.1 Plandry

Vzorky z lokality PL mají v průměru nejvyšší obsahy Fe_2O_3 (25,70 hmot. %) a zároveň nejnižší CaO (4,48 hmot. %) a SiO_2 (42,94 hmot. %). Proti ostatním lokalitám mají zvýšené obsahy MnO (až 2,48 hmot. %). Zajímavý je zvýšený obsah S (0,98 hmot. %) u vzorku PL2 a TiO_2 (1,00 hmot. %) u vzorku PL5. Struska PL5 byla vybrána pro analýzu jako reprezentant sklovitých strusek na lokalitě, kde dominují strusky dobře krystalizované pro účely možného srovnání. Největší rozdíl mezi krystalizovanými a sklovitými struskami je v zastoupení Fe_2O_3 a CaO . Zároveň je patrné, že rozdíl mezi struskami není jen v přítomnosti nebo absenci krystalických fází (možný vliv rychlosti

chlazení), ale i samotném chemismu. Ba se podílí na složení krystalických strusek až 1,88 hmot. % (tab. 16). U sklovitých přesahuje obsah Ba mez stanovitelnosti použité analytické metody, což je 5,00 hmot. %. S přítomností Ba je spojen i zvýšený obsah Sr (až 0,45 hmot. %). Z těžkých kovů dominuje Pb (až 5,36 hmot. % Pb) a Zn (až 5,33 hmot. % Zn), v malém množství je přítomna i měď (až 0,25 hmot. %). Jen u vzorku PL3 jsou relativně zvýšené hodnoty As (269 ppm). Ag je přítomno jen v několika desítkách ppm (maximum 76,6 ppm). Stanoveno bylo i zlato, obsahy nepřesahují první desítky ppb (maximum 47,6 ppb u vzorku PL3, což je zároveň maximum ze všech provedených analýz).

10.2 Červený potok

Na lokalitě ČP jsou v průměru nejvyšší obsahy SiO_2 (55,35 hmot. %) a velmi proměnlivé obsahy Fe_2O_3 (10,00–21,65 hmot. %) a CaO (4,57–9,55 hmot. %). Vzorek ČP10 byl do souboru zařazen záměrně kvůli hojné přítomnosti uzavřenin křemene. V rámci vybraných 4 strusek je možné vidět, jak výrazně se chemismus mění v případě sklovitých strusek. Analýzy stopových prvků (tab. 16) ukazují, že zásadně se na celkovém chemismu podílí i Ba, které se u všech vzorků pohybuje nad horní mezí stanovitelnosti (>5,00 hmot. %). Stejně jako u PL je i zde Ba provázáno zvýšenými obsahy Sr (až 0,36 hmot. %). Z těžkých kovů opět dominuje Pb a Zn, nicméně jejich obsahy jsou ve srovnání s předchozí lokalitou až o řád menší. Pb dosahuje maxima 0,66 hmot. % a Zn 0,76 hmot. %. Ag je přítomno ve větším množství, než je tomu u lokality PL. U ČP10 přesahuje horní mez stanovitelnosti, která je 100 ppm. Obsahy Au nepřekračují první desítku ppb. Oproti PL jsou obsahy Cu mnohem nižší (974 ppm).

10.3 Jihlava - splav

Strusky z lokality JS jsou v průměru ze všech vzorků nejchudší na Fe_2O_3 (13,58 hmot. %) s jedinou výjimkou, kterou je vzorek JS8 s 22,20 hmot. % Fe_2O_3 . Obsahy CaO jsou naopak v průměru nejvyšší (8,86 hmot. %). Obsahy SiO_2 jsou relativně stabilní s výraznou odchylkou u vzorku JS9 (59,38 hmot. %). I zde se setkáváme se stejným trendem u Ba a Sr. Obsahy Sr jsou ze všech lokalit nejvyšší (0,51 hmot. %) a Ba je opět nad horní mezí stanovitelnosti. Zn (až 1,35 hmot. % Zn) je přítomen vždy ve větším množství než Pb (až 0,32 hmot. % Pb). Cu nepřesahuje 1859 ppm. Maximální obsah stříbra je nejvyšší ze všech vzorků (128 ppm). Obsahy Au nepřekračují 10 ppb.

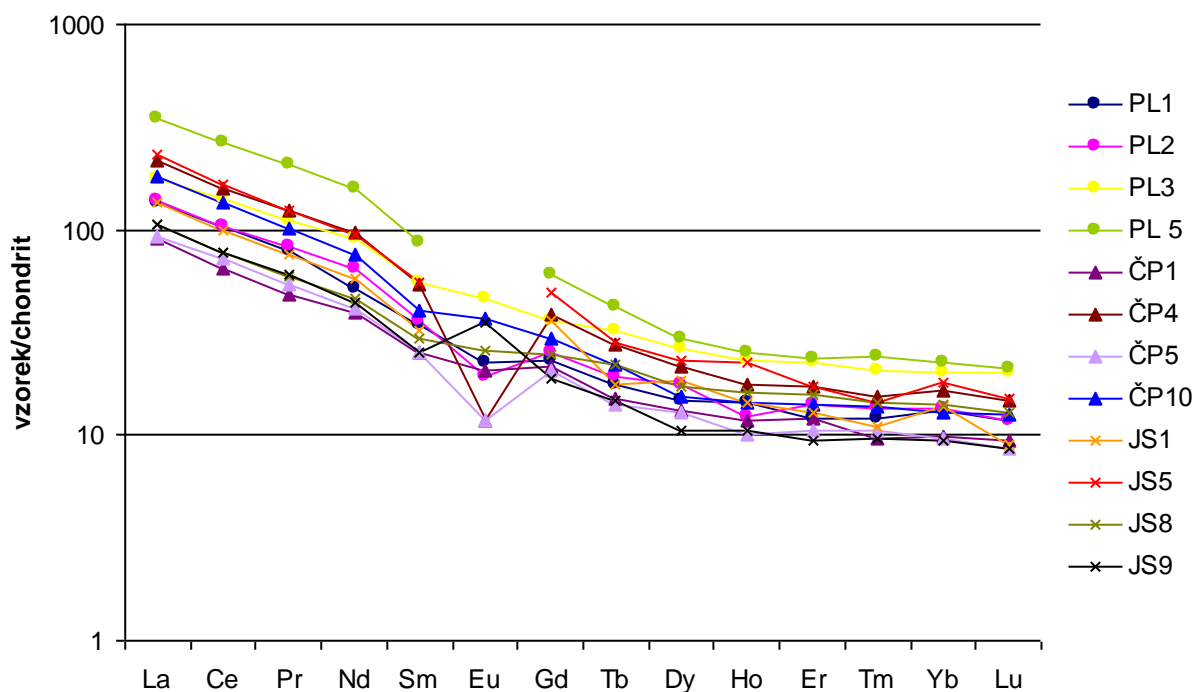
Vzorek	PL1	PL2	PL3	PL5	ČP1	ČP4
Mo	0,9	0,9	1,1	2,3	1,0	1,8
Cu	2545	1794	1409	740	763	974
Pb	26090	38515	53649	>10000	2164	6646
Zn	53363	46260	5155	>10000	5758	7615
Ni	24,8	16,9	19,9	39,4	9,4	70,3
As	10,0	35,1	269	39,5	17,7	9,3
Cd	1,9	2,1	0,4	0,2	4,0	3,2
Sb	25,8	40,6	37,0	37,6	14,9	28,2
Bi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ag	47,0	24,6	76,6	10,8	51,0	83,7
Au	16,5	7,8	47,6	1,9	4,3	2,1
Hg	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Tl	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,6	<0,1
Se	1,1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Co	53,2	38,2	35,7	60	35,6	82,1
Ba	14839	18809	1444	>50000	>50000	>50000
Sr	422	529	174	4471	1516	3568
Ta	0,8	0,6	0,7	2,8	0,9	1,7
Th	12,0	12,2	13,3	32,2	7,0	17,9
U	3,0	8,9	9,3	8,2	3,9	4,3
V	65	79	69	81	27	60
W	40,7	41,5	75,7	290	174	523
Zr	177	189	167	323	89,5	210
Sc	6	6	6	8	4	7
Be	5	<1	7	4	5	2
Cs	2,9	3,7	5,4	2,0	4,3	2,4
Ga	16,9	17,8	10,9	8,3	8,9	8,7
Hf	5,2	4,3	4,0	9,7	2,1	5,5
Nb	7,4	6,7	7,8	16,3	4,3	10,9
Rb	84,7	113	132	73,9	97,3	70,9
Sn	6	10	14	7	5	5
Y	20,6	20,5	34,2	36,4	20,9	26,5
La	32,1	32,6	42,5	83,4	21,3	51,2
Ce	64,0	63,6	86,8	162,3	39,4	97,9
Pr	7,41	7,65	10,22	19,14	4,52	11,54
Nd	23,7	29,8	41,9	72,4	18,2	44,3
Sm	5,12	5,38	8,27	12,96	3,73	7,93
Eu	1,27	1,09	2,59	<0,02	1,17	0,67
Gd	4,62	5,05	7,23	11,97	4,33	7,64
Tb	0,64	0,70	1,17	1,52	0,55	1,00
Dy	3,63	4,31	6,55	7,27	3,23	5,32
Ho	0,79	0,68	1,26	1,39	0,64	0,96
Er	1,94	2,24	3,62	3,8	1,92	2,76
Tm	0,30	0,33	0,51	0,6	0,24	0,38
Yb	2,14	2,16	3,24	3,61	1,60	2,63
Lu	0,29	0,29	0,50	0,52	0,23	0,36
ΣREE	147,95	155,88	216,36	380,90	101,06	234,59
Ce/Ce*	1,00	0,97	1,01	0,98	0,97	0,97
Eu/Eu*	0,80	0,64	1,02		0,89	0,26

Tab. 16 Stopové prvky strusek z lokalit PL a ČP. Au uvedeno v ppb, ostatní prvky v ppm.

Vzorek	ČP5	ČP10	JS1	JS5	JS8	JS9
Mo	1,1	0,7	1,9	2,4	0,8	3,0
Cu	835	890	868	881	463	1859
Pb	1376	947	2303	3243	552	1832
Zn	2073	1827	7502	13456	2210	9420
Ni	17,7	71,2	28,7	33,9	33,7	46,3
As	6,6	5,1	5,6	6	0,7	4,9
Cd	0,7	1,6	0,8	0,7	0,3	12,4
Sb	5,9	7,1	28,7	38,5	1,8	11,1
Bi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Ag	47,3	>100	107	128	13,1	84,3
Au	8,4	2,4	0,5	<0,5	1,5	9,1
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,04
Tl	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,3	0,1
Se	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Co	74,8	103,8	32,7	46,8	69,6	137,4
Ba	>50000	>50000	>50000	>50000	>50000	>50000
Sr	1110	2216	5120	4755	1879	2285
Ta	0,9	1,3	2,2	1,7	1,0	1,3
Th	7,8	14,5	10,3	19,3	7,2	7,8
U	3,8	4,1	3,5	4,6	4,9	3,0
V	39	58	50	60	41	54
W	156	564	54	74	408	580
Zr	111	175	142	216	102	112
Sc	4	7	7	8	5	5
Be	<1	2	5	<1	<1	2
Cs	6,2	2,6	2,1	2,1	3,9	2,6
Ga	9,6	6,8	8,7	10,4	7,9	8,8
Hf	3,6	4,7	4,5	5,5	3,4	3,2
Nb	6,4	9,7	7,3	11,5	7,6	7,4
Rb	104,4	73,2	59,9	78,0	82,7	72,4
Sn	1	1	<1	<1	1	6
Y	17,7	20,2	20,7	29,4	29,1	14,9
La	21,9	43,4	32,5	55,3	25,0	25,0
Ce	44,7	82,9	61,2	103,0	47,4	47,5
Pr	5,02	9,44	6,97	11,50	5,54	5,64
Nd	19,1	34,7	26,3	43,2	21,0	20,3
Sm	3,71	6,02	4,81	8,20	4,38	3,76
Eu	0,66	2,10	<0,02	<0,02	1,44	1,99
Gd	4,12	5,87	7,15	9,88	4,94	3,79
Tb	0,51	0,8	0,64	1,01	0,79	0,53
Dy	3,20	3,83	4,50	5,64	4,25	2,58
Ho	0,55	0,79	0,78	1,23	0,89	0,57
Er	1,68	2,25	2,08	2,79	2,5	1,51
Tm	0,26	0,34	0,27	0,36	0,36	0,24
Yb	1,54	2,06	2,20	2,89	2,28	1,51
Lu	0,21	0,31	0,22	0,37	0,32	0,21
ΣREE	107,16	194,81	149,64	245,39	121,09	115,13
Ce/Ce*	1,03	0,99	0,98	0,99	0,97	0,97
Eu/Eu*	0,51	1,08			0,94	1,61

Tab. 16 (pokračování) Stopové prvky strusek z lokalit ČP a JS. Au uvedeno v ppb, ostatní v ppm.

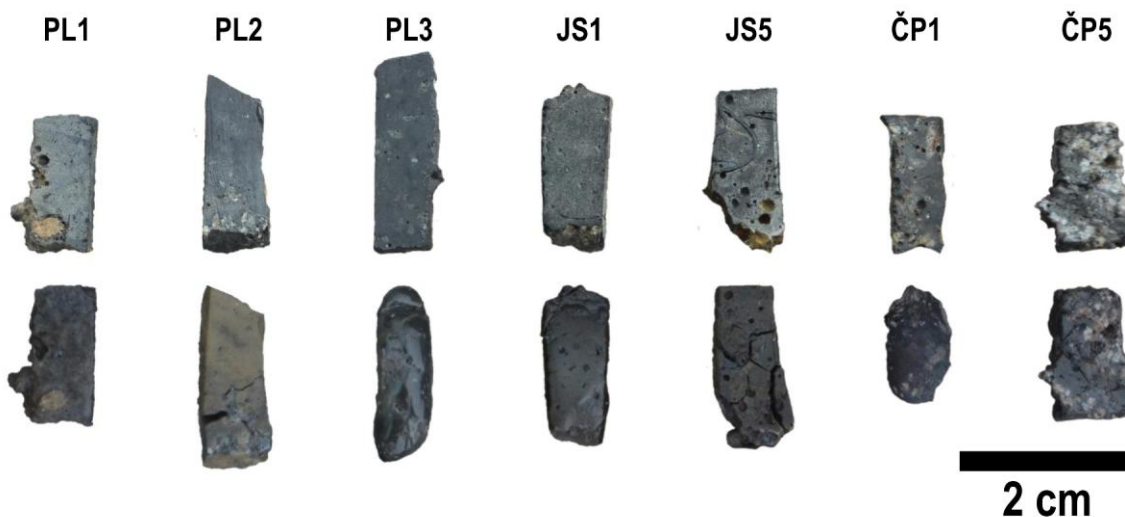
Prvky vzácných zemin byly normalizovány na C1-chondrit s využitím hodnot uvedených autory McDonough – Sun (1995). Z normalizované křivky je patrné mírné nabohacení na lehčí prvky vzácných zemin (obr. 20). U vzorku JS9 se projevuje pozitivní europiová anomálie ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,61$). U ostatních vzorků, kromě PL3 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,02$) a ČP10 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1,08$), je Eu anomálie negativní. Vzorky PL5, JS1 a JS5 mají hodnoty Eu pod mezí stanovitelnosti, nasvědčující velmi výrazné negativní Eu anomálii (pro limit stanovení $\text{Eu} = 0,02$ ppm je europiová anomálie $\text{PL5} = 0,0049$, $\text{JS1} = 0,010$ a $\text{JS5} = 0,0068$). U Ce jsou hodnoty poměru Ce/Ce^* velmi vyrovnané, mezi 0,97–1,03, proto se o Ce anomálii jako takové nedá hovořit. Byla zjištěna výrazná pozitivní korelace ($R^2 = 0,899$) mezi obsahy titanu a sumou prvků vzácných zemin.



Obr. 20 C1-chondritem normalizované obsahy prvků vzácných zemin strusek.

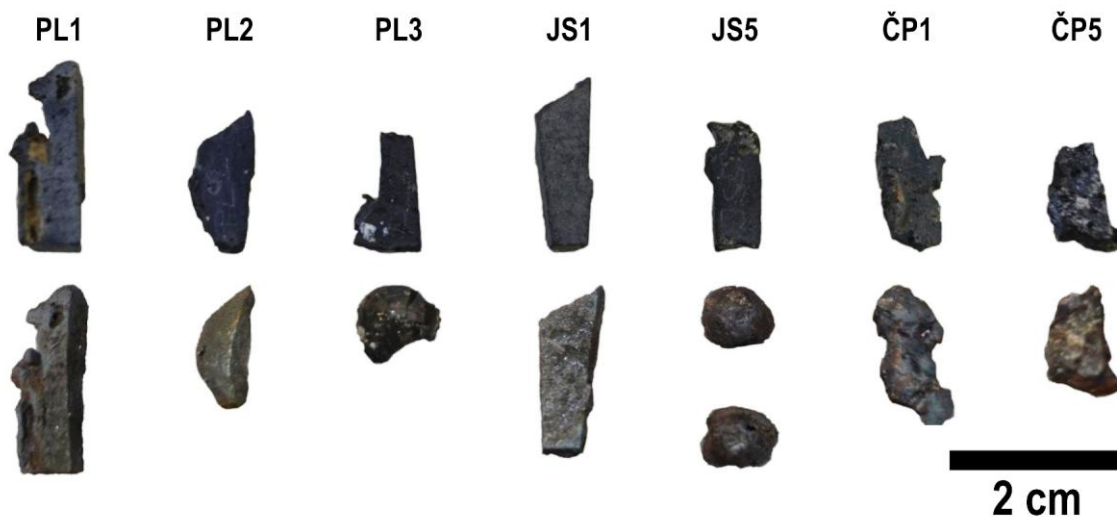
11 Tavby

Pro porovnání hodnot dynamické viskozity $\log \eta$ a indexů viskozity vypočítaných z chemismu byly provedeny celkem tři tavby odstupňované po 50 °C. První tavba byla realizována za teploty 1000 °C. Výsledkem bylo jen částečné natavení vzorků PL3, JS1 a ČP1, které bylo provázeno zaoblením okrajů a prohnutím (obr. 21). U vzorků PL2 a JS5 se vystavení této teplotě projevilo rozpraskáním, v případě vzorku JS5 i prohnutím. Vzorky PL1 a ČP5 zůstaly víceméně nedotčené.



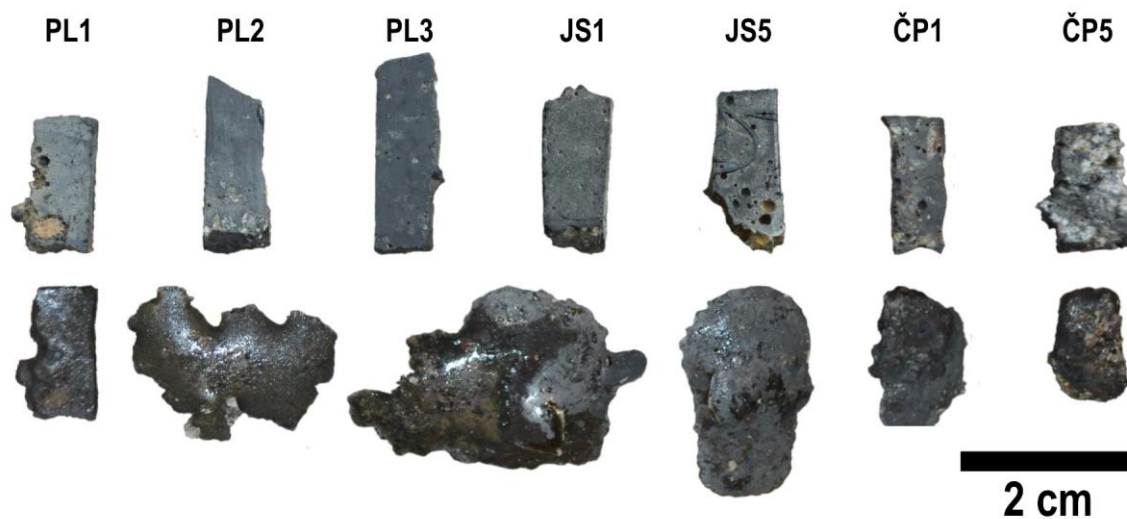
Obr. 21 Vzorky strusek před a po hodinovém ohřevu při 1000 °C.

Vystavení teplotě 1050 °C se projevilo roztavením vzorků PL3 a ČP5 a přetavením vzorku JS1 na dva díly (obr. 22). Bezprostřední okolí vzorku ČP1 bylo lehce obarveno žlutozeleně, to by mohlo být spojeno s těkáním prvku, který dává barevným struskám charakteristické zbarvení. Vzorek ČP5 měl natavené okraje, vzorek PL2 byl prohnut. Vzorky PL1 a JS1 zůstaly bez znatelných změn. Zajímavé je odlišné chování vzorku JS1, který paradoxně při zvýšení teploty zůstal naprosto intaktní



Obr. 22 Vzorky strusek před a po hodinovém ohřevu při 1050 °C.

Nejvyšší teplota, které byly studované strusky exponovány, dosáhla 1100 °C. U všech vzorků kromě PL1 a ČP5 došlo k úplnému roztavení (obr. 23). Vzorek PL1 měl pouze natavené okraje. Vzorek ČP5 měl silně otavené okraje. Je možné, že v úplném roztečení mu bránilo velké množství inkluzí křemene.



Obr. 23 Vzorky strusek před a po hodinovém ohřevu při 1100 °C.

12 Izotopové složení olova

Izotopové poměry $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ a $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ byly stanoveny v 7 vzorcích strusek a 7 vzorcích galenitů z různých míst jihlavského rudního revíru, dodaných konzultantem práce z muzejních sbírek (tab. 17).

Hodnoty $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ se u krystalických strusek z lokality PL pohybují v intervalu 1,1710–1,1768 a hodnoty poměru $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ v rozsahu 2,0892–2,0952. Průměr ze všech hodnot $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ je 1,1733 a u poměru $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dosahuje 2,0916.

Strusky z lokalit JS a ČP mají rozsah hodnot poměru $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 1,1703–1,1764 a poměr $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ kolísá v intervalu 2,0891–2,0954. U poměru $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ je průměr 1,1736 a u poměru $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 2,0923.

V případě galenitů jihlavského rudního revíru se hodnoty $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ pohybují v intervalu 1,1588–1,1652 a hodnoty $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ v intervalu 2,1000–2,1102. Průměr poměru $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ je 1,1615 a průměrná hodnota poměru $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ dosahuje hodnoty 2,1050.

Vzorek	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	RSD (%)	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	RSD (%)
strusky				
PL1	1,1721	0,3612	2,0892	0,2362
PL2	1,1710	0,2429	2,0952	0,2928
PL3	1,1768	0,3383	2,0903	0,3024
ČP1	1,1703	0,2258	2,0954	0,3379
ČP5	1,1728	0,4270	2,0912	0,2591
JS1	1,1764	0,3610	2,0891	0,3188
JS5	1,1748	0,2551	2,0934	0,2238
galenity				
Helenín	1,1600	0,4575	2,1086	0,2684
Jezdovice 37	1,1631	0,2131	2,1005	0,2397
Jezdovice 42	1,1620	0,3091	2,1000	0,2653
Kosov	1,1588	0,3777	2,1077	0,3499
Pfaffendorf	1,1652	0,3562	2,1023	0,3720
Popice	1,1619	0,3031	2,1053	0,2395
Rančířov	1,1593	0,3834	2,1102	0,4232

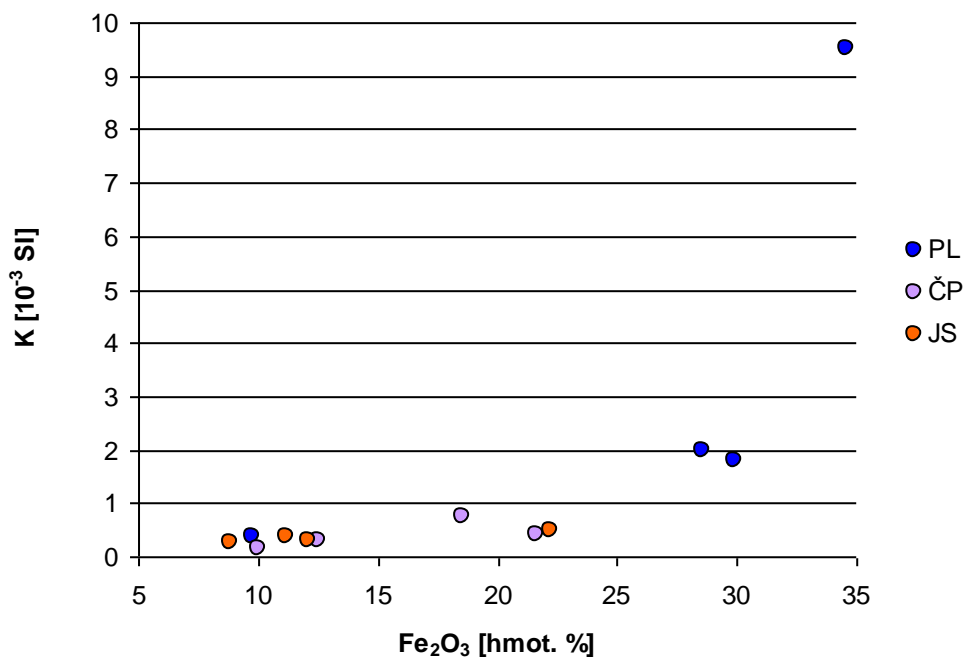
Tab. 17 Izotopické složení olova studovaných strusek a galenitů rud jihlavského rudního revíru.

13 Diskuze

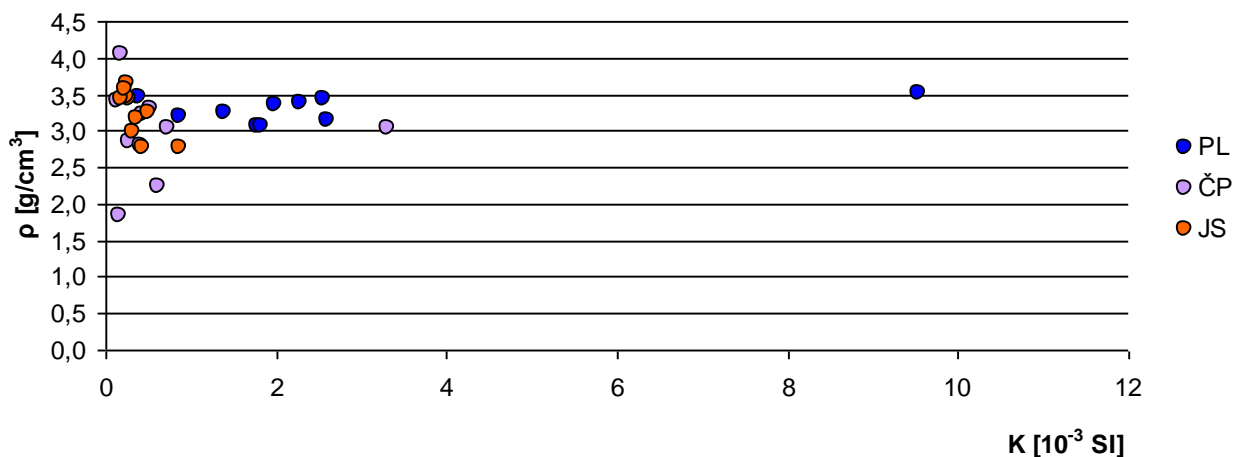
13.1 Fyzikální vlastnosti strusek

Záměrem tehdejších hutníků bylo dosáhnout co nejnižších hustot strusky pro snazší gravitační oddělení vyredukovaného kovu. Průměrná hustota jihlavských strusek je relativně vysoká ($3,17 \text{ g/cm}^3$). Extrémní hodnoty a výraznější kolísání hustot, může být způsobeno vedle zřejmých příčin, jako porozita a inkluze křemene, také heterogenním složením strusek.

Jak by se dalo očekávat, jsou hodnoty magnetické susceptibility spojeny s obsahy Fe, konkrétně maximální susceptibilita $9,526 \cdot 10^{-3} \text{ SI}$ odpovídá i maximu Fe_2O_3 (34,56 hmot. %). Na obr. 24 je dobře patrná pozitivní korelace obou proměnných. Nebyla zjištěna závislost mezi hustotou a magnetickou susceptibilitou (obr. 25).

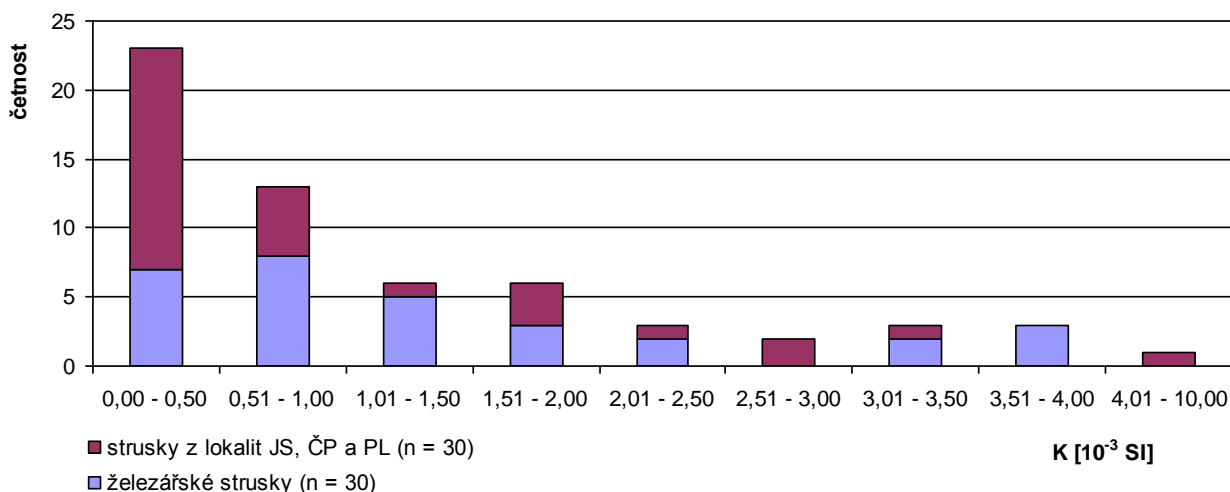


Obr. 24 Závislost magnetické susceptibility na obsahu Fe_2O_3 strusek.



Obr. 25 Vztah mezi magnetickou susceptibilitou a hustotou strusek.

Naměřená magnetická susceptibilita a hustota umožnila srovnání s daty z jiných studovaných lokalit. Z porovnání se struskami železářskými (obr. 26) (Zmeškalová 2010) vyplývá, že rozdíl mezi jednotlivými typy strusek není zásadní. V podstatě interval vytyčený minimální a maximální hodnotou má obdobné hodnoty. Magnetická susceptibilita u vzorku PL1 je dokonce vyšší než všechny hodnoty železářských strusek ($9,53 \cdot 10^{-3}$ SI). Možnými nositeli magnetických vlastností jsou především pyrrhotin a magnetit (méně limonit) (Hrouda et al. 2006).



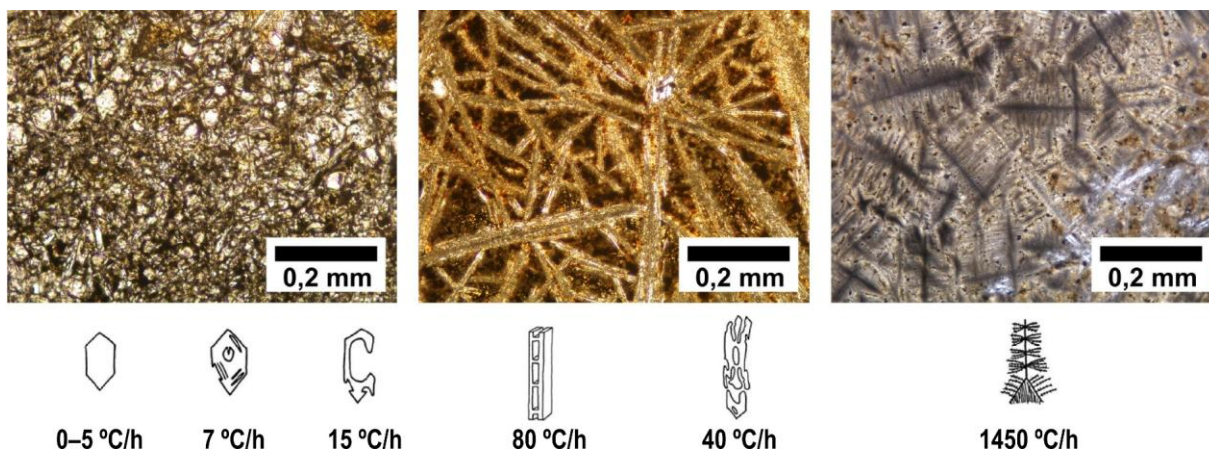
Obr. 26 Srovnání magnetické susceptibility strusek jihlavských se struskami železářskými. Data pro železářské strusky převzata ze Zmeškalové (2010).

13.2 Fázové a chemické složení strusek

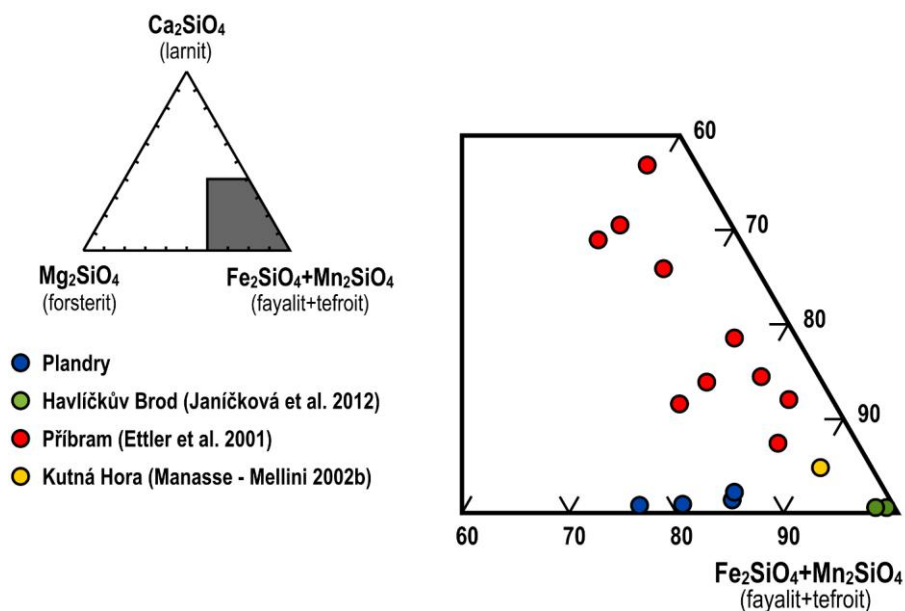
13.2.1 Plandry

Z lokality PL pocházejí dobře krystalické strusky, v nichž je hlavní krystalická fáze reprezentována olivínem. Pro olivíny je typická výrazná proměnlivost morfologie v rámci jednoho

vzorku. To může být odrazem výrazného teplotního gradientu při chladnutí strusky, jak ukazuje práce Donaldsona (1976) (obr. 27). Lze proto předpokládat, že partie tvořené lištovitými olivíny chladly rychlostí přibližně 60 °C/h, zatímco část s téměř izometrickými zrny nechladla větší rychlostí než 10 °C/h (tvrzení posiluje i téměř úplná absence skla). Extrém pak představuje objem strusek tvořený olivíny se spinifexovou texturou, které musely být ochlazovány rychleji než 1000 °C/h. Chemismus olivínů je ve srovnání s jinými lokalitami (Kutnohorsko, Havlíčkovobrodsko, Příbram) relativně neobvyklý pro nízké obsahy CaO a poměrně zvýšené MgO (obr. 28).



Obr. 27 Závislost morfologie olivínů na rychlosti chlazení (první a druhá fotografie vzorek PL1, třetí vzorek PL3). Převzato a upraveno podle Donaldsona (1976).



Obr. 28 Chemismus olivínů strusek z lokality PL ve srovnání s ostatními českými lokalitami.

U přítomného spinelidu se nedá předpokládat vznik jádra bohatého chrom-spinelem z taveniny, pravděpodobnějším zdrojem může být natavení vyzdívky pece, případně vnesení zrna se zpracovávanou rudou a aditivou. Jinak je tomu u lemu, který toto jádro obrůstá. Ten je dominantně tvořen magnetitem. Přítomnost trojmocného Fe odráží alespoň částečně oxidické podmínky během

celého procesu tavby (Manasse – Mellini 2002a). Jako zásadní pro posouzení vzniku spinelidu z taveniny se jeví obsahy Zn, protože ten substituuje Fe^{2+} ve struktuře spinelidů (srovnej např. Ströbele et al. 2010). Z tohoto pohledu je jádro (0,21 hmot. % ZnO) jednoznačně cizorodé a lems 6,51 hmot. % ZnO novotvořený.

Z obsahů MgO, CaO a MnO v celé strusce a skle, stejně jako z obsahů MnO a MgO v olivínech se dá předpokládat, že vsázka obsahovala alespoň určité procento karbonátů dolomit-ankeritové řady. Nakolik bylo tavidel na bázi karbonátů do vsázky záměrně přidáváno dá se jen spekulovat. Obsahy CaO (celkový chemismus) u vzorků PL1, PL2 a PL3 působí dojmem, že snahou bylo karbonáty ze vsázky spíše odstraňovat (2,60–3,92 hmot. % CaO) a jiná tavidla na bázi CaO nepřidávat.

Za sulfidů má význačné postavení Cu-Fe-S fáze proměnlivé stechiometrie jako jediný výraznější nositel Ag. Přítomnost shanditu, reprezentujícího fázi s vysokým obsahem Ni, je zajímavá, protože minerál s podstatným zastoupením Ni není v jihlavském rudním revíru popisován (Malý 1999). Obsahy Sb jsou zřejmě spojeny s přítomností pyrargyritu, freibergitu či tetraedritu v rudním koncentrátu. Vzhledem k tomu, že Sb stejně jako S a další prvky odchází při úpravě či hutnění rud v podobě oxidů a jiných sloučenin v kouři, dá se jen stěží odhadovat, nakolik byla ruda bohatá fázemi, které tyto prvky obsahují.

Chemickým otiskem zpracovávaného typu rudy jsou i obsahy Ba v krystalických fázích (zejména v živcích) a ve skle. Z celkového chemismu strusek je patrné, že to pro vzorky PL1 a PL2 nejsou obsahy nikterak vysoké (max. 1,88 hmot. % Ba), ale i tak odráží alespoň nepatrné množství barytu, přítomného ve vsázce. Proto se dá předpokládat zpracování mesotermálního typu rud ve smyslu Malého et al. (2008). Zásadní odlišnost lze konstatovat u vzorku PL5. Vzorek PL5 je struskou v celém objemu sklovitou. Vedle přítomnosti/absence jednotlivých fází byl velký rozdíl i v chemickém složení, které se nejvíce projevuje u obsahů CaO, Fe_2O_3 , MnO, Ba, Pb a Zn. Odlišné je i složení vzorku PL3 s nejnižšími obsahy Ba (1400 ppm) a nejvyššími obsahy As (269 ppm) a Au (47,6 ppb). Důvodů může být několik. Nejrelevantnějším se zdá být zpracování jiného typu rudy nebo podobného typu, ale z jiné lokality. Předpoklad výrazně odlišného složení každé vsázky je možné zavrhnout pro poměrně stabilní chemismus krystalických strusek. Ty byly navíc odebírány z různých částí lokality.

13.2.2 Jihlava - splav, Červený potok

Pro strusky z lokalit JS a ČP je charakteristická naprostá převaha skla a téměř úplná absence novotvořených krystalických silikátových fází (akcesoricky se v nich vyskytují pouze živce). Přitom i v případě extrémně rychlého chlazení, jak ukazuje práce Donaldsona (1976), by se dala

předpokládat alespoň přítomnost olivínů ve formě spinifexové textury, jak je tomu na lokalitě Plandry (výjimka sklovitá struska PL5, typově odpovídající spíše lokalitám JS a ČP). Je možné, že hlavní roli v tomto případě sehrálo Ba, které působilo jako inhibitor krystalizace. V tom případě by jeho přítomnost byla pro tehdejší hutníky vítaná. Absence krystalických fází, které působí jako překážka pro vyredukovaný kov, by tím pádem umožňovala efektivnější gravitační separaci vyrobeného kovu od struskové taveniny. To potvrzuje jen nepatrná přítomnost větších sulfidických inkluzí, které jsou na lokalitě PL běžné. Navíc jako modifikátor sítě Ba snižuje viskozitu taveniny. Zdrojem Ba byl nepochybně baryt. Ten právě na Starých Horách tvoří významnou část žiloviny (Malý 2004). Obsahy Ba sice nejsou korelativně provázeny zvýšenými obsahy S, ta ovšem, jak je uváděno výše, mohla během tavby unikat v kouři. Pro překročení horních limitů stanovitelnosti u analýz celkového chemismu je možné jen přibližně odvozovat možné obsahy Ba ze systematicky zvýšených obsahů Sr (1110–5120 ppm), které Ba provázejí, a z WDX analýz skla (až 23 hmot. % BaO). I přes vysoké obsahy zůstává otázkou, nakolik byl baryt do vsázky přidáván záměrně. V této souvislosti lze zmínit zajímavou situaci na Starých Horách, kde byla při archeologickém výzkumu objevena jáma vyplněná barytovým šterkem (Hrubý 2004). Ten mohl představovat odpad po třídění rudy, stejně jako zásobu tavidel.

Vysoké obsahy Ba v živcích poukazují na jejich přímou krystalizaci ze struskové taveniny.

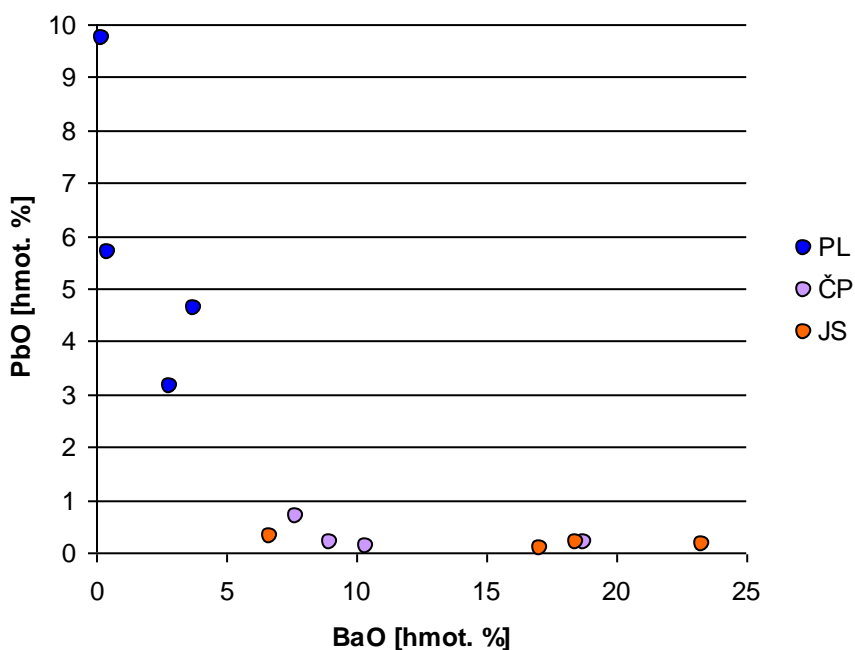
Z hodnot celkového chemismu strusek je patrný relativně vysoký obsah CaO (až 10,17 hmot. %), provázený nízkými obsahy MgO a MnO. Důvodem je nejspíš dominantní přítomnost kalcitu v žilovině zpracovávané rudy, případně mohlo být přidáváno jisté množství tavidel na bázi CaO.

Mezi sulfidy jednoznačně dominuje pyrhotin. Hlavním koncentrátorem Ag je opět nestechiometrická Cu-Fe-S fáze. Identifikováno bylo i stříbro samotné, ale co do objemu je významnější role Cu-Fe-S fáze.

13.2.3 Společné interpretace pro studované lokality

Absence silikátů jako pyroxeny či melilit, jinde běžných (např. Ettler et al. 2001), je u PL s největší pravděpodobností zapříčiněna velmi nízkými obsahy CaO. Dalším důvodem by mohla být vysoká rychlost chlazení taveniny, ale vzhledem k přítomnosti izometrických krystalů olivínu u některých vzorků se nezdá být tento faktor zásadním. Možné je i dosažení nedostatečně vysokých teplot v průběhu tavby. Tuto možnost podporují i nízké obsahy CaO v olivínech, které jsou spojeny právě s vyššími teplotami (Manasse – Mellini 2002a). V případě lokalit JS a ČP mohou hrát svou roli, stejně jako v případě olivínů, vysoké obsahy Ba, které s velkou pravděpodobností působily jako inhibitor krystalizace.

I přes velké rozdíly v chemismu, lze z chemických analýz rozeznat sklovité a krystalické strusky (hlavní role Ba). Nejzajímavější je závislost mezi obsahy Pb a Ba (obr. 29), nasvědčující tendenci Ba vytěsňovat Pb (v menší míře i Zn a Cu) z taveniny. Sklovité strusky mají sice obecně vyšší obsahy CaO, nicméně WDX analýzy skla sklovitých a krystalických strusek (např. sklovitá JS3 a krystalická struska PL2), které vykazují srovnatelné obsahy CaO a alkálií mají naprosto odlišné obsahy Pb a Zn. Z obr. 29 je patrné, že po překročení přibližně 10 hmot. % BaO poklesne obsah PbO pod 0,3 hmot. %.



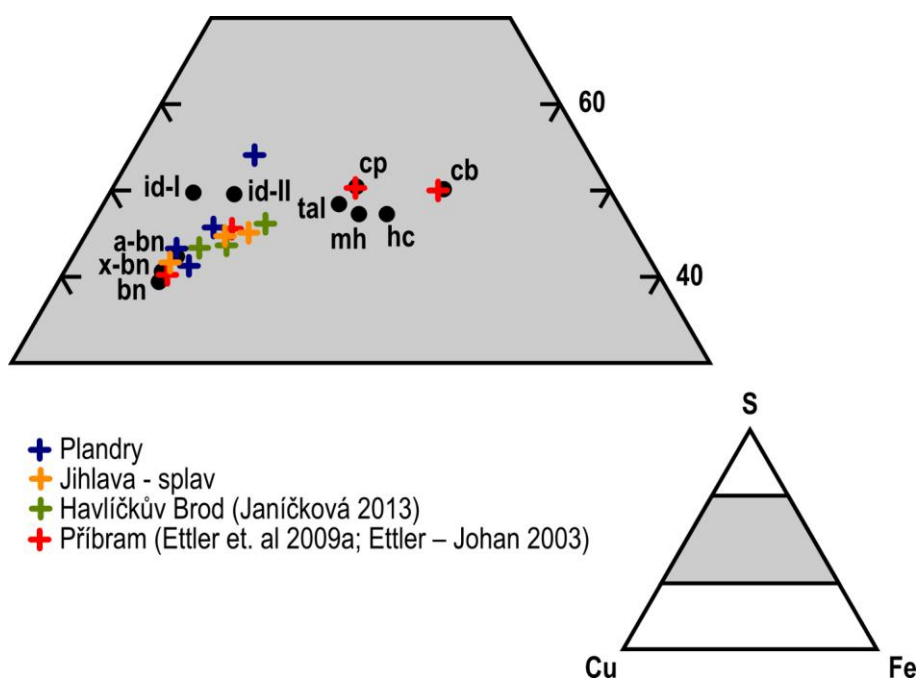
Obr. 29 Závislost mezi obsahy BaO a PbO ve skle studovaných strusek.

Pro posouzení míry vlivu křemenných inkluzí na celkový chemismus strusek byl záměrně vybrán vzorek ČP10 (hustota $1,83 \text{ g/cm}^{-3}$) a ČP5 s obsahy 57,94 a 56,85 hmot. % SiO_2 . Pro možné srovnání byla vybrána struska JS8 (49,33 hmot. % SiO_2), která na zkoumaných řezech křemen neobsahovala. Mezi těmito dvěma extrémny je rozdíl menší než 10 hmot. %.

U krystalických strusek z lokality PL se projevuje výrazná heterogenita. Výjimkou je vzorek PL1, který v celém objemu vykazuje relativně uniformní hodnoty. Heterogenitu skla je možné vypořádat vedle BSE snímků také z bodových analýz. U lokalit JS a ČP není možné srovnání jednotlivých bodů, protože nebylo provedeno více analýz u jednoho vzorku, ale vzhledem k jen nepatrné přítomnosti krystalických fází se nabízí přímé srovnání mezi WDX analýzami a hodnotami celkového chemismu (je nutné zohlednit roli křemenných inkluzí popsaných výše). Na základě

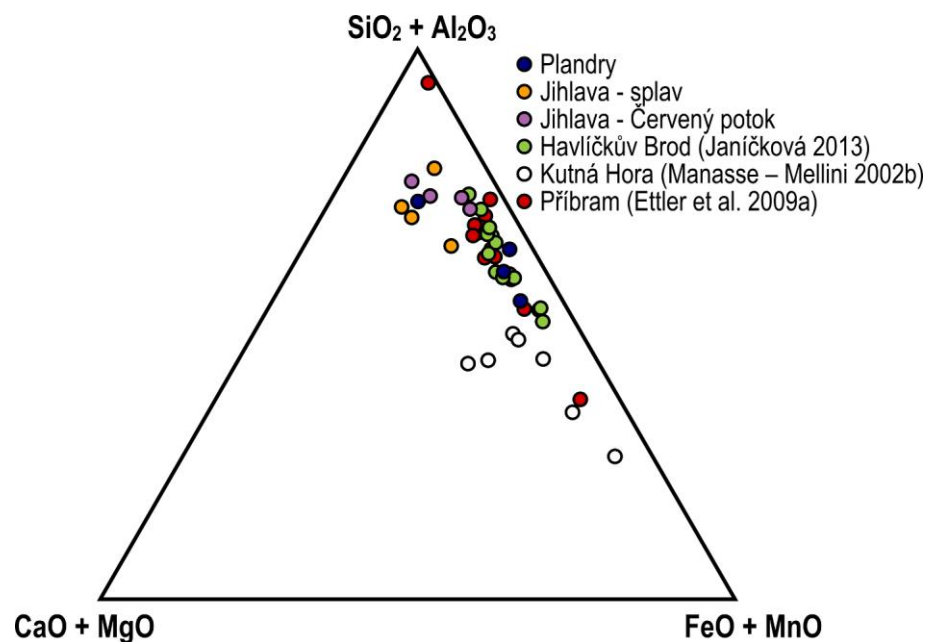
těchto dat je možné strusky z lokalit JS a ČP (vzorky JS1 a ČP4, výjimkou je vzorek ČP1) označit za relativně homogenní.

Ze sulfidů má zajímavé postavení zmiňovaná Cu-Fe-S fáze. Jednotlivé provedené analýzy vynesené do ternárního diagramu Cu-Fe-S (obr. 30) přibližně spadají do pole vytyčeného fázemi id-I, tal a bn, vybočuje pouze jediná, S bohatší fáze. Tři analýzy se přibližují stechiometrii bornitu. I přes velkou variabilitu v rámci jedné lokality je zajímavá podobnost složení několika Cu-Fe-S nestechiometrických fází ostatních českých lokalit s jihlavskými. Data naznačují existenci pevných roztoků mezi id-II a bornitem a chalkopyritem a bornitem.



Obr. 30 Ternární diagram Cu-Fe-S (at. %). Převzato a upraveno podle Vaughana – Craiga (1978): **bn** – bornit, **x-bn** – x-bornit, **a-bn** – anomální bornit, **id-I** – idait ($Cu_{5,5x}Fe_xS_{6,5x}$), **id-II** – (Cu_3FeS_4), **tal** – talnakhit, **mh** – mooihoekit, **hc** – haycockit, **cp** – chalkopyrit, **cb** – cubanit.

Srovnání celkového chemismu strusek v kontextu České republiky a Evropy je problematické pro značnou variabilitu i v rámci jedné lokality. To je dobře patrné z pseudo-ternárního diagramu (obr. 31), kdy zásadně odlišné jsou pouze strusky kutnohorské a několik vzorků příbramských. Nicméně podobně jako např. pro strusky příbramské (Ettler et al. 2009a) jsou typické vysoké obsahy PbO (až 34,38 hmot. %), vázané hlavně na sklo a živce, je možné strusky jihlavské charakterizovat vysokými obsahy Ba (vázané rovněž dominantně na sklo a živce). Strusky krystalické je možné odlišit od sklovitých (v případě Jihlavska) i z pseudo-ternárního diagramu, protože krystalické jsou v průměru chudší na sumy $SiO_2 + Al_2O_3$ a $CaO + MgO$. U ostatních českých lokalit není mezi krystalickými a sklovitými struskami výraznější rozdíl.



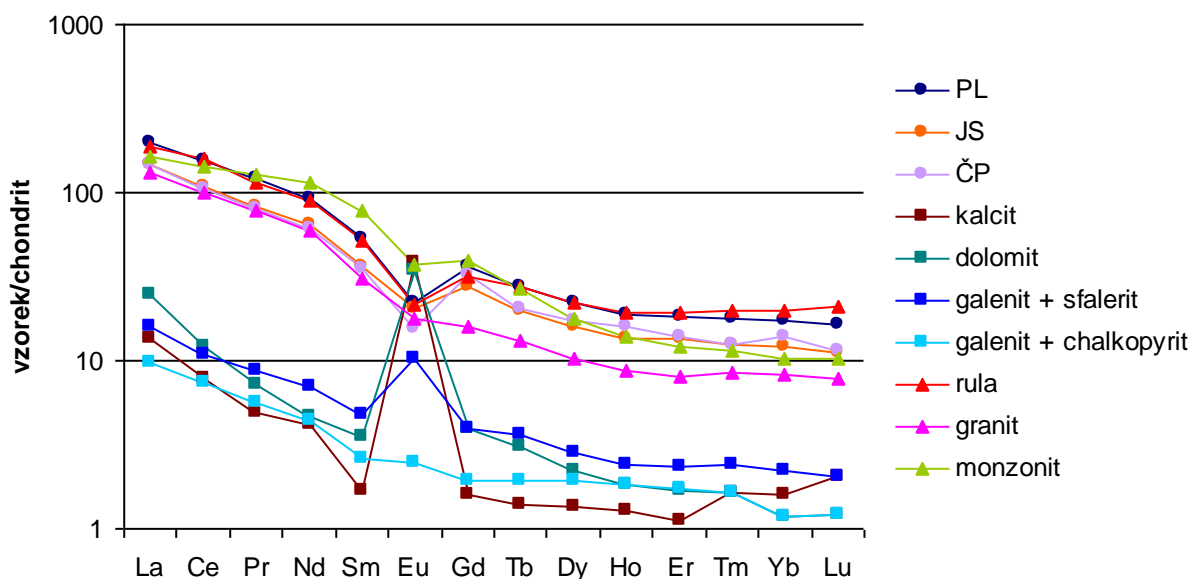
Obr. 31 Celkový chemismus strusek promítnutý do pseudo-ternárního diagramu. Převzato a upraveno podle Manasse – Mellini (2002a).

Lokalita	Jihlavsko				Pohled					
	strusky			hornina	ruda				hornina	
Vzorek	PL	JS	ČP	monzonit	kalcit	dolomit	gn+sph	gn+cpy	rula	granit
La	47,65	34,45	34,45	39,00	3,20	5,90	3,80	2,30	45,00	31,40
Ce	94,18	66,23	64,78	86,50	4,80	7,40	6,70	4,50	96,60	61,20
Pr	11,11	7,63	7,41	12,02	0,45	0,66	0,81	0,52	10,78	7,20
Nd	41,95	29,08	27,70	52,10	1,90	2,10	3,20	2,00	40,90	27,30
Sm	7,93	5,35	5,29	11,49	0,25	0,52	0,71	0,39	7,58	4,55
Eu	1,24	1,15	0,87	2,09	2,17	1,91	0,58	0,14	1,20	0,99
Gd	7,22	5,49	6,44	7,74	0,32	0,78	0,78	0,38	6,36	3,14
Tb	1,01	0,72	0,74	0,96	0,05	0,11	0,13	0,07	0,99	0,48
Dy	5,44	3,90	4,24	4,38	0,33	0,54	0,69	0,47	5,50	2,53
Ho	1,03	0,74	0,87	0,76	0,07	0,10	0,13	0,10	1,06	0,48
Er	2,90	2,15	2,22	1,96	0,18	0,27	0,37	0,28	3,11	1,30
Tm	0,44	0,31	0,31	0,28	0,04	0,04	0,06	0,04	0,49	0,21
Yb	2,79	1,96	2,22	1,66	0,26	0,19	0,36	0,19	3,16	1,32
Lu	0,40	0,28	0,28	0,25	0,05	0,03	0,05	0,03	0,52	0,19

Tab. 18 Obsahy prvků vzácných zemin (ppm) ve struskách jihlavského rudního revíru, mineralizacích z lomu Pohled (havlíčkobrodsko) a vybraných horninách (rula a granit z lomu Pohled, monzonit – jihlavský masiv). (data pro PL, JS a ČP představují průměr ze 4 analýz). Kalcit, dolomit, rula a granit – Mastíková (2011), monzonit – Kotková et al. (2010), gn+sph, gn+cpy – Dolníček (nepublikovaná data).

Obsahy prvků vzácných zemin strusek a vybraných hornin z dané oblasti (monzonit, rula a granit) jsou si většinou velmi podobné (tab. 18). Podobný trend křivek je i u vzorků z hydrotermálních mineralizací, ale obsahy jednotlivých prvků jsou nižší. Z obr. 32, kde jsou vizualizovány průměrné

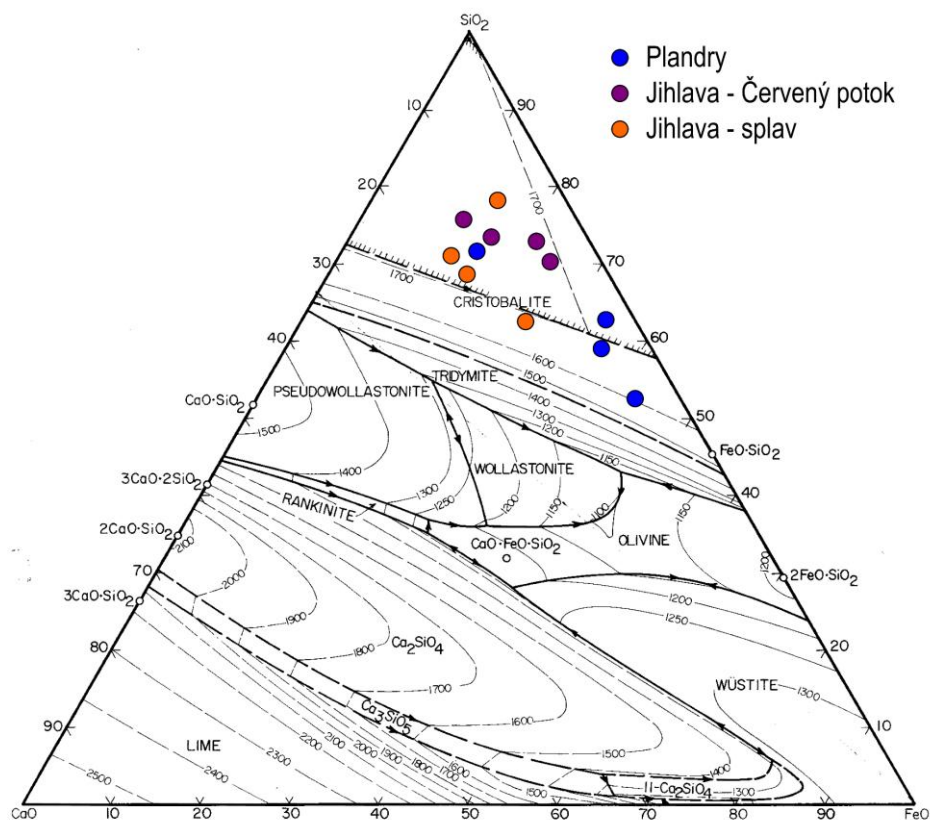
hodnoty REE strusek z jednotlivých lokalit normalizované na C1-chondrit, je patrné obohacení LREE, stejně jako u jednotlivých vzorků vybraných hornin a mineralizací. Pro strusky a horniny společná negativní europiová anomálie ($Eu/Eu^* = 0,45-0,65$ pro strusky a $0,53-0,80$ pro vybrané horniny). Naopak rudy mají pozitivní europiovou anomálii ($1,11-23,39$). Obsahy REE ve struskách jsou spojeny, stejně jako negativní europiová anomálie, především s natavením vyzdívky pece, která byla konstruována z místních hornin.



Obr. 32 C1-chondritem normalizované obsahy prvků vzácných zemin strusek jihlavského rudního revíru, mineralizací z lomu Pohled a vybraných hornin (rula a granit z lomu Pohled, monzonit – jihlavský masiv). Křivky strusek reprezentují průměry ze 4 analýz. Kalcit, dolomit, rula a granit – Mastíková (2011), monzonit – Kotková et al. (2010), galenit + sfalerit, galenit + chalkopyrit – Dolníček (nepublikovaná data).

13.3 Teplotní podmínky tavby a vlastnosti struskové taveniny

Chemismus strusek je možné využít i pro rekonstrukci teplotních podmínek během tavby. Problémem, na který však naráží publikované práce (např. Ettler et al. 2009a), je velmi komplexní chemické složení strusek. Proto by bylo pro určení relevantní teploty tavby nutné uvažovat více než tři komponenty ($SiO_2-FeO-CaO$), užívané pro recentní strusky. Teplotní údaje získané z tohoto diagramu jsou proto výrazně nadhodnocené. Podle obr. 33 by se měly pohybovat v rozmezí $1600-1700$ °C.



Obr. 33 Teploty likvidu strusek odvozené z celkového chemismu pomocí ternárního diagramu $\text{SiO}_2\text{-FeO-CaO}$ (převzato a upraveno podle Muana – Osborna 1965).

Index viskozity a dynamické viskozity $\log \eta$ umožňuje stanovit, nakolik bylo složení vsázky optimální pro efektivní separaci užitkového kovu. Z konstrukce vzorce je patrné, že čím vyšší je číselný údaj, tím nižší byla viskozita.

Srovnání indexu viskozity bez (v.i.) a se zohledněním (v.i._{mod}) Pb a Zn poukazuje, že zvýšené obsahy těchto kovů přímo ovlivňovaly vlastnosti taveniny. Bachmannem (1982) uváděné hodnoty indexu viskozity pro světové lokality se pohybují v intervalu 0,5–1,0. U studovaných vzorků (tab. 19) do tohoto intervalu spadají pouze krystalické strusky z lokality PL (v.i. = 0,63–0,91) a sklovitý vzorek JS8 (v.i. = 0,60), a po zohlednění obsahů těžkých kovů i JS5 (v.i._{mod} = 0,53). Hodnoty vypočítané u ostatních zkoumaných strusek (v.i._{mod} = 0,33–0,49) téměř vylučují efektivní funkci strusky během tavby. Pro dosažení reálnějších výsledků, zejména u lokalit JS a ČP, by musel vzorec zohlednit především typicky zvýšené obsahy Ba. Navíc by bylo nutné odstranit inkluze neroztaveného křemene, které přispívají k vyšší hodnotě SiO_2 v celkových chemických analýzách (viz výše).

S nadhodnocením vypočítaných hodnot se setkáváme i v případě dynamické viskozity. U výpočtu realizovaného podle Giordana et al. (2006) se s tím dá počítat, protože je navržen pro

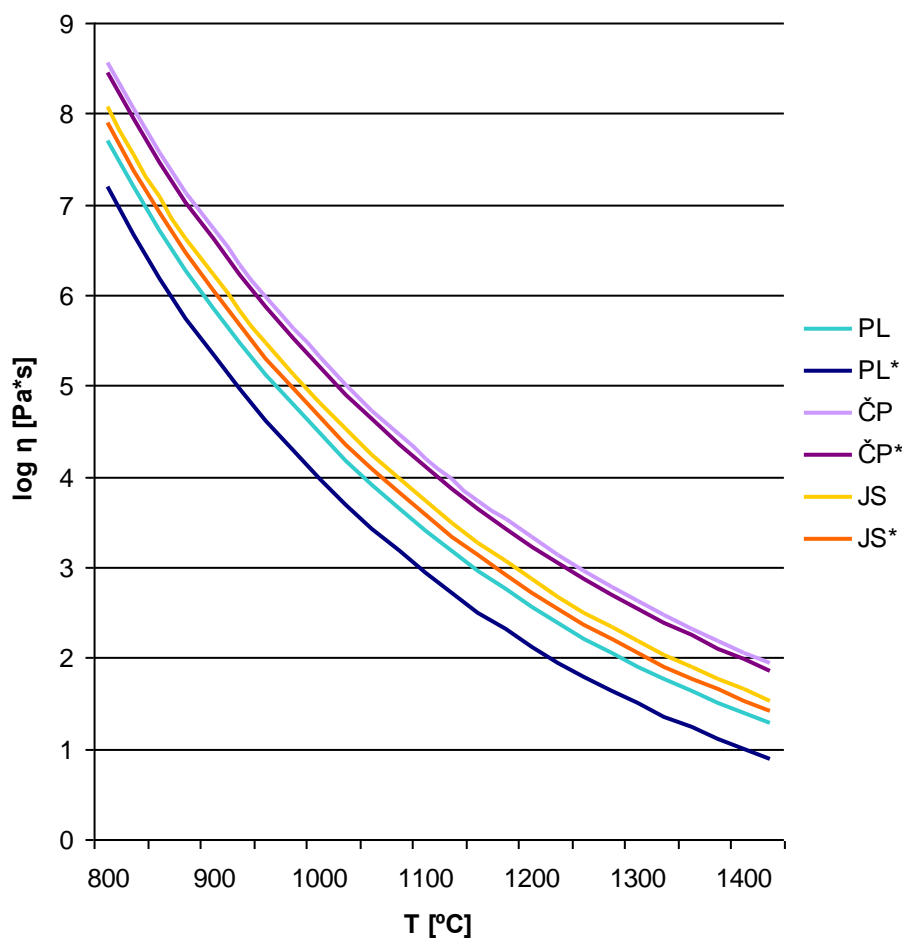
přírodní systémy a nezohledňuje možné vysoké obsahy Pb a Zn. Částečné řešení nabízí úprava vzorce podle Ettlera et al. (2009a) (srovnej obr. 34), nicméně stále narážíme na stejný problém jako v případě v.i._{mod}, jímž je nezapočítání Ba. To by bylo za jiných okolností možné zohlednit prostým přičtením BaO do parametru SM_{mod}, v tomto případě však přesné obsahy Ba neznáme. Z toho důvodu je možné označit za reálná data u vzorků PL1, PL2, PL3 a JS5. Jejich dynamická viskozita je při teplotě 1200 °C (log η_{mod} = 1,586–2,287) srovnatelná, případně nižší než u bazaltového magmatu za stejné teploty (log η = 2,477) (tab. 20). Jednoznačnou předností tohoto způsobu výpočtu je nezkreslení výsledku obsahu SiO₂, protože nejsou do výpočtu zahrnuty. I přes to je možné vysledovat negativní korelaci mezi hodnotami indexu viskozity a dynamické viskozity (R² = 0,704).

T [°C]	log η [Pa*s]											
	PL1	PL2	PL3	PL5	ČP1	ČP4	ČP5	ČP10	JS1	JS5	JS8	JS9
800	7,289	7,517	8,173	7,833	8,849	8,364	8,639	8,366	7,703	7,621	7,578	9,367
900	5,430	5,670	6,321	5,994	7,024	6,514	6,815	6,527	5,856	5,768	5,745	7,486
1000	4,056	4,295	4,914	4,610	5,608	5,101	5,409	5,122	4,472	4,385	4,376	6,011
1050	3,498	3,733	4,333	4,041	5,016	4,515	4,823	4,540	3,905	3,818	3,816	5,391
1100	3,006	3,237	3,818	3,539	4,488	3,995	4,301	4,022	3,404	3,318	3,322	4,838
1200	2,189	2,411	2,953	2,696	3,593	3,120	3,418	3,150	2,567	2,484	2,495	3,900
1300	1,549	1,760	2,268	2,030	2,877	2,426	2,712	2,457	1,906	1,828	1,843	3,151
1400	1,049	1,249	1,728	1,504	2,303	1,877	2,149	1,907	1,387	1,312	1,328	2,557
T [°C]	log η _{mod} [Pa*s]											
	PL1	PL2	PL3	PL5	ČP1	ČP4	ČP5	ČP10	JS1	JS5	JS8	JS9
800	6,589	6,784	7,793	7,574	8,696	8,155	8,585	8,323	7,555	7,384	7,543	9,091
900	4,724	4,932	5,946	5,736	6,875	6,310	6,762	6,486	5,709	5,532	5,710	7,223
1000	3,377	3,587	4,560	4,365	5,468	4,909	5,359	5,083	4,332	4,160	4,343	5,767
1050	2,836	3,044	3,991	3,803	4,881	4,330	4,774	4,502	3,769	3,600	3,784	5,157
1100	2,364	2,569	3,487	3,308	4,358	3,817	4,254	3,985	3,273	3,107	3,290	4,613
1200	1,586	1,783	2,645	2,481	3,473	2,954	3,375	3,116	2,444	2,287	2,466	3,694
1300	0,981	1,169	1,981	1,828	2,765	2,271	2,672	2,425	1,791	1,642	1,815	2,960
1400	0,510	0,690	1,457	1,314	2,198	1,731	2,111	1,877	1,278	1,137	1,302	2,378
v.i.	0,91	0,74	0,63	0,44	0,41	0,41	0,45	0,35	0,44	0,49	0,60	0,31
v.i._{mod}	1,12	0,94	0,74	0,49	0,42	0,44	0,46	0,36	0,47	0,53	0,61	0,33

Tab. 19 Index viskozity (v.i.) a dynamická viskozita log η (Pa*s). Nahoře hodnoty dynamické viskozity vypočtené podle Giordana et al. (2006), dole hodnoty zohledňující obsahy PbO a ZnO podle Ettlera et al. (2009a). Hodnoty v.i. podle Bachmanna (1982) a v.i._{mod} podle Ettlera et al. (2009a).

	η [Pa*s]	$\log \eta$ [Pa*s]	T [°C]
Voda	0,001	-3,000	20
Olivový olej	0,11	-0,959	20
Med	~10	1,000	20
Arašídové máslo	25	1,398	20
Bazalt	~300	2,477	1200

Tab. 20 Hodnoty dynamické viskozity vybraných referenčních materiálů (Ströbele et al. 2010).



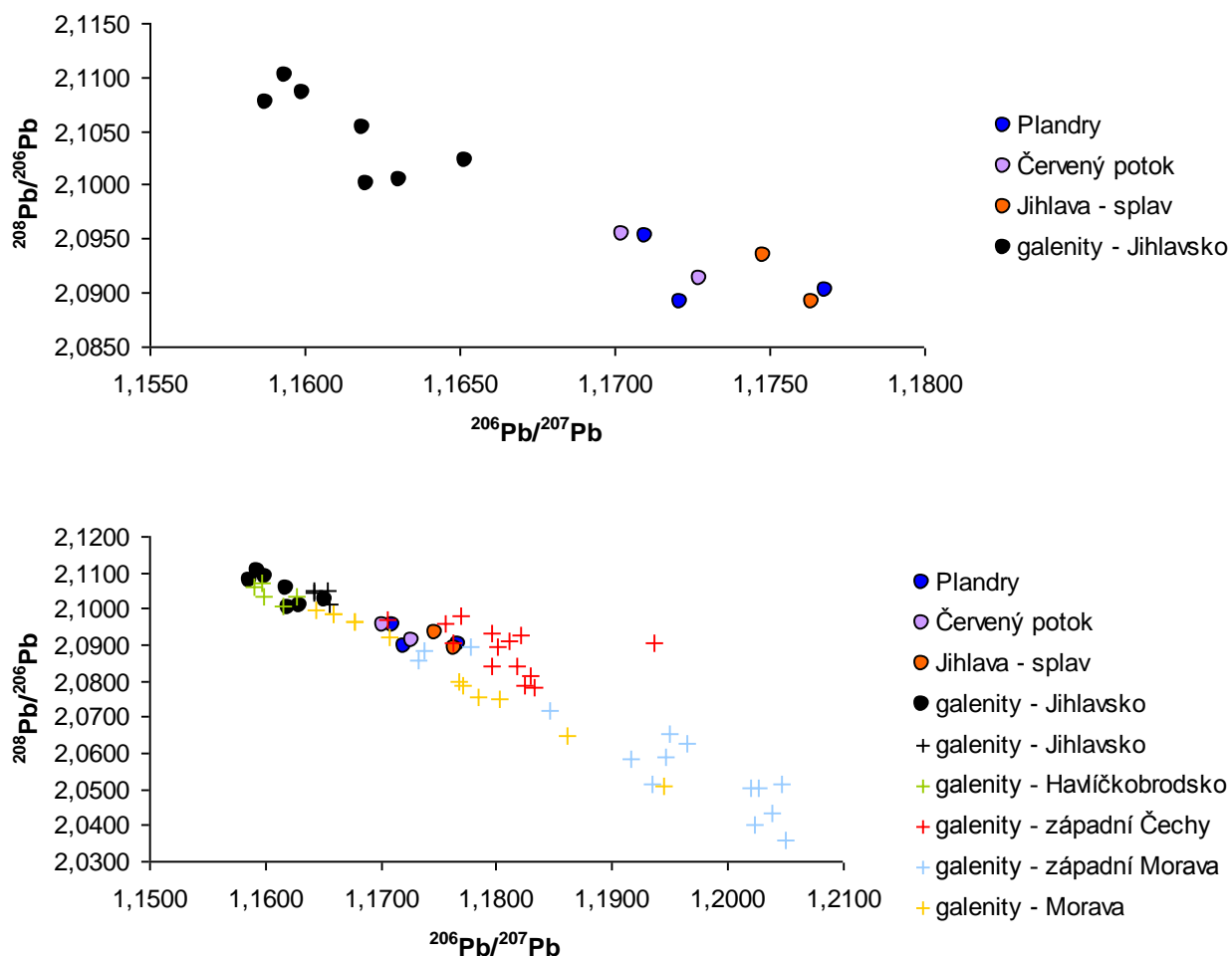
Obr. 34 Průměrné hodnoty dynamické viskozity vypočtené pro jednotlivé studované lokality bez a se (označené *) zohledněním PbO a ZnO.

Pro konfrontaci s modelovými teplotami a vypočtenými hodnotami $v.i.$, $v.i.mod$, $\log \eta$ a $\log \eta_{mod}$ byly realizovány tavby. Pro krystalizované strusky z lokality PL je možné označit vypočtené hodnoty za odpovídající, protože v intervalu 1050–1100 °C došlo během 1 h k roztavení všech vzorků s výjimkou vzorku PL1. To je na první pohled paradoxní, protože vzorek PL1 dosahuje z pohledu indexu viskozity i dynamické viskozity nejlepších hodnot. Je ovšem možné, že se zde projevilo výrazně heterogenní složení nebo vysoký obsah poměrně velkých zrn olivínu, které by pro

roztavení vyžadovaly setrvat na uvedené teplotě delší dobu. U všech vzorků z lokalit JS a ČP došlo v daném teplotním intervalu k úplnému roztečení, kromě jednoho, křemenem bohatého (vzorek ČP5). Při tom by měly hodnoty dynamické viskozity u vzorků z lokalit JS a ČP přibližně odpovídat andezitovému–dacitovému magmatu za stejné teploty. Na těchto lokalitách tedy experimentální tavby potvrzují nereálnost vypočtených hodnot viskozity a modelových teplot.

13.4 Izotopy olova a provenience

Izotopické složení olova, přítomného ve strusce, je ovlivněno několika faktory. Prvním je heterogenita v izotopovém složení rudy, ta se obvykle projeví výrazně a podílí se na velkém rozptylu dat celého souboru měření. Jen nepatrný efekt je spojen s přidavkem tavidel a struskotvorných přísad (křemen a karbonáty), nebo odkouřením části olova během tavby (jsou uváděny ztráty až 40%). Zdaleka nejvýznamněji však podle literárních údajů ovlivňuje izotopické složení vnášení surového olova z jiných lokalit do celého procesu (Baron et al. 2009). Z grafu $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (obr. 35) je dobře patrný rozdíl mezi izotopickým složením rudy a strusky. Jako nejpravděpodobnější vysvětlení tohoto rozdílu se jeví právě přidávání olova pocházejícího z jiných lokalit. Izotopické složení olova strusky odpovídá průměru izotopického složení vsázky, to je pochopitelně ovlivněno poměrem přidávaného cizího olova a olova z místní rudy. Aby byly získány odpovídající hodnoty izotopického složení olova strusky, musela být jihlavská ruda mísená s olovem, které má poměr $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ v průměru vyšší a $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ nižší než výsledná struska. Z dat publikovaných Vaněčkem et al. (1985) tomuto z celé České republiky nejlépe odpovídá oblast západních Čech, reprezentována lokalitami jako Oloví, Kraslice, Stříbro a Horní Slavkov. Částečně odpovídá i několik lokalit ze západní Moravy (Rožná, Dolní Rožinka, Rozsochy, Štěchov). Z dat publikovaných Slobodníkem et al. (2008) nejlépe vyhovují galenity z lokalit Mokrý, Veselí u Oder a Hrabůvka. Získané hodnoty izotopického složení olova strusky přibližně odpovídají mísení 26 % místního olova se 74 % olova ze západních Čech (průměr všech západočeských lokalit uvedených v obr. 35), případně 32 % místního olova se 68 % olova z vybraných lokalit západní Moravy (průměr z lokalit Rožná, Dolní Rožinka, Rozsochy, Štěchov). Důvodem pro import olova odjinud mohly být jeho velké ztráty v kouři v průběhu redukční tavby, další část olova zůstávala vázána v odpadní strusce.



Obr. 35 Porovnání izotopického složení olova ze strusek z Jihlavska s izotopovým složením galenitů vybraných oblastí. Křížkem jsou označena publikovaná data. Havlíčkovobrodsko – Janíčková (2013), Jihlavsko, západní Morava a západní Čechy – Vaněček et al. (1985), Morava – Slobodník et al. (2008).

13.5 Těžké kovy

Jak již bylo zmíněno, mezi těžkými kovy ve struskách jednoznačně dominuje Pb a Zn. U krystalických strusek se suma těchto kovů pohybuje v intervalu 5,88–8,48 hmot. %. Anomální obsah Pb (9,72 hmot. %) ve skle je možné pozorovat u vzorku PL3, ten je však provázený i zvýšením obsahu S (3,17 hmot. %). To může být spojeno s přítomností drobné sulfidické inkluze v analyzovaném prostoru. V případě sklovitých strusek suma těžkých kovů nepřesahuje 2 hmot. %. Nabízí se srovnání se vzorky z ostatních českých lokalit (tab. 21). Z tohoto pohledu dosahují sklovité strusky nízkých a krystalické spíše nadprůměrných hodnot. Nižší obsahy Pb obecně odráží lépe zvládnutou technologii hutnění.

Příbram	Pb	Zn	Kutná Hora	Pb	Zn	Havlíčkovobrodsko	Pb	Zn	Jihlavsko	Pb	Zn
	12,43	4,73		0,02	2,63		0,15	1,84		2,61	5,34
21,11	1,95	0,09	1,69	0,31	1,71	3,85	4,63				
13,68	5,00	0,02	2,13	7,89	3,23	5,36	0,52				
10,67	0,37	0,03	2,51	0,06	0,68	0,66	0,76				
26,78	2,72	0,02	1,37	3,24	2,65	0,14	0,21				
31,92	1,63	0,06	4,01	2,10	2,63	0,09	0,18				
20,76	1,17	0,05	1,84	0,16	2,14	0,32	1,35				
17,41	0,34			0,08	0,80	0,06	0,22				
20,65	0,52			0,21	0,38	0,18	0,94				

Tab. 21 Obsahy olova a zinku (hmot. %) ve struskách na Jihlavsku a u ostatních českých lokalit. Příbram – Ettler et al. (2009a), Kutná Hora – Manasse – Mellini (2002b), Havlíčkovobrodsko – Janíčková (2013).

Ze zvýšených obsahů Zn je možné vyvozovat, že snahou tehdejších hutníků nebylo separovat sfalerit z rudního koncentrátu. Není možné určit, jestli byl sfalerit ponecháván ve vsázce záměrně, nebo bylo příliš náročné odstranit jej. Faktem zůstává, že stejně jako Pb, Zn přímo pozitivně ovlivňuje vlastnosti taveniny, a to i přes to, že se již okolo 900 °C zdatelně vypařuje (Vaněk – Velebil 2007).

Pro silikátové fáze a novotvořený lem spinelidu byly vypočteny distribuční koeficienty Zn (tab. 22). Ty jsou stanoveny prostým poměrem mezi obsahy Zn v krystalické fázi a skle (Ettler et al. 2000). Ze získaných údajů vyplývá, že Zn přednostně vstupuje do raně vznikajících fází, které reprezentuje novotvořený lem spinelidu. Relativně obohacen je i olivín (vzorky PL1 a PL2). Do struktury živce a leucitu Zn příliš nevstupuje, nepochybně z krystalochemických důvodů. Proto jejich krystalizace vede k obohacení zbytkové taveniny o Zn. Stanovení stejného parametru pro Pb by nemělo smysl vzhledem k téměř výhradní fixaci tohoto prvku do skla. Část je pochopitelně vázána i v sulfidech, ty však z pohledu objemu nehrají zásadní roli.

	olivín	spinelid	živec	leucit
PL1	1,07	1,15	0,07	0,01
PL2	0,97			
PL3	1,19			

Tab. 22 Distribuční koeficienty Zn pro fáze z lokality Plandry.

Pro možné posouzení environmentálního rizika studovaných struskových hmot je nutné znát způsob vazby těžkých kovů v daných artefaktech. Zn je na rozdíl od Pb významně fixován v krystalických fázích, které jsou však při zvětrávání poměrně stabilní. Zn i Pb se značně podílí i na složení sulfidických inkluzí, ty ale z pohledu objemu nehrají zásadní roli. Problémem jsou tak zvýšené obsahy obou prvků ve skle, jež podléhá zvětrávání nejrychleji. Jak ukazuje práce Ettlera et al. (2001), intenzivně je ze skla uvolňován Zn, kdežto Pb je v navětralé části fixováno (především v podobě síranů). I přes pravděpodobnou emisi Zn do okolního prostředí nebyly pozorovány žádné

patologické projevy v růstu místní vegetace, jak je tomu na některých jiných hutnických lokalitách (Baron et al. 2006).

14 Závěr

Předmětem diplomové práce byly strusky po tavně polymetalických rud ze tří lokalit v jihlavském rudním revíru. Podrobným studiem bylo získáno dostatečné množství dat pro interpretaci složení vsázky, typu zpracovávané rudy, technologického procesu, efektivity hutního procesu a potenciálních environmentálních dopadů na okolí. Jako nejzásadnější přínos celé práce se jeví identifikace strusek sklovitých, Ba-bohatých v kontrastu se vzorky baryem chudšími, zato však krystalickými. Tato problematika by si zasloužila podrobnější studium.

Krystalické strusky typicky obsahují olivín, živce, křemen sklo a sulfidy, spíše výjimečná je přítomnost spinelidu či leucitu. U sklovitých strusek dominuje sklo provázené živcem, v menší míře jsou přítomny sulfidy. Olivíny jsou tvořeny fayalitem. Pro živce jsou typické vysoké obsahy barya (až 31,29 hmot. % BaO). Ze sulfidů je nejběžnější pyrrhotin, sfalerit a rudashevskyt. Hlavním koncentrátorem stříbra mezi sulfidy je nestechiometrická Cu-Fe-S fáze (až 2,59 hmot. % Ag). Identifikováno bylo ojediněle i ryzí stříbro. S vysokými obsahy Ba je spojena i přítomnost Ba analogu apatitu a Cu-Fe-Ba nestechiometrické fáze v sulfidických inkluzích.

Netypické chemické složení strusek se ukázalo být jako hlavní problém pro modelování teplot tání a viskozit. Veškeré výpočty byly spojeny s nadhodnocenými výsledky. To bylo potvrzeno i realizovanými tavnami, kdy v teplotním intervalu 1050–1100 °C došlo k roztavení všech studovaných vzorků s výjimkou dvou.

Zajímavá je i nastíněná možnost importu značné části olova přítomného v daných struskách ze vzdálenějších hutních areálů. Izotopické poměry studovaných strusek nejlépe odpovídají mísení místní rudy s olovem dováženým ze západních Čech (lokality jako Stříbro, Oloví, Horní Slavkov) v poměru cca 1:3, nelze však vyloučit ani některé další lokality. Hlavním důvodem importu olova mohly být jeho velké ztráty v průběhu taveb realizovaných technikou zolovňování.

Z pohledu možného environmentálního ohrožení představuje největší riziko Zn jako reprezentant těžkých kovů, který se na rozdíl od Pb ze strusky uvolňuje do okolí. Odrazem poměrně dobře zvládnuté technologie hutnění jsou relativně nízké obsahy Pb ve struskách.

LITERATURA

- Bachmann, H. G. (1982): The identification of slags from archaeological sites. – Institute of Archeology, Occasional publication, No. 6. London.
- Baron, S. – Carignan, J. – Laurent, S. – Ploquin, A. (2006): Medieval lead making on Mont-Lozère Massif (Cèvennes-France): Tracing ore sources using Pb isotopes. – *Applied Geochemistry*, 21, 241–252.
- Baron, S. – Le-Carlier, C. – Carignan, J. – Ploquin, A. (2009): Archeological reconstruction of medieval lead production: Implications for ancient metal provenance studies and paleopollution tracing by Pb isotopes. – *Applied Geochemistry*, 24, 2093–2101.
- Bernard, J. H. (1991): Empirical types of ore mineralizations in the Bohemian Massif. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- Čech, F. – Hak, J. (1979): Tetraedrite high in silver, zinc and cadmium from Jihlava, Czechoslovakia. – *Časopis pro mineralogii a geologii*, 24, 83–87.
- Donaldson, C. H. (1976): An experimental investigation of olivine morphology. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57, 187–195.
- Ettler V. – Johan, Z. – Touray, J. C. – Jelínek, E. (2000): Zinc partitioning between glass and silicate phases in historical and modern lead-zinc metallurgical slags from the Příbram district, Czech Republic. – *Comptes Rendus de l'Académie des Science*, 331, 245–250.
- Ettler, V. – Legendre, O. – Bodéan, F. – Touray, J. C. (2001): Primary phases and natural weathering of old lead-zinc pyrometallurgical slag from Příbram, Czech Republic. – *Canadian Mineralogist*, 39, 873–88.
- Ettler, V. – Johan, Z. (2003): Mineralogy of metaloid phases in sulphide mattes from primary lead smelting. – *Comptes Rendus Geoscience*, 335, 1005–1012.
- Ettler, V. – Červinka, R. – Johan, Z. (2009a): Mineralogy of medieval slags from lead and silver smelting (Bohutín, Příbram district, Czech Republic): Towards estimation of historical smelting conditions. – *Archaeometry*, 51, 6, 987–1007.
- Ettler, V. – Johan, Z. – Křibek, B. – Šebek, O. – Mihaljevič, M. (2009b): Mineralogy and environmental stability of slags from Tsumeb smelter, Namibia. – *Applied Geochemistry*, 24, 1–15.
- Giordano, D. – Mangiacapra, A. – Potuzak, M. – Russell, J. K. – Romano, C. – Dingwell, D. B. – DiMuro, A. (2006): An expanded non-Arrhenian model for silicite melt viscosity: A treatment for metaluminous, peraluminous and peralkaline liquids. – *Chemical Geology*, 229, 42–56.
- Hak, J. – Novák, F. (1962): Mikrochemismus moravských sfaleritů. – *Časopis Moravského musea, vědy přírodní*, 47, 37–52.

- Holub, M. – Jurák, L. (1978): Structural development of some polymetallic ore districts in the Moldanubian Pluton area. – *Věstník Ústředního Ústavu geologického*, 53, 205–217.
- Hrouda, F – Chlupáčová, M. – Mrázová, Š. (2006): Low-field variation of magnetic susceptibility as a tool for magnetic mineralogy of rocks. – *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154, 323–336.
- Hrubý, P (2004): Středověká hornická aglomerace na Starých Horách u Jihlavy. – *Stříbrná Jihlava 2004*, 5–21.
- Hrubý, P. – Hejhal, P. – Malý, K. (2007): Těžba a úprava rud na jihlavských Starých Horách ve 13. století (Montánní archeologický výzkum a aplikace přírodovědných analýz). – *Stříbrná Jihlava 2007*, 238–269.
- Cháb, J. – Straník, Z. – Eliáš, M. (2007): Geologická mapa České republiky, 1:500 000. – Česká geologická služba. Praha.
- Chlupáč, I. – Štorch, P. (1992): Regionálně geologické dělení Českého masívu na území České republiky. – *Časopis pro mineralogii a geologii*, 37, 4, 258–275.
- Chlupáč, I. – Brzobohatý, R. – Kovanda, J. – Straník, Z. (2002): Geologická minulost České Republiky. – Academia. Praha.
- Janičková, K. (2013): Mineralogie a chemismus strusek po tavbě stříbrných rud z vybraných lokalit v havlíčkobrodském rudním revíru. – MS, diplomová práce, Univerzita Palackého. Olomouc.
- Janičková, K. – Dolníček, Z – Malý, K. (2012): Fázové složení strusek po tavbě stříbrných rud na Havlíčkobrodsku. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 186–189
- Jaroš, Z. (1995): Několik poznámek k počátkům dolování stříbra na Jihlavsku. – *Stříbrná Jihlava 1995*, 45–48.
- Jaroš, Z. (1999): Jihlavské mincovny. – *Dolování stříbra a mincování v Jihlavě*, 79–89.
- Kotková, J. – Schaltegger, U. – Leichmann, J. (2003): 338–335 Ma old intrusions in the E Bohemian Massif – a relic of the orogen-wide durbachitic magmatism in European Variscides. – *Journal of the Czech Geological Society*, 48, 80–81.
- Kotková, J. – Schaltegger, U. – Leichmann, J. (2010): Two types of ultrapotassic plutonic rocks in the Bohemian Massif – Coeval intrusions at different crustal levels. – *Lithos*, 115, 163–176.
- Klomínský, J. – Jarchovský, T. – Rajpoot, G. S. (2010): Atlas of plutonic rocks and orthogneisses in the Bohemian Massif, Moldanubicum. – Czech Geological Survey. Praha.
- Leichmann, J. – Koller, F. – Švancara, J. – Zachovalová, K. (2003): High-K gabbros related to the durbachites (Jihlava Massif, Moldanubian Zone). – *Journal of the Czech Geological Society*, 48, 89.
- Macháňová, L. (2007): Kovové nálezy z hornického sídliště 13.–14. století Jihlava-Staré Hory. – *Stříbrná Jihlava 2007*, 270–277.
- Majer, J. (1999): Báňská a hutní praxe 13.–18. století. – *Dolování stříbra a mincování v Jihlavě*, 40–51.

- Malý, K. (1999): Jihlavský rudní revír – přehled geologie a mineralogie. – Dolování stříbra a mincování v Jihlavě, 16–27.
- Malý, K. (2004): Mineralogické zhodnocení starohorských nálezů. – Stříbrná Jihlava 2004, 62.
- Malý, K. (2009): Chemismus karbonátů Jihlavského rudního revíru. – *Acta rerum naturalium*, 7, 57–62.
- Malý, K. – Vávra, V. (1998): Ryzí stříbro z Jihlavského rudního revíru. – *Časopis Moravského musea*, 83, 49–52.
- Malý, K. – Dolníček, Z. (2005): Pb-Zn-Ag vein mineralization of central part of the Českomoravská vrchovina Upland (Czech Republic): S, C and O stable isotope study. – *Bulletin of Geosciences*, 80, 4, 307–319.
- Malý, K. – Dobeš, P. – Fojt, B. (2008): Stable isotope and fluid inclusion study of polymetallic mineralization in Jihlava Ore District (Czech Republic). – *Mineralogia – Special Papers*, 32, 111–112.
- Manasse, A. – Mellini, M. (2002a): Chemical and textural characterization of medieval slags from the Massa Marittima smelting sites (Tuscany, Italy). – *Journal of Cultural Heritage*, 3, 187–98.
- Manasse, A. – Mellini, M. (2002b): Archaeometallurgic slags from Kutná Hora. – *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Monatshefte*, 8, 369–384.
- Mastíková, E. (2011): Mineralogie a podmínky vzniku vybraných mineralizací v lomu Pohled (moldanubikum). – MS, diplomová práce, Univerzita Palackého. Olomouc.
- McDonough, W. F. – Sun, S. S. (1995): The composition of the Earth. – *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- McLennan, S. M. (1989): Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B.R., McKay, G.A. (eds.): *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. – *Reviews in mineralogy*, 21, 169–200.
- Mísař, Z. – Dudek, A. – Havlena, V. – Weiss, J. (1983): *Geologie ČSSR, Český masív*. – Státní pedagogické nakladatelství. Praha.
- Monecke, T. – Kempe, U. – Monecke, J. – Sala, M. – Wolf, D. (2002): Tetrad effect in rare earth element distribution patterns: A method of quantification with application to rock and mineral samples from granite-related rare metal deposits. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 7, 1185–1196.
- Muan, A. – Osborn, E. F. (1965): *Phase equilibria among oxides in steelmaking*. – Addison-Wesley publishing company, Inc. Massachusetts.
- Piatak, N. M. – Seal II, R. R. – Hammarstrom, J. M. (2004): Mineralogical and geochemical controls on the release of trace elements from slag produced by base- and precious-metal smelting at abandoned mine sites. – *Applied Geochemistry*, 19, 1039–1064.

- Pluskal, O. – Zajíček, P. (1985): Pfaffenhovská dislokační zóna v Jihlavském rudním revíru. *Časopis pro mineralogii a geologii*, 30, 337–351.
- Pluskal, O. – Vosáhlo, J. (1998): Jihlavský rudní obvod. – *Vlastivědný sborník Vysočiny*, 13, 157–191.
- Puziewicz, J. – Zainoun, K. – Bril, H. (2007): Primary phases in pyrometallurgical slags from a zinc-smelting waste dump, Świętochłowice, Upper Silesia, Poland. – *The Canadian Mineralogist*, 45, 1189–1200.
- René, M. (2004): Amfibolity v moldanubiku mezi Humpolcem a Jihlavou. – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2004*, 113–115.
- Rous, P. – Vilímek, L. – Malý, K. (2004): Opevněné polohy na Jihlavsku a Havlíčkobrodsku pravděpodobně související se středověkým hornictvím. – *Stříbrná Jihlava 2004*, 113–127.
- Slobodník, M. – Jacher-Śliwczynńska, K. – Taylor, M. C. – Schneider, J. – Dolníček, Z. (2008): Plumbotectonic aspects of polymetallic vein mineralization in Paleozoic sediments and Proterozoic basement of Moravia (Czech Republic). – *International Journal of Earth Science*, 97, 1–18.
- Ströbele, F. – Wenzel, T. – Kronz, A. (2010): Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany) – an approach to process reconstruction. – *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2, 191–215.
- Svěrák, Z. (1995): Prospektorská činnost Josefa Čecha na Jihlavsku koncem 19. a začátkem 20. století. – *Stříbrná Jihlava 1995*, 52–55.
- Šamalová, E. (2007): Zaniklý středověký hutnický areál Plandry u Jihlavy. – *Stříbrná Jihlava 2007*, 228–237.
- Vaněk, V. – Velebil, D. (2007): Staré hutnictví stříbra. – *Stříbrná Jihlava 2007*, 188–205.
- Vaněček, M. – Patočka, F. – Pošmourný, K. – Rajlich, P. (1985): The use of isotopic composition of ore lead in metallogenic analysis of the Bohemian Massif. – *Rozpravy Československé Akademie věd, řada matematických a přírodních věd*, 95, 5, 1–114.
- Vaughan, J. D. – Craig, R. J. (1978): *Mineral Chemistry of the Metaloid Sulfides*. – Cambridge University Press, 1–493.
- Verner, K. – Žák, J. – Hrouda, F. – Holub, F. V. (2006): Magma emplacement during exhumation of the lower- to mid-crustal orogenic root: The Jihlava syenitoid pluton, Moldanubian Unit, Bohemian Massif. – *Journal of Structural Geology*, 28, 1553–1567.
- Veselá, M. (1976): Jihlavská brázda ve vývoji geologické stavby okolí Jihlavy. – *Sborník geologických věd, Geologie*, 28, 189–205.
- Veselá, M. (1991): Geologická mapa ČR, list 23–23 Jihlava, 1:50 000. – Český geologický ústav. Praha.
- Vosáhlo, J. (1995): Metody vyhledávání a průzkumu stříbrorudných ložisek v rozmezí 13. až 18. století (se zřetelem k Jihlavskému rudnímu revíru). – *Stříbrná Jihlava 1995*, 29–43.

- Vosáhlo, J. (1999): Přehled historie jihlavského hornictví. – Dolování stříbra a mincování v Jihlavě, 52–65.
- Vosáhlo, J. (2004): Hornická činnost na starohorské dislokační zóně z pohledu historických pramenů. – Stříbrná Jihlava 2004, 22–32.
- Zajíček, P. (1983): Ocenění zásob Ag v jihlavském rudním revíru. – Časopis pro mineralogii a geologii, 28, 197–207.
- Zatloukal, R. – Zimola, D. (1999): Hornická kolonizace Jihlavska z pohledu archeologie. – Dolování stříbra a mincování v Jihlavě, 28–39.
- Zmeškalová, B. (2010): Mineralogické studium artefaktů po železářské výrobě v okolí Bystřice pod Hostýnem. – MS, diplomová práce, Univerzita Palackého. Olomouc.
- Žák, J. – Verner, K. – Finger, F. – Faryad, S. W. – Chlupáčová, M. – Veselovský, F. (2011): The generation of voluminous S-type granites in the Moldanubium unit, Bohemian Massif, by rapid isothermal exhumation of the metapelitic middle crust. – Lithos, 121, 25–40.