

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 4: Biologie, geografie a geologie

Uranové zrudnění v tercierních pískovcích v Chebské pánvi: Projev migrace uranu ze smrčinského granitu

**Patrik Pernický
Zlínský kraj**

Poličná 2024

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 4: Biology, geography a geology

Uranium mineralization in Tertiary sandstones in the Cheb basin: Manifestation of uranium migration from the Smrčín granite

Autoři: Patrik Pernický,

**Škola: Gymnázium Františka Palackého Valašské Meziříčí,
Husova 146/2, 757 01 Valašské Meziříčí**

Kraj: Zlínský kraj

**Školitel: doc. Mgr. Viktor Goliáš, Ph.D, Univerzita Karlova,
Přírodovědecká fakulta, Albertov 6, Praha 2**

Poličná 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Poličné dne 22. 3. 2024

Patrik Pernický

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému školiteli doc. Mgr. Viktoru Goliášovi, Ph.D. za to, že i při mém nabitém programu a vedení několika bakalářských, diplomových a disertačních prací si vzal mou SOČ pod svá křídla. Věnoval mi svůj čas, mnohé mě naučil a vedl mě celou touto prací. Děkuji, moc si toho vážím.

Velký dík také patří Mgr. Janu Rálišovi, Ph.D. z Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži za jeho laskavý přístup při realizaci celoplošných autoradiografií. Mgr. Janu Kulhánkovi, Ph.D., za rady a zácvik na řezání hornin na pomaloběžné petrolejem chlazené pile. Ing. Miroslavu Lorencovi z Chemického ústavu fakulty UK, za proškolení BP práce v chemické laboratoři a pomoc se zhotovením aparatury na alfa-autoradiografii. Mileně Vostře a Mgr. Martě Tomkové z ÚPSG za vyhotovení výbrusů. Chtěl bych poděkovat i Mgr. Jakubovi Kopeckému Plášilovi, Ph.D., za přivedení k této SOČ. Děkuji, bylo mi ctí pracovat s Vámi všemi.

V neposlední řadě mé poděkování patří panu řediteli gymnázia Františka Palackého ve Valašském Meziříčí - Mgr. Mojmiru Zetkovi a třídnímu učiteli Ing. Bronislavu Zachrdlovi za umožnění práce na SOČ a uvolnění z výuky. Vím, že nejsem ideální student, ale tahle práce pro mě byla velkým přínosem a poznáním. Za ochotu a pomoc bych chtěl poděkovat rovněž RNDr. Petru Rojíkovi, Ph.D. a Bc. Dominiku Novákovi.

Závěrem bych chtěl poděkovat mé mamince Aleně Pernické, za to, že jsi mou oporou v životě jak v dobách radosti, tak i v dobách výzev a obtíží.

Anotace

Tato práce se zabývá uranovým zrudněním v terciérních pískovcích ložiska Velký Luh v Chebské pánvi. Toto ložisko bylo objeveno v 60. letech 20. stol. uranovým průzkumem a dosud nebylo těženo. Byla zde popisována zajímavá vazba uranu na oxidy a hydroxidy železa. V rámci nové práce byl zkoumán výchoz podobného zrudnění jižněji, nazvaný Velký Luh – jih. Výchoz zrudnění má rozlohu cca 100 x 250 m. V maximu dávkový příkon záření gama dosahuje až 507 nGy/h. Z odebraných vzorků byl laboratorně naměřen obsah v rozmezí 168–626 ppm U a u části vzorků byl pozorován přebytek uranu nad dceřiným radiem. Velkoplošné autoradiografie ukazují nejčastěji páskované a hnízdovité textury vázané na železitý tmel pískovců. Aktivní polohy nerespektují sedimentární vrstevnatost a svědčí o epigenetickém typu zrudnění. Z možných nositelů uranu byl RTG difrakcí identifikovány goethit a minerály skupiny hydratovaných Mn oxidů (birnessit a kryptomelán).

Klíčová slova

Velký Luh, Chebská pánev, uranové zrudnění, uranové ložisko

Annotation

This work deals with uranium mineralization in the Tertiary sandstones of the Cheb Basin of the Velký Luh deposit. This deposit was discovered in the 1960s uranium exploration and has not yet been mined. The interesting bonding of uranium to iron oxides and hydroxides was described here. As part of the new work, an outcrop of similar ore formation further south, called Velký Luh – south, was investigated. The outcrop of ore has an area of approximately 100 x 250 m. At its maximum, the dose rate of gamma radiation reaches up to 507 nGy/h. The content of the collected samples was measured in the laboratory in the range of 168–626 ppm U, and an excess of uranium over the daughter radium was observed in some of the samples. Large-area autoradiographs show most often banded and nest-like textures bound to the ferruginous cement of the sandstones. The active positions do not respect the sedimentary layering and testify to the epigenetic (infiltration) type of mineralization. Among the possible carriers of uranium, goethite, and minerals of the group of hydrated Mn oxides (birnessite and cryptomelane) were identified by X-ray diffraction.

Keywords

Velký Luh, Cheb basin, uranium ore, uranium deposit

Obsah

1	Úvod a cíle práce	10
2	Dosavadní poznatky.....	11
2.1	Chebská pánev	11
2.2	Smrčinský granit	13
2.3	Uranové ložisko Velký Luh.....	13
3	Metodika	15
3.1	Terénní práce na lokalitě.....	15
3.2	Terénní gama spektrometrie	15
3.2.1	Indikační měření gama aktivity	15
3.3	Laboratorní práce – plán	16
3.4	Laboratorní práce – hygiena	16
3.5	Laboratorní gama spektrometrie.....	16
3.6	Zhotovení velkoplošných řezů.....	17
3.7	Velkoplošná autoradiografie v ÚJF Řež.....	17
3.8	Prášková rentgenová difrakce	18
3.9	Zhotovení výbrusů	19
3.10	Alfa-autoradiografie.....	20
4	Výsledky:.....	21
4.1	Gama spektrometrické mapování	21
4.2	Petrografický popis odebraných vzorků	22
4.3	Obsahy radionuklidů podle laboratorní gama spektrometrie.....	23
4.4	Prášková RTG difrakce.....	26
4.5	Velkoplošná autoradiografie.....	27
5	Diskuze	30
6	Plány na pokračování.....	30
7	Závěr	31
8	Použitá literatura	31

Seznam obrázků a tabulek:

Obrázek 1: Schematický přehled stratigrafie terciéru v pánvích chebské a sokolovské. Upraveno dle tabule Shrbeného et al. in KLOMÍNSKÝ et al. (1994) a studie MALKOVSKÉHO (1995)	11
Obrázek 2: Mapka českého masivu s vyznačením zkoumané oblasti. Zdroj: Mísař et al. 1982.....	12
Obrázek 3: Základní rozdělení krušnohorské oblasti na dílčí jednotky. Zdroj: Mísař et al. 1982.....	12
Obrázek 4: Mapa smrčinského granitu. Převzato z: http://www.geopark-bayern.de , modifikováno z práce Hechta (1997)	13
Obrázek 5: Geologická mapa 1:50000 s legendou.....	14
Obrázek 6: Korelační schéma výskytu uranové mineralizace na ložisku Velký Luh (upraveno podle Obra 1973)	14
Obrázek 7: Měření anomálie na lokalitě Velký Luh. Foto: P. Pernická, 2023.....	16
Obrázek 8: Stínící sud s detektorem a spektrometr Canberra DSA 2000. Foto: P. Pernický, 2024.....	17
Obrázek 9 Laboratorní gama spektrometr. Foto: P. Pernický, 2023.....	17
Obrázek 10: Zakládání autoradiografií. Foto: P. Pernický 2024.....	18
Obrázek 11: Vnitřek horké komory s autoradiografiemi. Foto: P. Pernický 2023.....	18
Obrázek 12: Rentgenový difraktometr X'Pert PRO (PANalytical) s měděnou rentgenovou lampou. Foto: P. Pernický, 2023.....	18
Obrázek 13: Náskres sestavení aparatury pro vakuové napouštění vzorků. Zdroj: P. Pernický, 2024.....	19
Obrázek 14: Schéma sestavení aparatury pro vakuové napouštění vzorků. Foto: P. Pernický, 2024.....	19
Obrázek 15: Založení alfa-autoradiografie. Foto: P. Pernický, 2023.....	20
Obrázek 16: Mapa dávkového příkonu záření gama na lokalitě Velký Luh – jih. Sestaveno z 1269 jednotlivých měření, uspořádaných do vizuálně patrných měřících tras.....	21
Obrázek 17: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu (U) a thoria (Th).....	24

Obrázek 18: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu (U) a draslíku (K).....	24
Obrázek 19: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem thoria (Th) a draslíku (K).....	25
Obrázek 20: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu a radia. Linie vyjadřuje radioaktivní rovnováhu $Ra/U = 1$	25
Obrázek 21: Velkoplošný řez SS. Foto: P. Pernický, 2023.....	27
Obrázek 22: Celoplošná autoradiografie, vzorek SS. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.....	27
Obrázek 23: Velkoplošný řez VL-1. Foto: P. Pernický, 2023.....	28
Obrázek 24: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-1. Foto J. Ráliš, P. Pernický, 2023.....	28
Obrázek 25: Velkoplošný řez VL-2. Foto: P. Pernický, 2023.....	28
Obrázek 26: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-2. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.....	28
Obrázek 27: Velkoplošný řez VL-3. Foto: P. Pernický, 2023.....	29
Obrázek 28: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-3. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.....	29
Obrázek 29: Velkoplošný řez VL-4. Foto: P. Pernický, 2023.....	29
Obrázek 30: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-4. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.....	29
Tabulka 1: Petrografický popis odebraných vzorků na zkoumané lokalitě.....	22
Tabulka 2: Výsledky měření obsahu radionuklidů U, Th a K metodou laboratorní gama spektrometrie.....	23
Tabulka 3: Výsledky mineralogické fázové analýzy metodou práškové RTG difrakce.....	26

Seznam příloh:

Příloha 1: Prášková rentgenová difrakce, vzorek VL-1

Příloha 2: Prášková rentgenová difrakce, vzorek VL-2

Příloha 3: Prášková rentgenová difrakce, vzorek VL-3

Příloha 4: Prášková rentgenová difrakce, vzorek VL-4

Příloha 5: Prášková rentgenová difrakce, vzorek SS

Příloha 6: Poster představený na Otevřeném geologickém kongresu ČGSpol. a SGS Sepetná 2023

Použité zkratky:

PřF UK	Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
SOČ	Středoškolská odborná činnost
ÚGMNZ	Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, PřF UK
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu v Řeži
ÚJF	Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i
PXRD	prášková rentgenová difrakce
ICDD	The International Centre for Diffraction Data
ÚPSG	Ústav petrologie a strukturní geologie, PřF UK
CUNI	Charles UNiversity (Karlova univerzita)
BP	bezpečnost práce

1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Ložisko Velký Luh bylo zmapováno v rámci uranového průzkumu v 60. letech 20. století. Z pohledu chemismu je ovšem ojedinělé, protože vše naznačuje, že záchyt uranu na pískovcích je v oxidačním režimu. Tehdejší mineralogické hodnocení je rozporuplné a je nutné tehdejší výsledky znovu ověřit pomocí moderních metod.

Hlavním cílem mé práce je zjištění mineralogické vazby uranu v pískovcích ložiska Velký Luh a s tím související diskuze možnosti vzniku tohoto zajímavého genetického typu zrudnění.

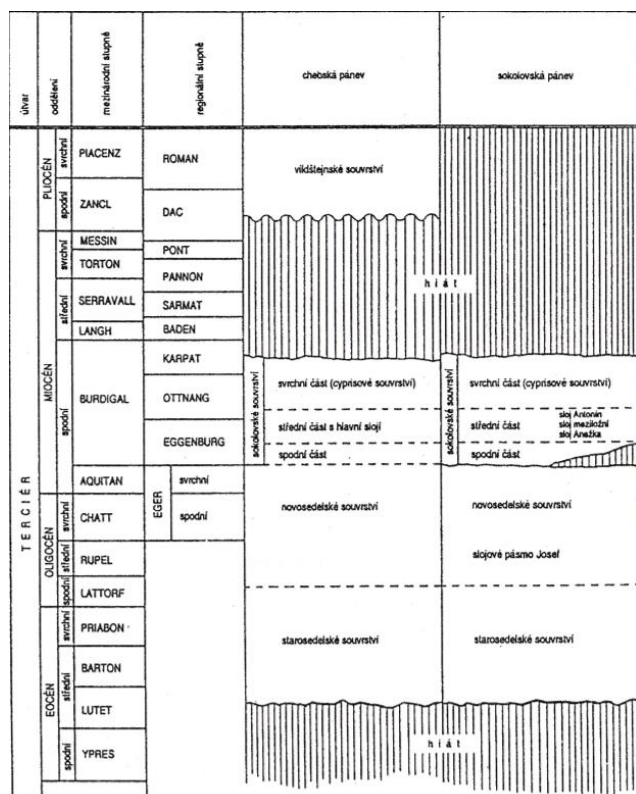
V rámci SOČ už v roce 2018 pracoval (tehdy) středoškolský student Jakub Mahr. Tuto práci ale vzhledem k covidovým opatřením nedokončil. V rámci této práce Jakub pod vedením školitele (VG) provedl několik počátečních činností: terénní gama spektrometrií naměřil výchoz ložiskové polohy, odebral několik vzorků hornin a v laboratoři ÚGMNZ (PřF UK) provedl laboratorní gama spektrometrii. Data však zůstala nezpracována a práce byly přerušeny. Téma tak bylo znovu nabídnuto jako SOČ v rámci CUNI. Pokud práce prováděl můj předchůdce Jakub Mahr, je to v dalším textu výslovně uvedeno, stejně tak, pokud práce prováděl můj školitel (VG), neoznačené pasáže jsou výsledkem mé práce.

2 DOSAVADNÍ POZNATKY

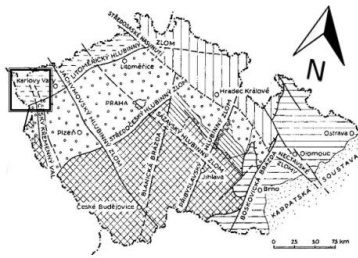
2.1 Chebská pánev

Je to nejzápadnější podkrušnohorská pánev s rozlohou více než 300 km², ležící na linii oherského riftu. Na V je morfologicky výrazná hranice – pokračování mariánskolázeňského zlomu, který se s oherským riftem v této části zemské kůry kříží.

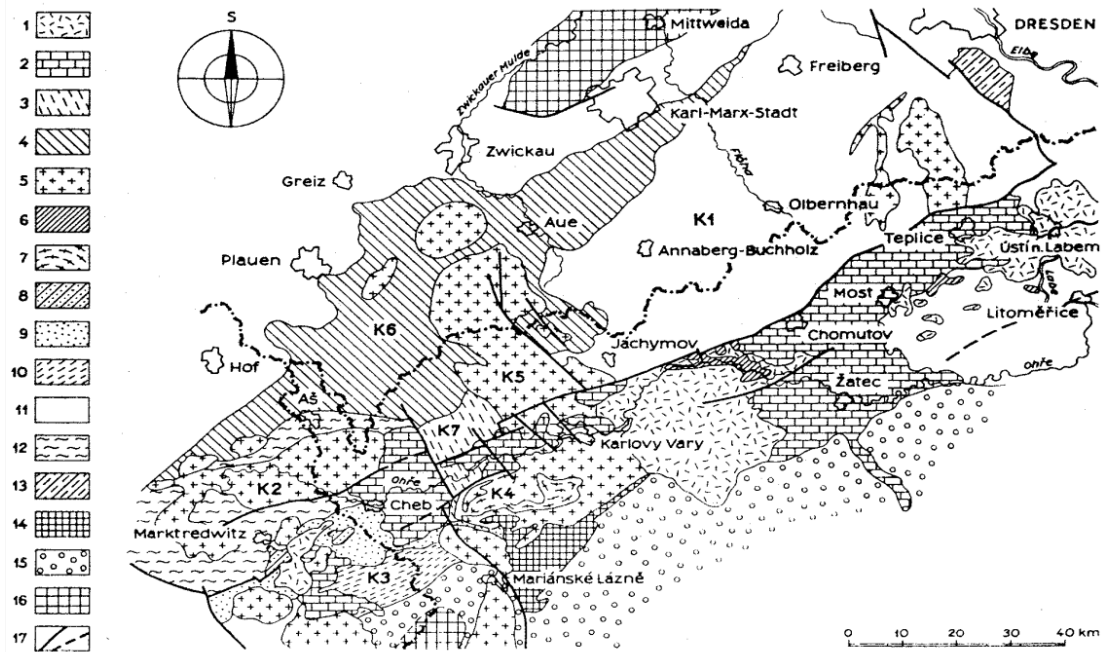
Ze stratigrafické tabulky je patrné, že chebská pánev je vyplněna sedimenty eocenního a pliocenního stáří. V nejspodnější části se nachází krystalinikum, na které sedají pánevní sedimenty starosedelského souvrství. Dochází zde k vyplňování morfologických nerovností a tektonických depresí – nejsou na celém pánevním dně. Sedimenty starosedelského souvrství jsou kryty mladšími usazeninami a nevystupují na povrch. Výskyt byl dokázán vrty i v oblasti Velkého Luhu. Následující novosedelské souvrství byla prokázána rovněž vrty v hlubších částech pánve, taktéž nepokrývá celé starosedelské souvrství. Místy transgreduje na i na krystalinikum. Střední část sokolovského souvrství tvoří organogení sedimenty. Svrchní část je označována jako cyprisové souvrství. Svrchní část a poslední terciérní sedimentační souvrství se nazývá vildštejnské. Je velmi významné ohledně výskytu kvalitních pórových a vázaných jíílů. Ty se zde aktivně těží od našeho ložiska JV směrem cca 2,5 km (Burda 1998). Ložisko sekundárního kaolínu je v současnosti těženo severně od našeho výskytu (Sedlecký Kaolín), blíže Velkému Luhu. Ložisko kvalitního písku se nachází i přímo v nadloží uranového ložiska Velký Luh. Je dlouhodobě těženo (LB Minerals).



Obrázek 1: Schematický přehled stratigrafie terciéru v pánvích chebské a sokolovské. Upraveno dle tabule Shrbeného at al. in KLOMÍNSKÝ et al. (1994) a studie MALKOVSKÉHO (1995). Zdroj: Burda 1998.



Obrázek 2. Mapa českého masivu s vyznačením zkoumané oblasti. Zdroj: Misař et al. 1982.



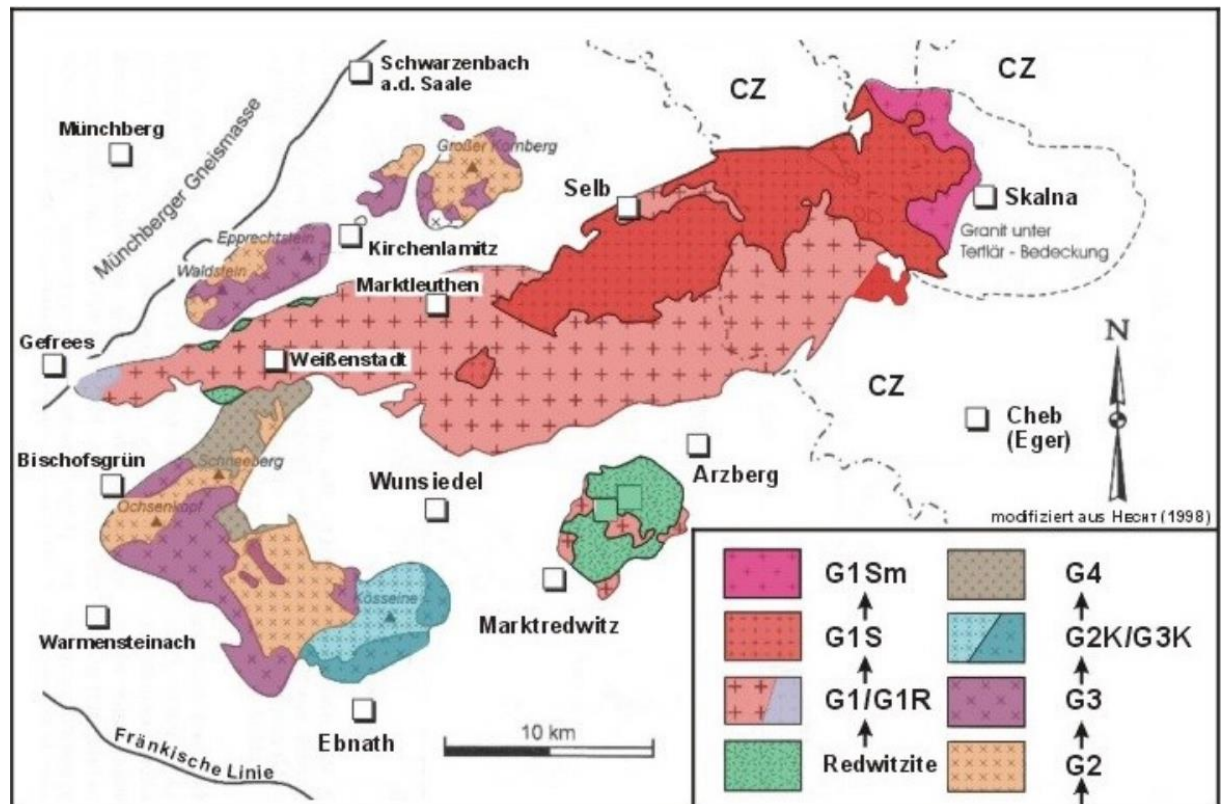
Obrázek 3: Základní rozdělení krušehorské oblasti na dílčí jednotky. Zdroj: Misař et al. 1982.

Vysvětlivky k mapě:

1 vulkanity oháreckého příkopu, 2 převážně terciární sedimenty oháreckého příkopu, 3 svatavské krystalinikum, 4 vogtlandsko-saské paleozoikum, 5 krušehorský pluton a ostatní granitoidní masívy včetně křemenných porfyrů, 6 krystalinikum v podloží oháreckého příkopu, 7 slavkovské krystalinikum, 8 dvojslídne ortoruly neznámého stáří, 9 chebské krystalinikum, 10 dyleňské krystalinikum, 11 krušehorské krystalinikum, 12 smrčinské krystalinikum, 13 Labské břidličné pohoří na okraji lugické oblasti, 14 mariánskolázeňský bazický komplex ve střeodočeské oblasti, 15 okraj střeodočeské oblasti, 16 moldanubická oblast a krystalinikum Saského granulitového pohoří, 17 zlomy. Označení podoblastí: K1 krušehorské krystalinikum, K2 smrčinské krystalinikum, K3 chebskodyleňské krystalinikum, K4 slavkovské krystalinikum, K5 krušehorský pluton, K6 vogtlandsko-saské paleozoikum, K7 svatavské krystalinikum

2.2 Smrčinský granit

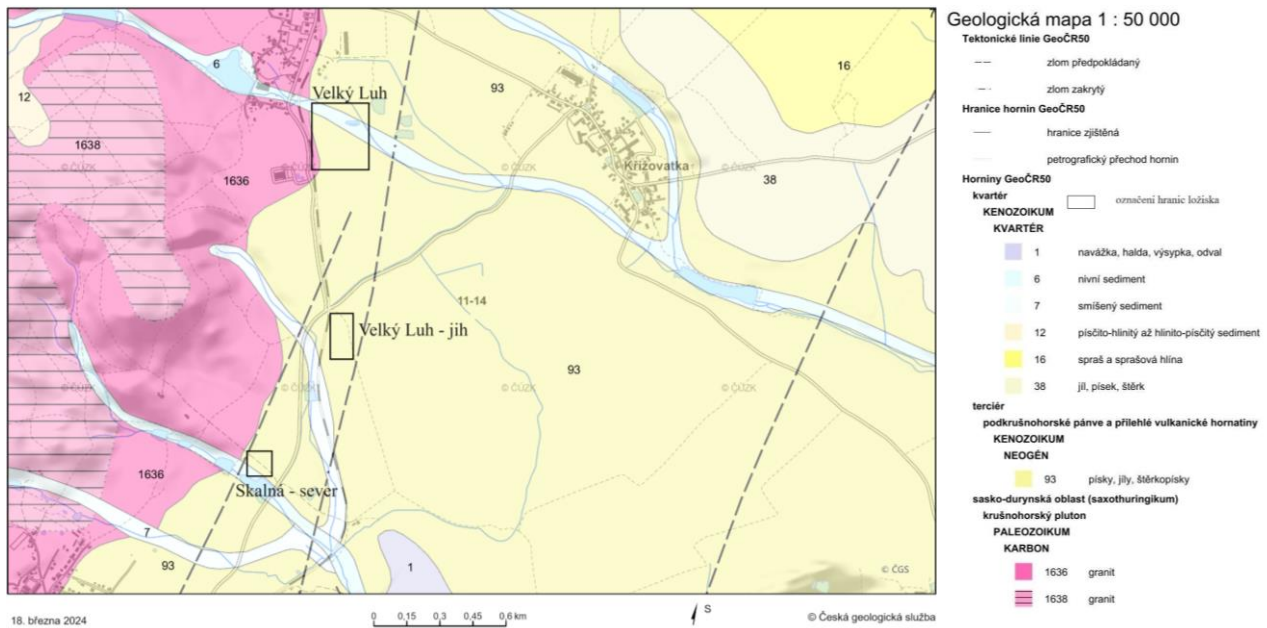
Tento plutonický komplex je poměrně velké těleso, cca 60 km dlouhé a cca 10 km široké. Táhne se směrem od Fichtelbergu v Německu ke Skalné až po Kynšperk nad Ohří (Hejtman 1984). Ve východní části tohoto variského tělesa jsou zastoupeny dva typy granitů – zrnitý dvojslídňý granit a muskovitický granit. V oblasti Skalné a Velkého Luhu se převážně vyskytuje muskovitický granit, místy se sníženým obsahem muskovitu. Granit je typem G1Sm. V Bavorské části masivu se nacházejí vyvěřeliny mladšího intruzivního komplexu. (Burda 1998)



Obrázek 4: Mapa smrčinského granitu. Převzato z: <http://www.geopark-bayern.de>, modifikováno z práce Hechta (1997).

2.3 Uranové ložisko Velký Luh

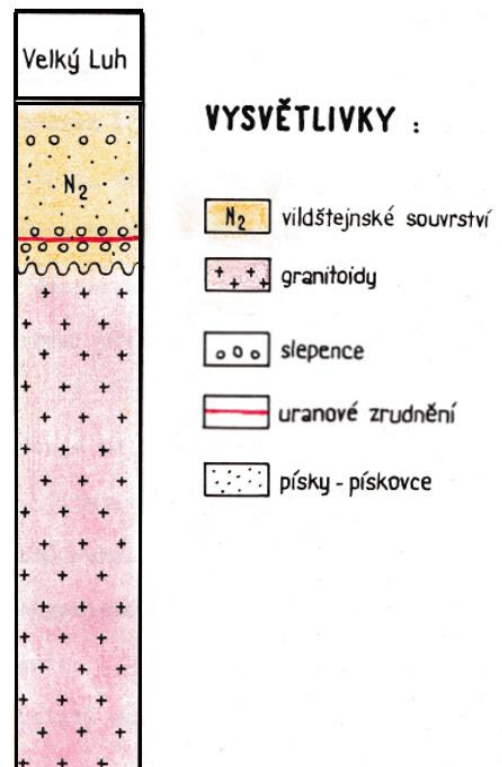
Lokalita se nachází 11,5 km od Chebu mezi obcemi Plesná a Velký Luh v terciálních sedimentech Chebské pánve při transgresivním styku vildštejnského souvrství a granitem smrčinského masivu obr. 1 Nesmíme rovněž opomenout SSZ – JJV depresi původního paleoreliéfu.



Obrázek 5: Geologická mapa 1:50 000 s legendou.

V rámci uranového průzkumu ČSUP Příbram o. z. v 60. letech 20 století zaměřeného na Ašský výběžek a Chebskou pánev bylo toto uranové ložisko ověřeno cca 60 vrty. Rudní polohy byly navrtány na hloubkách 10–75 metrů. Vrtná jádra se nedochovala. Podle různých okrajových vzorků byly spočítány zásoby uranu od 55 do 660 tun a má proto parametry malého uranového ložiska (Plaček 1968). Ložisko Velký Luh nebylo nikdy těženo. Uvažovalo se zde i o chemické těžbě uranu, laboratorní testy však vykázaly nízkou výtěžnost (archiv DIAMO). Uranové zrudnění je vázáno převážně písky, jíly, štěrkopísky s „limonitovým“ tmelem vyskytující se při bázi vildštejnského souvrství (obrázek 6) Tuto litologicky proměnlivou polohu v Českém masivu lze označit jako zcela ojedinělou ukázkou U-zrudnění (Obr. 1973, 1978).

Na povrchu se zde přímo popisované zrudnění nevyskytuje. V tektonicky vyzvedlé malé části ložiska, západněji, blíže okraji pánve, vyvěrají z terciérních jíků radioaktivní (radonové) prameny s aktivitou až přes 3 kBq/l ^{222}Rn (Turnová 2019).



Obrázek 6: Korelační schéma výskytu uranové mineralizace na ložisku Velký Luh. (Převzato a upraveno podle Obrá (1973).

3 METODIKA

3.1 Terénní práce na lokalitě

Lokalita byla poprvé navštívena během rozsáhlého výzkumu v roce 2016–2018 v rámci výzkumů vázaných na tvorbu diplomové práce Mgr. Štěpánky Turnové zaměřené na výzkum léčivých radioaktivních minerálních pramenů v oblasti Skalné – Bad Brambachu (Turnová 2019). V této době bylo konstatováno, že zrudnělé pískovce, podobné, jako byly popsány dříve, zde mají přirozený výchoz, zatímco hlavní ložisko Velký Luh (severně od obce) je skryto pod sedimentárním pokryvem. Pracovně byl tento výchoz nazván jako Velký Luh – jih.

Jak již bylo uvedeno, v rámci rozpracované SOČ Jakuba Mahra bylo provedeno mapování výchozu uranového zrudnění pomocí terénní gama spektrometrie. Z anomálie Velký Luh – jih a přilehlé oblasti Skalná – sever bylo při té příležitosti odebráno z volně ležícího materiálu pět vzorků se zvýšenou gama aktivitou, tedy mineralizovaných pískovců s železitým tmelem a Mn oxidy pro laboratorní studium (vzorky VL -1, VL - 2, VL - 3, VL - 4 a SS).

3.2 Terénní gama spektrometrie

Na lokalitě Velký Luh – jih byla měřena terénní gama spektrometrie gamaspektrometrem GT-32 od firmy GEORADIS (Brno). Má BGO detektor o objemu 103 cm³ o rozsahu 30 keV – 3 MeV. Přístroj přímo měří koncentrace K, U a Th v jednotkách koncentrace K (%), U (ppm) a Th (ppm) a celkovou gama aktivitu v jednotkách dávkového příkonu záření gama (nGy/h). Detektor byl nesen ve výšce 1 m nad terénem. Data byla sejmuta v dynamickém režimu pomalé chůze a periodického ukládání naměřených dat a GPS pozice. Z naměřených dat (J. Mahr) byla vytvořena podrobná mapa v programu Surfer (VG a kolektiv), která nově byla zasazena do aktuální topografické situace a byly vyhodnoceny kvantitativní údaje výsledků. Byl tak určen celkový rozsah a parametry této anomálie.

3.2.1 Indikační měření gama aktivity

V roce 2023 byla provedena rekognoskace lokality za použití scintilačního radiometru RP-103 se sondou RS-108 (výrobce ZMA Ostrov na Ohří). Přístroj byl kalibrován na povrchovém uranovém standardu ve Stráži pod Ralskem (<http://gammastandard.com>). Údaje naměřené v imp/s lze přepočítat podle kalibrační konstanty na hodnoty dávkového příkonu záření gama (nGy/hod).



Obrázek 7: Indikační měření anomálie na lokalitě Velký Luh. Foto: A. Pernická, 2023.

3.3 Laboratorní práce – plán

V dalším kroku bylo potřeba U vzorky rozřezat, provést laboratorní gamma spektrometrii – tím stanovit koncentrace K, U a Th. analyzovat vzorky rentgenovou difrakcí. Ve spolupráci s ÚJF Řež zhotovit u jednotlivých vzorků celoplošnou autoradiografii. Následně nechat v laboratoři ÚPSG (CUNI) vyhotovit leštěné výbrusy. U výbrusy budeme zkoumat jak pod mikroskopem, tak provedeme ještě autoradiografii, a nakonec podrobné zkoumání pod rastrovacím mikroskopem (mikrosonda).

3.4 Laboratorní práce – hygiena

Všechny operace byly prováděny se zřetelem na charakter těchto přírodních vzorků, tedy byly dodržovány základní hygienické návyky a zavedené postupy, zejména k eliminaci kontaminace. Jednotlivé operace byly prováděny v laboratořích UGMNZ (CUNI) po školení BP, v laboratorním plášti, prašné operace pod odtahem, bylo pracováno na omyvatelných površích. Stroje, nástroje, povrchy i části těla prošly vždy po práci suchou či mokrou očistou.

3.5 Laboratorní gama spektrometrie

Vzorky byly nadrceny čelistovými drtiči na frakci menší než 3 mm a byly vsypány do Marinelliho nádob o objemu 0,5 l a zváženy. Poté kvůli dosažení radioaktivní rovnováhy mezi ^{226}Ra a ^{222}Rn byly Marinelliho nádoby uzavřeny na cca 14 dní v nízkopozadové gama radiometrické laboratoři UGMNZ na Přírodovědecké fakultě univerzity Karlovy v Praze. Použitý přístroj byl laboratorní gama spektrometr s detektorem Harshaw NaI(Tl) 75x75 mm ve

stínící komoře, ovládaný multikanálovým spektrometrem DSA 2000 Canberra, (viz obrázek 8 a 9).

U vzorků byly měřeny 4 radionuklidy: U na energetické linii ^{234}Th (93 keV), Th na linii ^{212}Pb (239 keV), eU(Ra) na linii ^{214}Pb (352 keV) a ^{40}K na linii 1461 keV. Přístroj byl po každém měření stabilizován kalibračním zdrojem ^{137}Cs . Přepočet hodnot byl proveden podle standardů IAEA: RGU-1, RGTh-1, RGK-1 (J. Mahr). Nově byly vyhodnoceny a zobrazeny výsledky.



Obrázek 8: Stínící sud s detektorem a spektrometr Canberra DSA 2000. Foto: P. Pernický, 2024.

Obrázek 9: Laboratorní gama spektrometr. Foto: P. Pernický, 2024.

3.6 Zhotovení velkoplošných řezů

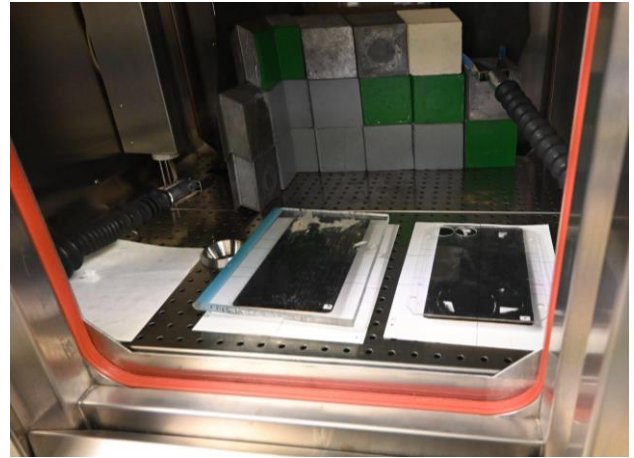
V laboratoři ÚPSG bylo na pomaloběžné pile Lapidary Slab Saw (Panther) provedeny řezy kolmo na sedimentární texturu horniny. Výsledné řezy byly použity pro celoplošnou autoradiografii.

3.7 Velkoplošná autoradiografie v ÚJF Řež

Na pracovišti v ÚJF v Řeži byly pomocí přístroje Cyclone® Plus Imaging system (Perkin Elmer) zhotoveny velkoplošné autoradiografie. Operátorem přístroje Cyclone® Plus byl Mgr. Jan Ráliš, PhD. Bylo zhotoveno několik cvičných expozií, protože se jednalo o docela specifický úkol, na který tento přístroj nebyl konstruován. Navíc byly řešeny komplikace v podobě zvýšeného radiačního pozadí vlivem kosmického záření a zamoření z dob jaderných testů. Odstínění bylo vyřešeno dekontaminovanou horkou komorou (obrázek 10, 11). Kvalita autoradiografií úměrně rostla s nárůstem času. Expozice byly proto voleny v rozmezí 120–144 hodin. Z výsledků velkoplošné autoradiografie byla následně vybrána místa s největší hustotou zčernání (nejvyšším obsahem uranu) a z nich byly zhotoveny výbrusy a odebrány vzorky na rentgenovou difrakci.



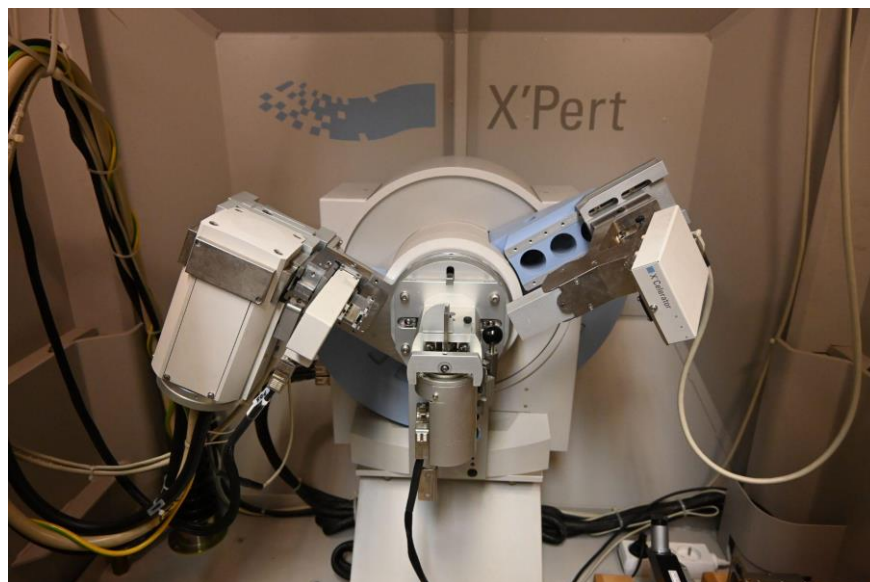
Obrázek 10: Zakládání autoradiografií.
Foto: P. Pernická, 2023.



Obrázek 11: Vnitřek horké komory s autoradiografiemi. Foto: P. Pernický, 2023.

3.8 Prášková rentgenová difrakce

Je to metoda k určení mineralogického složení hornin. Byla provedena pomocí přístroje X'Pert PRO (PANalytical) s měděnou rentgenovou lampou obr. X. Prováděna byla v RTG laboratoři ÚGMNZ (PřF UK) školitelem. Měření byla prováděna v rozmezí $3-60^\circ 2\theta$ s krokem $0.05^\circ 2\theta$ a s časem měření 200 s na kroku.



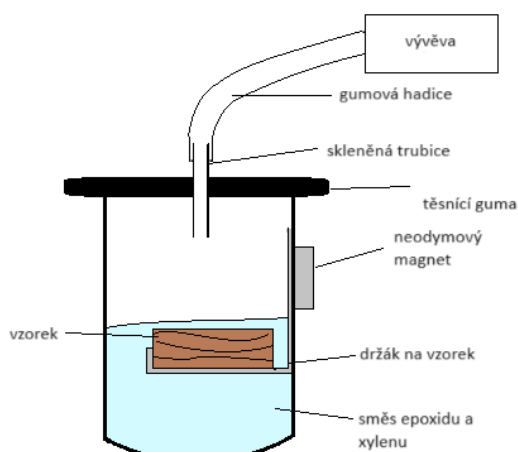
Obrázek 12: Rentgenový difraktometr X'Pert PRO (PANalytical) s měděnou rentgenovou lampou. Foto: P. Pernický, 2024.

Z jednotlivých vzorků bylo z neaktivnějších částí odebráno nepatrné množství horniny a následně v prostředí dimethylketonu rozetřeno v achátové třecí misce. Výsledná suspenze byla nanášena na nosič a ten vložen do PXRD.

Vyhodnocení záznamů práškové rentgenové difrakce a fázová mineralogická analýza byly provedeny v programu Highscore plus (PANalytical) za použití databáze PDF-2 (ICDD).

3.9 Zhotovení výbrusů

Po zhotovení plátků na pomaloběžné pile byly v brusírně ÚPSG (PřF UK) zhotoveny pravoúhlé formáty rozměru petrologického výbrusu. Vzorky pískovců jsou však velmi porézní a před zhotovením je nutno je napustit epoxidem a tím i zpevnit. Po důkladném vyschnutí byly proto napuštěny směsí epoxidu s xylenem. Napouštění vzorků proběhlo v 98 % vakuu. Pro napouštění byla postavena vlastní aparatura za použití zavařovací sklenice, vyřízlého držáku z kovové plechovky, neodymového magnetu, skleněné trubičky jako průchodky vakua, gumové hadičky a tlusté gumy na utěsnění nádoby. Celá sestava byla připojena k vývěvě. Po vyvakuování byl vzorek neodymovým magnetem spuštěn pod hladinu epoxidu a do sklenice byl napuštěn vzduch, který epoxid atmosférickým tlakem zatlačil do pórů horniny. Vzorek byl vytažen a postup byl opakován pro následující vzorek. Schéma aparatury je na obrázku 13 a 14.



Obrázek 13: Nákres sestavení aparatury pro vakuové napouštění vzorků. Zdroj: P. Pernický, 2024.

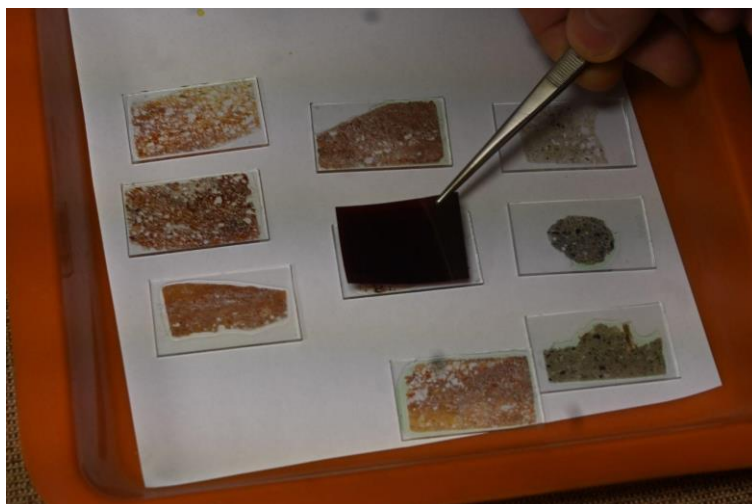


Obrázek 14: Schéma sestavení aparatury pro vakuové napouštění vzorků. Foto: P. Pernický, 2024.

Pro vysokou pórovitost horniny trvalo její následné vysychání a tvrdnutí cca 3 měsíce. Podle vzhledu celoplošných autoradiografií bylo rozhodnuto nechat zhotovit dva výbrusy ze vzorků VL – 1 a VL – 4. Celkem bylo zhotoveno 7 výbrusů. Vzorky byly nalepeny na podložní sklo. Standardně se výbrus lepí za tepla, tomto případě jsme však s ohledem na možný výskyt sekundární mineralizace U přistoupili k lepení za studena. Po nalepení byly vzorky zbroušeny na tloušťku 0,03 mm a povrch byl vyleštěn. Výbrusy zhotovily pracovnice brusírny ÚPSG (PřF ÚK) Mgr. Marta Tomková a Milena Vostrá.

3.10 Alfa-autoradiografie

Ze všech vzorků bylo zhotoveno 7 výbrusů (VL-1, VL-2, VL-3, VL-4, SS) a ze všech byla zhotovena v ÚGMNZ (PřF UK) alfa-autoradiografie. Na výbrusy byly poté položen film Kodak LR-115 A s expozicí cca týden. Založení autoradiografií však již časově koliduje s termínem odevzdání práce SOČ.



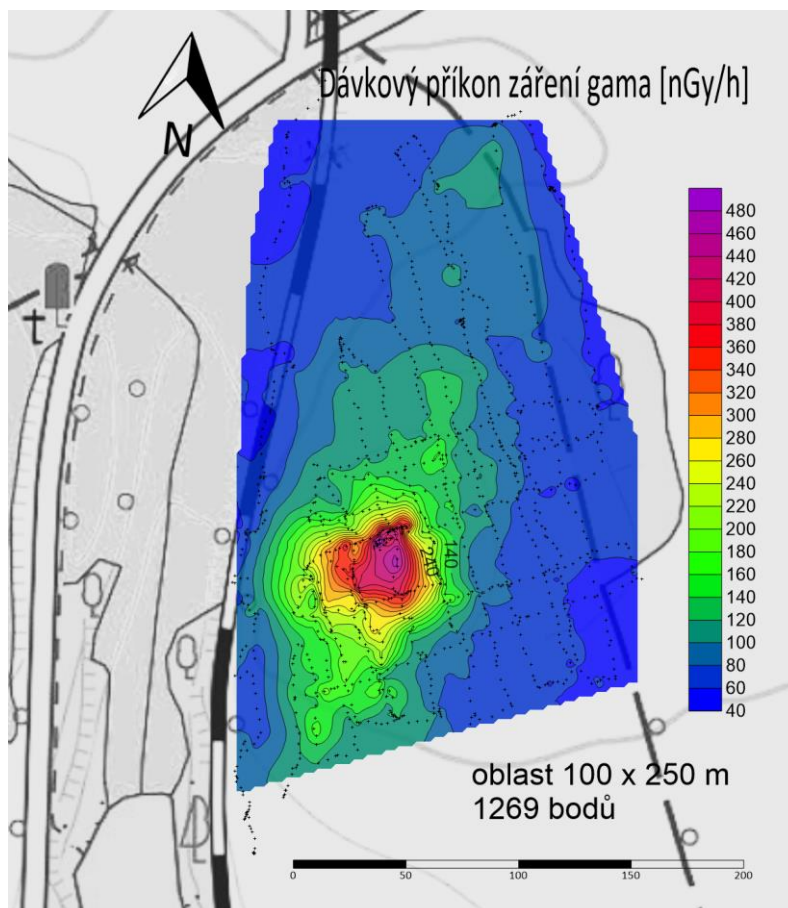
Obrázek 15: Založení alfa-autoradiografie. Foto: P. Pernický, 2024.

4 VÝSLEDKY:

4.1 Gama spektrometrické mapování

Naměřená data Jakuba Mahra byla zpracována v programu Surfer (Golden Software), z něhož byla výsledná radiometrická mapa zasazena do aktuální topografické situace.

Celkem bylo na lokalitě provedeno 1269 měření. Z výsledků terénní gama spektrometrie je patrné, že anomálie tvoří protaženou oblast velikosti 100 x 250 metrů s azimutem 25°, maximy příkonu záření gama 507 nGy/hod a obsahy až 72 ppm eU. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny v jižní části. Zde je i relativně výrazná morfologická elevace, s vysokým podílem úlomků železitých pískovců v půdním pokryvu. Výsledky jsou interpretovány v mapě (obrázek 16), kde fialová barva značí nejvyšší aktivitu a modrá naopak nejnižší.



Obrázek 16: Mapa dávkového příkonu záření gama na lokalitě Velký Luh – jih. Sestaveno z 1269 jednotlivých měření, uspořádaných do vizuálně patrných měřících tras.

4.2 Petrografický popis odebraných vzorků

Tabulka 1: Petrografický popis odebraných vzorků na zkoumané lokalitě.

Vzorek	Lokalita	Petrografický popis terénní/chemický
VL-1	Velký Luh – jih	středně zrnitý křemenný pískovec s pruhy štěrčikové s klasty do 5 mm, nepravidelně prosycený rezavými až okrovými Fe hydroxidy
VL-2	Velký Luh – jih	středně zrnitý křemenný pískovec, nepravidelně prosycený rezavými až tmavě hnědými Fe hydroxidy
VL-3	Velký Luh – jih	středně zrnitý křemenný pískovec s významným podílem štěrkové frakce do velikosti klastů 1 cm, prosycený rezavými až tmavě hnědými Fe hydroxidy
VL-4	Velký Luh – jih	hrubozrnný křemenný pískovec s významným podílem štěrkové frakce do velikosti klastů 1 cm, prosycený rezavými až tmavě hnědými Fe hydroxidy
SS	Skalná – sever	hrubozrnný křemenný pískovec, prosycený okrově rezavými Fe hydroxidy a páskem černých oxidů manganu.

Z výše uvedených popisů vzorků v tab. 1 je patrné, že jsou všechny vzorky pískovce o různé zrnitosti s výskytem klastů štěrkové frakce a s různým obsahem železitého tmelu. U vzorku SS se objevily méně obvyklé oxidy Mn.

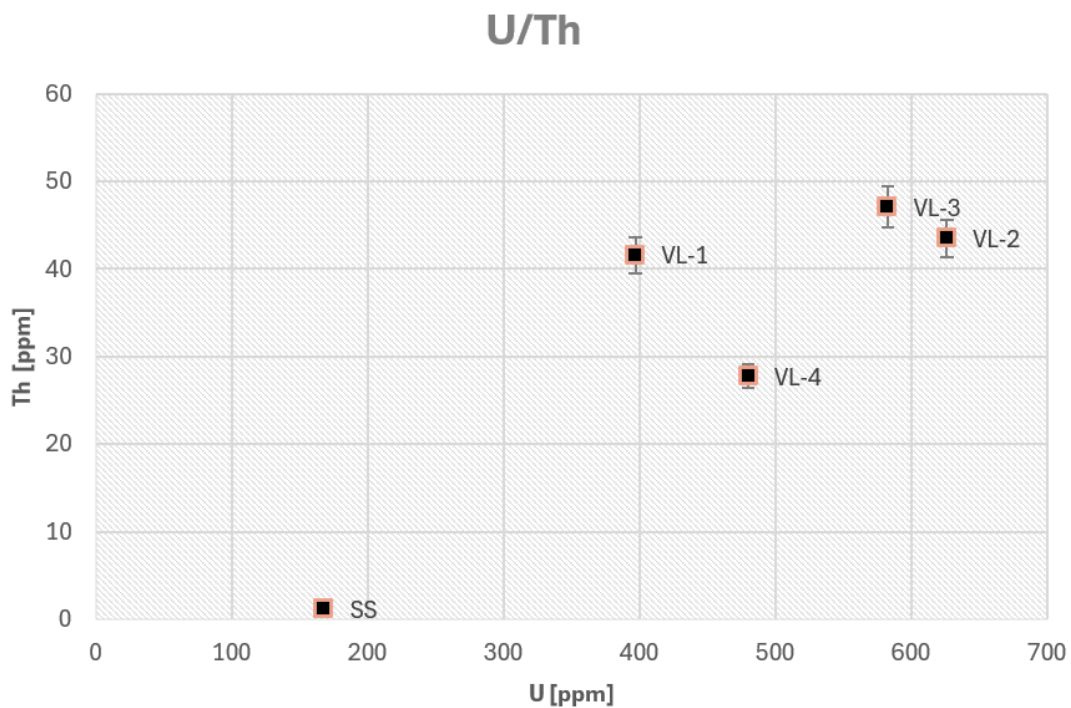
4.3 Obsahy radionuklidů podle laboratorní gama spektrometrie

Celkem bylo měřeno 5 vzorků označených jako VL-1, VL-2, VL-3, VL-4 a SS. Z výsledků laboratorní gama spektrometrie je patrný vysoký obsah U (168,1 – 626,4 ppm) a ekvivalentního uranu; tedy radia U(Ra) (158–490 ppm eU). Poněkud méně věrohodně působí zjištěné zvýšené obsahy thoria (1,2 – 47,1 ppm Th). K je naopak velmi nízký, pozadřový (Tab.2). Lze tedy říct, že vzorky mají obsahy uranu relativně vysoké, kromě Skalné-sever (SS) mají všechny bilanční rudní obsahy (nad 0,03 % U). Vzorky VL-1–3 nejsou zcela dokonale v radioaktivní rovnováze typu Ra/U, je posunuta ve prospěch mateřského uranu (obrázek 20).

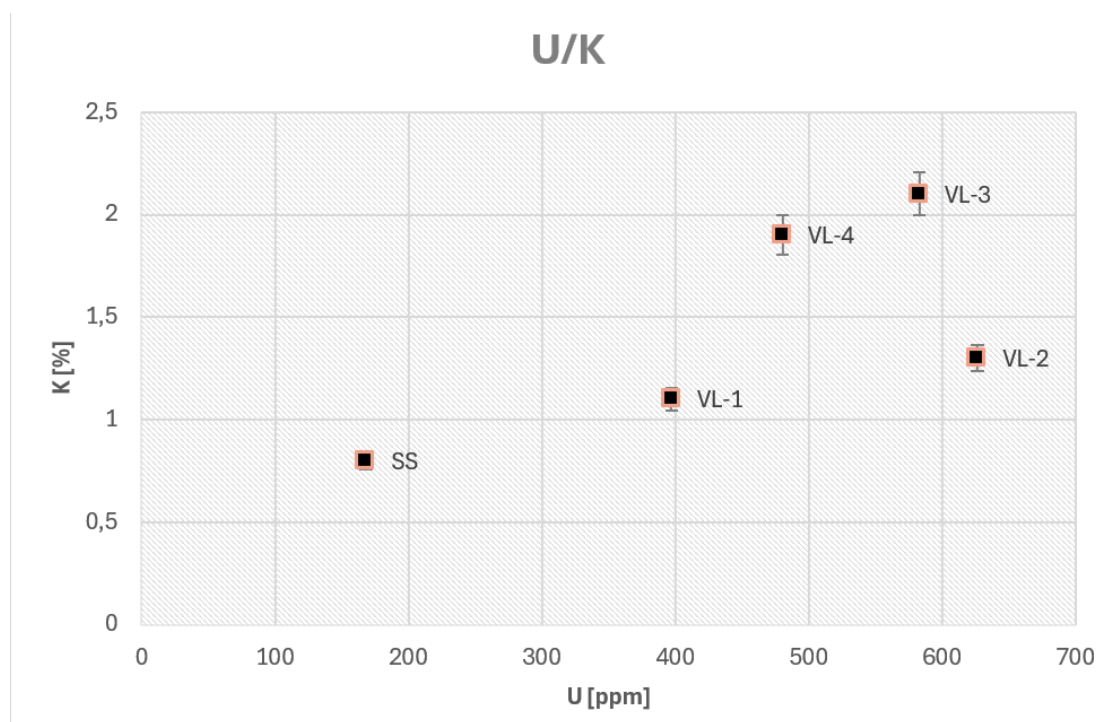
Tabulka 2: Výsledky měření obsahu radionuklidů U, Th, eU (Ra) a K metodou laboratorní gama spektrometrie.

Vzorek	ppm U	sd U	ppm Th	sd Th	ppm eU (Ra)	sd eU (Ra)	% K	sd K
VL-1	397,2	11,7	41,6	3,7	384,4	2,5	1,1	0,5
VL-2	626,4	12,7	43,5	3,7	375,7	2,5	1,3	0,6
VL-3	582,8	13,5	47,1	4,1	490,0	2,8	2,1	0,6
VL-4	480,3	11,8	27,8	3,4	357,6	2,4	1,9	0,6
SS	168,1	8,8	1,2	2,3	158,0	1,9	0,8	0,5

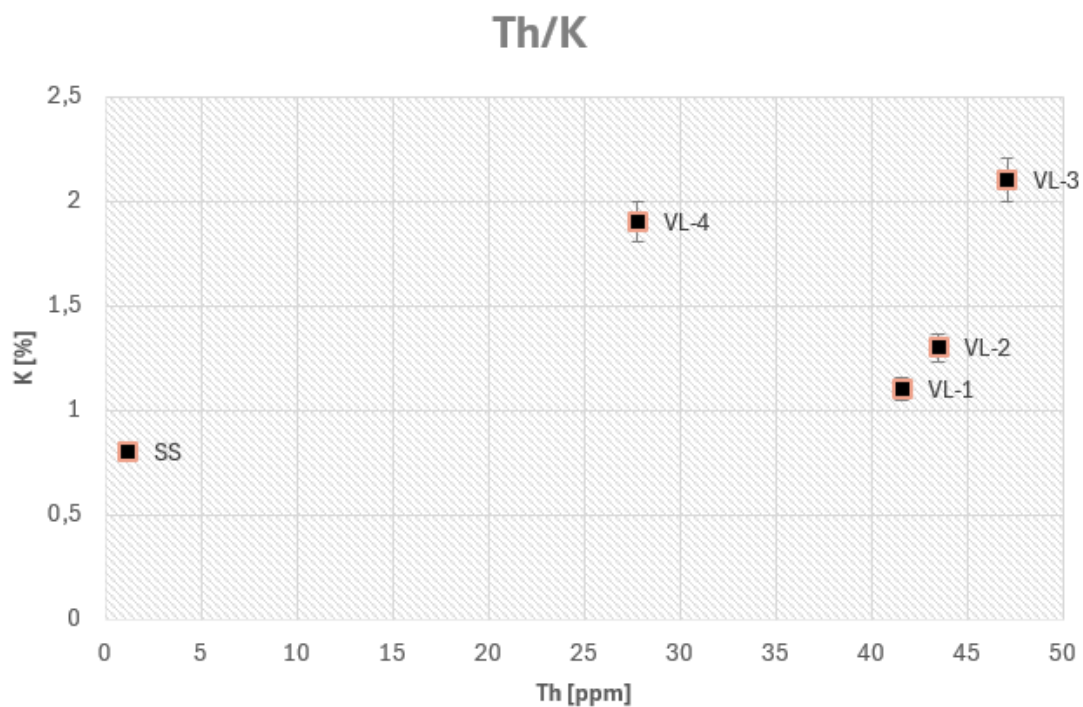
Terciární pískovce označené jako Vzorek SS se od ostatních liší celkovým obsahem radionuklidů, lze tedy uvažovat nad tím, že bude jiný i po stránce chemického složení. Lze předpokládat kromě Fe i výskyt Mn mineralizace. V grafech níže je porovnání mezi uranem a thoriem, draslíkem a mezi thoriem a draslíkem.



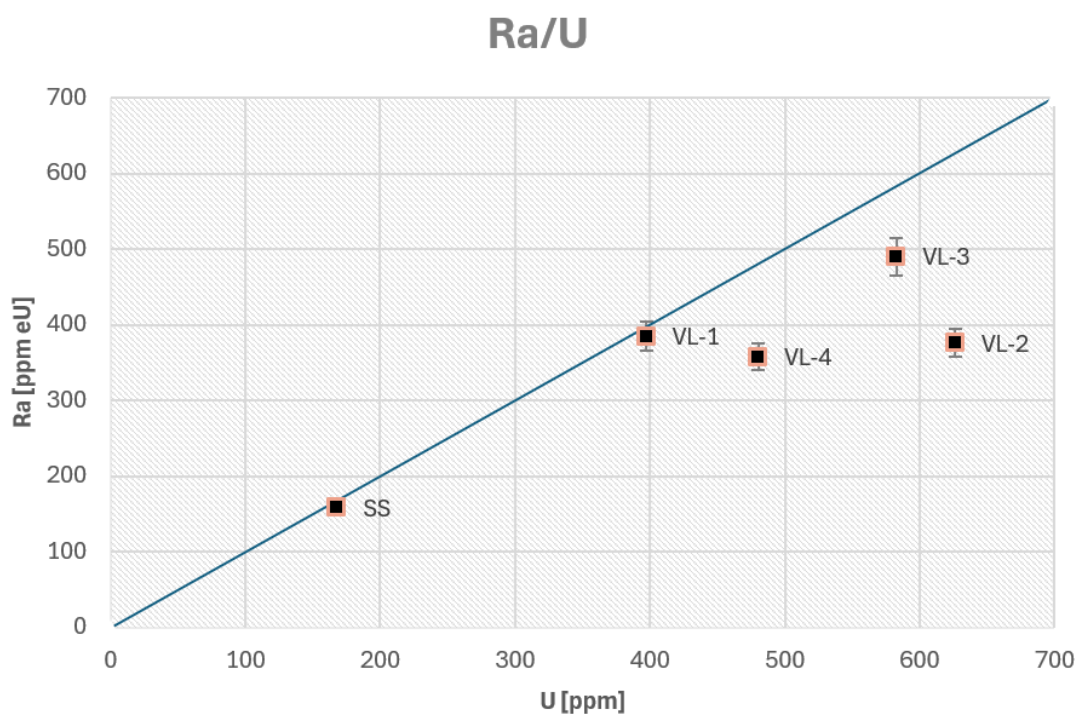
Obrázek 17: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu (U) a thoria (Th).



Obrázek 18: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu (U) a draslíku (K).



Obrázek 19: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem thoria (Th) a draslíku (K).



Obrázek 20: Graf naměřených hodnot laboratorní gamaspektrometrie, porovnání mezi obsahem uranu a radia. Linie vyjadřuje radioaktivní rovnováhu $Ra/U = 1$.

4.4 Prášková RTG difrakce

Metodou PRXD jsme zjistili fázové mineralogické složení odebraných vzorků. U všech vzorků lze jako hlavní fáze označit křemen (trigonální modifikace SiO_2). Vzorek VL-2 obsahuje jako hlavní fázi i muskovit. Jako vedlejší fáze se ve všech případech prokázal výskyt mikroklinu. Vzorek VL-1 jako vedlejší fázi obsahuje muskovit a vzorek VL-2 hydratovaný oxid železa goethit, který zapříčinil rezavé zbarvení odebraných vzorků. U vzorku VL-1 se jako minoritní fáze jeví kakoxen, kaolinit (jílový minerál) a birnessit. Minoritní fází vzorku VL-2 je uhličitan vápenato-železnatý – ankerit. Výsledky jsou podány v tabulce 3.

Z genetického hlediska jsou křemen, živec (mikroklin) a slída (muskovit) klastické, do sedimentu přinesené složky zvětrávající smrčinské žuly. Minerály vzniklé během sedimentárního procesu a diagenese jsou vždy minoritními složkami, v difrakčních záznamech se tedy projevují méně znatelně (nízké intenzity linií) a mohou být i hůře krystalické. Fe-hydroxidy v krystalické formě goethitu ($\alpha\text{-FeOOH}$) byly přesvědčivě prokázány pouze ve vzorku VL-2. V ostatních vzorcích nikoli, přestože jsou vizuálně prosyceny rezavým tmelem podobně. Naopak byly opakovaně potvrzeny minerály ze skupiny hydratovaných oxidů manganu (birnessit, kryptomelán), dále ve dvou případech (VL-1 a VL-3) kakoxen (fosfát Fe^{3+}) a v případě vzorku VL-2 ankerit (Ca-Fe^{2+} karbonát) byly identifikovány jako další nositelé železa.

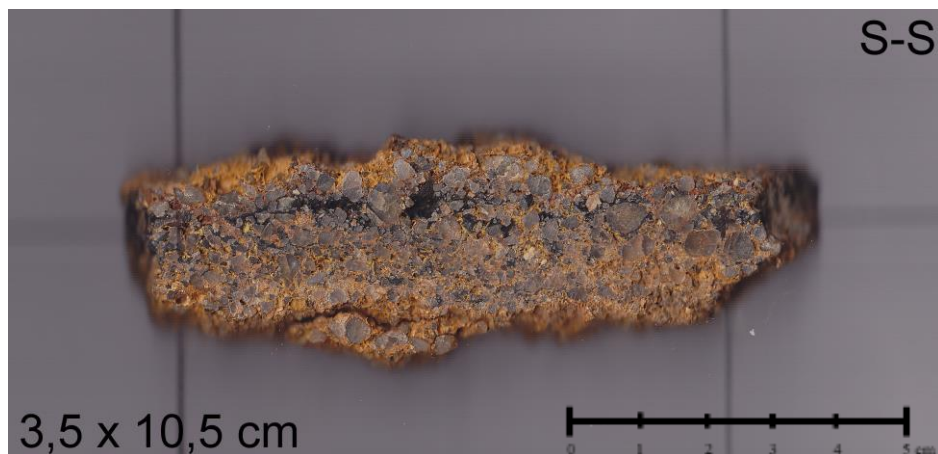
Tabulka 3: Výsledky mineralogické fázové analýzy metodou práškové RTG difrakce.

Vzorek	Hlavní fáze	Vedlejší fáze	Minoritní fáze
VL-1	křemen	muskovit, mikroklin	kakoxen, kaolinit, birnessit
VL-2	křemen, muskovit	mikroklin, goethit	ankerit, birnessit
VL-3	křemen	mikroklin	muskovit, kakoxen, birnessit
VL-4	křemen	muskovit, mikroklin	
SS	křemen	mikroklin	birnessit, kryptomelán

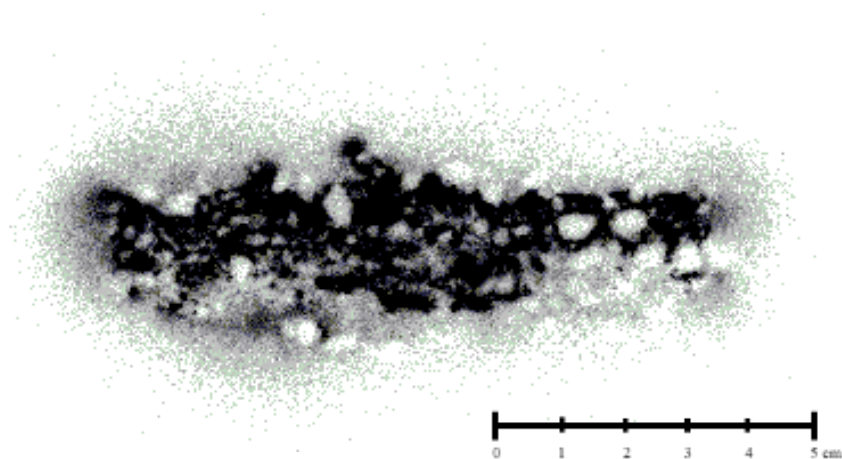
4.5 Velkoplošná autoradiografie

Pomocí velkoplošné autoradiografie byly u vzorků zjištěny plošné distribuce radionuklidů, tedy v našem případě koncentrace uranu a radionuklidů uranové rozpadové řady. Tmavé zóny představují aktivní místa, světlé plošky jsou partie neaktivní vzhledem k typu sedimentární horniny většinou velká zrna křemene (obrázek 22, 24, 26, 28, 30). Získané obrazy velkoplošných autoradiografií jsou nesporně i velmi estetické a vizuálně atraktivní. K autoradiografiím jsou k porovnání přiloženy fotografie velkoplošných řezů se zřetelnou sedimentární texturou (obrázek 21, 23, 25, 27, 29).

Z autoradiografických záběrů lze velmi dobře pozorovat textury uranových rud. U vzorku SS lze vidět zvlněné páskování, nejaktivnější částí je nepravidelný černý pás Mn-oxidů, ale i jeho okolí, kde tyto Mn-oxidy již vizuálně chybí.



Obrázek 21: Velkoplošný řez SS. Foto P. Pernický, 2023.

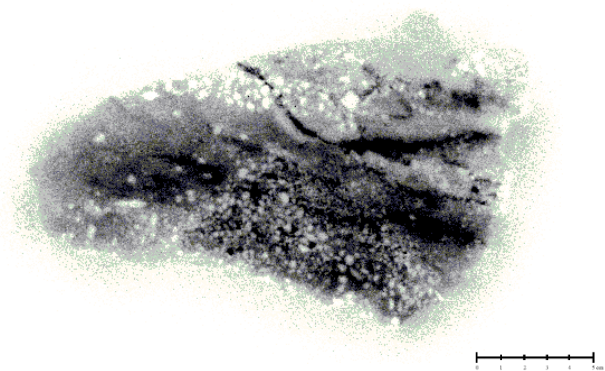


Obrázek 22: Celoplošná autoradiografie, vzorek SS. Foto J. Ráliš, P. Pernický, 2023.

Na vzorku VL-1 je nejzřetelnější aktivní prohnutý pásek vázaný na zónu vybělení v horní polovině vzorku. V dolní části je difúzní pás vyšších aktivit vázán na temně rezavý pískovec.



*Obrázek 23: Velkoplošný řez VL-1.
Foto: P. Pernický, 2023.*

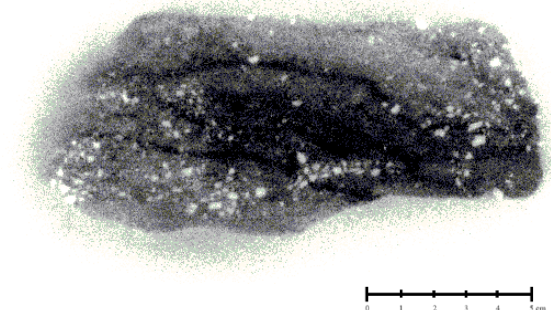


Obrázek 24: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-1. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.

Vzorek VL-2 je naopak paralelně páskovaný. Nejaktivnější jsou pásy sytě rezavých až tmavě hnědých Fe oxidů.



*Obrázek 25: Velkoplošný řez VL-2. Foto:
P. Pernický, 2023.*

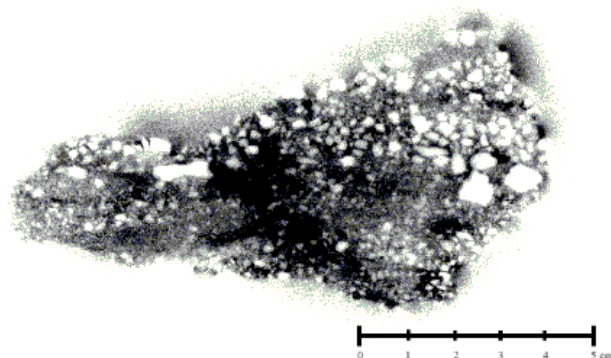


Obrázek 26: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-2. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.

Nejaktivnější částí vzorku VL-3 je difuzní pás vedoucí šikmo přes sedimentární vrstevnatost. V ostatních částech je několik hnízd se zvýšenou aktivitou.



Obrázek 27: Velkoplošný řez VL-3. Foto: P. Pernický, 2023.

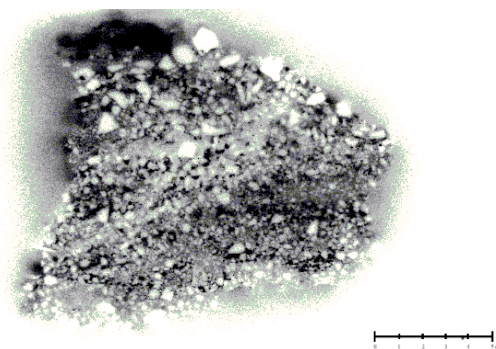


Obrázek 28: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-3. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.

Ve vzorku VL-4 je nejaktivnější částí malá partie v horní části vzorku, výrazně jemnozrnnějšího pískovce bohatá na Fe hydroxidy, ostatní hrubozrnná část vzorku je spíše skvrnitá až hnízdovitá.



Obrázek 29: Velkoplošný řez VL-4. Foto: P. Pernický, 2023.



Obrázek 30: Celoplošná autoradiografie, vzorek VL-4. Foto: J. Ráliš, P. Pernický, 2023.

Pozorované textury rud svědčí o epigenetickém původu uranového zrudnění v těchto pískovcích (místa až slepencích). Uran se do horniny dostal až po jejím uložení, kdy se srážel v propustných částech.

5 DISKUZE

Radioaktivita je naprosto přirozená vlastnost všech hornin, vzduchu i samotného lidského těla. S ionizujícím zářením se setkáváme pořád a veškeré známé organismy jsou s přirozenými úrovněmi v symbióze. Uranová ložiska jsou významným zdrojem energetické suroviny pro bezemisní energetiku. Uranová ložiska v pískovcích jsou v současnosti nejvýznamnějším genetickým typem, zajišťujícím největší část uranu v celosvětovém měřítku. Cílem této práce bylo Vám představit neobvyklé uranové ložisko Velký Luh, které se nachází poblíž Chebu.

S největší pravděpodobností zde došlo k infiltraci uranu v průběhu intenzivního terciárního zvětrávání smrčinského granitu. Hornina již byla usazena a procházely skrz ni v terciéru(?) roztoky se zvýšenou koncentrací U, který v nich byl zachycen. Dobře o tom svědčí pořízené autoradiografické obrazy textu rud. Podobný příklad známe ze Stráže pod Ralskem, kde se vyskytují i podobné texturní typy rud (Arapov a kol. 1984).

Rozdíl mezi ložiskem ve Stráži pod Ralskem a Velkým Luhem je v oxidačně-redukčním režimu mineralizačního procesu. Ve Stráži pod Ralskem měla hornina (cenomanské pískovce) redukční charakter v důsledku obsahu rostlinné organiky a pyritu. Tato situace je celosvětově běžná (srovn. Cuney a Kyser 2015). Z mineralogického složení hornin je patrné, že na ložisku Velký Luh docházelo k záchytu uranu v oxidačním režimu, což je velice neobvyklé až překvapivé, neboť hydratované oxidy trojmocného Fe obvykle nemají vysokou schopnost záchytu uranu (Goliáš úst. sděl. 2024). Také novější laboratorní pokusy dokládají, že uran (6+) je z roztoku hydratovanými železitymi oxidy (HFO) sice sorbován, ale stárnutím a rekrytalizací HFO je opět do roztoku vypuzen (Jang a kol. 2007). Zde stále vidíme rozpor mezi doposud pozorovanými případy v přírodě, laboratorními experimenty a tímto konkrétně popsáním případem, který zkoumáme.

6 PLÁNY NA POKRAČOVÁNÍ

Problematika uranového ložiska Velký Luh je relativně velmi komplexní. Je náročná jak laboratorně, tak i s ohledem na velmi dlouhé čekací doby a expozice mezi jednotlivými úkony. Během mé práce bylo dosaženo významných výsledků a došlo k výraznému posunu povědomí o zkoumané problematice. Je však potřeba provedení dalších prací. Jsou plánovány: Alfa-autoradiografie, která pomůže zjistit distribuci uranových fází v mikroměřítku, optická mikroskopie na základě výsledků alfa-autoradiografie, vyhotovení detailních fotek z optické mikroskopie. Na závěr bude provedena elektronová mikroanalýza, při níž by mělo být podrobně prozkoumáno chemické složení přítomných uranových fází v mikroměřítku. Doufám, že budu moci v této práci pokračovat i v rámci budoucího VŠ studia na PřF UK.

7 ZÁVĚR

Mohu říci, že proběhlý výzkum výrazně posunul povědomí o tomto zajímavém typu sedimentárního uranového zrudnění na ložisku Velký Luh (Chebská pánev, vildštejnské souvrství), v situaci, kdy nebylo možno nijak ověřit předchozí výsledky, neboť vzorky získané vrtným průzkumem v 60. letech byly nenávratně ztraceny.

Nově byl prozkoumán nedávno nalezený výchoz podobného typu jižně od hlavního ložiska, kde byl radiometricky vizualizován jeho tvar. Z výsledku laboratorního výzkumu je jasné, že se uran vyskytuje ve vysokých koncentracích a je vázán na železitý tmel pískovců až slepenců, podobně, jako bylo popisováno v původních materiálech. RTG difrakcí byly ve tmelu identifikovány goethit, a Mn-oxidy (birnessit a kryptomelán), jež jsou i podle velkoplošných autoradiografií v makroměřítku hlavními nositeli uranu v popisovaných horninách.

Práce otevírá dveře dalšímu výzkumu vazby uranu i v mikroměřítku u tohoto neobvyklého ložiskového typu, který by pomohl jeho vznik objasnit.

8 POUŽITÁ LITERATURA

Arapov J.A., Afanasjev G.V., Badár J, et al. (1984): Československá ložiska uranu. SNTL, 365s.

Burda J. [et al]. (1998): Vysvětlivky k souboru geologických a ekologických účelových map přírodních zdrojů v měřítku 1:50 000. Listy 11-13 Hazlov a 11-14 Cheb; Český geologický ústav Praha, vydání 1., 75 stran, ISBN 80-7075-263-7

Cuney M., Kyser K. (2015): Geology and geochemistry of uranium and thorium deposits. Min.Soc.Can., Short Course Vol. 46, 345s., Montreal, Quebec.

Geologická mapa 1: 50 000 - indexy, Geologická mapa 1: 50 000 - doplňky, Geologická mapa 1: 50 000, Klad listů ZM50. In: Geovědní mapy 1: 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2024-03-18]. Upravil Patrik Pernický, 2024. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

Hecht L., Vignerese J.L., Morteani G. (1997): Constraints on the origin of zonation of the granite complexes in the Fichtelgebirge (Germany and Czech Republic): evidence from a gravity and geochemical study; Geol Rundsch (1997) 86, Suppl.: S93 – S109

Jang J.H., Dempsey D.A., Burgos W.D. (2007): A Model-Based Evaluation of Sorptive Reactivities of Hydrrous Ferric Oxide and Hematite for U(VI). Environ. Sci. Technol. 2007, 41, 12, 4305–4310.

Mísař Z., Dudek A., Havlena V., Weiss J. (1983): Geologie ČSSR. 1. Český masív – Státní pedagogické nakladatelství, Praha.

Novák D. (2022): Uranové zrudnění podkrkonošského permu: Vazba radioaktivních prvků v horninách rudnického obzoru na lokalitě Vrchlabí. MS – Bakalářská práce, Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy.

Obr F. (1978): Exogenní uranové zrudnění v západočeském terciéru. Geol. Hydrometal. Uranu 2 / 3, s.3-40.

Obr F. (1973): Exogenní uranové zrudnění v západočeském terciéru. Rigorózní práce. Brno: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy.

Pláček Z. (1968): Závěrečná zpráva o výsledcích geologicko-průzkumných prací na Chebské pánvi. Archiv DIAMO, SUL Příbram.

Turnová Š. (2019): Léčivé radioaktivní minerální prameny v oblasti Skalná – Bad Brambach. MS – Diplomová práce, Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, 69s.